HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH AND FORECASTING

ISSN 2618-9631

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ

№ 2 (380)

2021

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»

№ 2 (380)

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

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 2 (380)

Москва
2021

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Гидрометеорологические исследования и прогнозы

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

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

Анализируются особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии зимой 2020/2021 гг. По данным наблюдений METAR за 2001–2020 гг. на 26 международных аэродромах в азиатской части России исследованы эпизоды пыльных бурь. Приведены результаты объектно-ориентированных оценок прогноза осадков в Центральном федеральном округе России по модели COSMO-Ru2 за май–сентябрь 2016–2020 гг. Анализируются выходы южных циклонов на территорию Республики Башкортостан в 1993–2018 гг. В гидрологическом разделе описана автоматизированная система, которая на основе метода экстраполяции гидрографа позволяет прогнозировать характеристики стока рек России с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Выполнено сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края. В разделе агрометеорологии представлены результаты прогноза урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа России. В информационном разделе дана оценка многолетних колебаний температуры воздуха и осадков на территории Забайкалья.

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
Коэльо 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

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», 2021

Hydrometeorological research center of the Russian Federation
Hydrometeorological Research and Forecasting

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

The features of the Northern Hemisphere large-scale atmospheric circulation in the winter of 2020/2021 are analyzed. According to METAR observations at 26 international airdromes during 2001-2020, episodes of dust storms in the Asian part of Russia are studied. The results of the object-oriented verification of precipitation forecasts for the Central Federal District of Russia using the COSMO-Ru2 model for May-September in 2016-2020 are presented. The arrivals of southern cyclones to the territory of the Republic of Bashkortostan in 1993-2018. The hydrological section describes an automated system that, based on the hydrograph extrapolation method, allows predicting the characteristics of the flow of Russian rivers with a lead time of 1 to 10 days. The comparison of snow cover characteristics according to weather station data and ERA 5-Land reanalysis is performed for the territory of the Perm region. The agrometeorological section presents the results of grain crop yield forecasting based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District of Russia. The long-term variations in air temperature and precipitation in Transbaikalia are analyzed in the Information section.

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 Hose 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
Khristoforov 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

© Hydrometeorological research center of the Russian Federation, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Общая циркуляция и характеристики атмосферы

Климатические особенности зимнего сезона 2020/2021 гг. и прогностические оценки температурно-влажностного режима на лето 2021 г. по территории Северной Евразии 6
Хан В.М., Вильфанд Р.М., Емелина С.В., Каверина Е.С., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Сумерова К.А., Тищенко В.А.

Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части Российской Федерации 20
Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И., Завьялова А.А.

Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май-сентябрь) 2016-2020 гг. по модели COSMO-Ru2 43
Кисельникова В.З.

Решение задачи оптимального управления рассеянием тумана 52
Клёмин В.В., Суворов С.С.

Анализ выхода южных циклонов на территорию Республики Башкортостан 66
Волобуева О.В., Топтунова О.Н., Дробжева Я.В.

Гидрологические прогнозы

Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа 77
Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.

Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края 95
Крючков А.Д., Калинин Н.А.

Агрометеорологические прогнозы

Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа 111
Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С.

Информационные сообщения

Оценка изменений температуры воздуха и осадков на территории Забайкалья 138
Смахтин В.К.

CONTENTS

General circulation and characteristics of the atmosphere

Climatic features of the 2020/2021 winter season
and the air temperature and precipitation outlook for the summer of 2021
over Northern Eurasia .....……...……...… 6
Khan V.M., Vilfand R.M., Emelina E.V., Kaverina E.S., Kruglova E.N.
Kulikova I.A., Sumerova K.A., Tischenko V.A.

Dust storm episodes at the aerodromes in the Asian part of Russia .....…… 20
Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Komasko N.I., Zavialova A.A.

Object-oriented assessment of COSMO-Ru2 precipitation forecast quality
for the warm season (May-September) in 2016-2020 ……..... 43
Kiselnikova V.Z.

Solving the problem of optimal control of fog diffusion ...……..... 52
Klyomin V.V., Suvorov S.S.

Analysis of the arrival of southern cyclones
to the Republic of Bashkortostan …..……...…. 66
Volobueva O.V., Toptunova O.N., Drobzheva Y.V.

Hydrological forecasts

Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation ……...… 77
Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K.,
Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.

Comparison of snow cover characteristics according
to weather stations and ERA 5-Land reanalysis in the Perm region .....……... 95
Kryuchkov A.D., Kalinin N.A.

Agrometeorological forecasts

Forecasting grain crop yield based on the integration of ground
and satellite data in the subjects of the Southern Federal District …….…… 111
Strashnaya A.I.., Bereza O.V., Klang P.S.

Informational notes

Assessment of changes in air temperature and precipitation in Transbaikalia ..…… 138
Smakhtin V.K.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-6-19
УДК 551.5

Климатические особенности зимнего сезона 2020/2021 гг. и прогностические оценки температурно-влажностного режима на лето 2021 г. по территории Северной Евразии

В.М. Хан, Р.М. Вильфанд, С.В. Емелина, Е.С. Каверина, Е.Н. Круглова, И.А. Куликова, К.А. Сумерова, В.А. Тищенко

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

Анализируются основные особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии за прошедшую зиму 2020/2021 гг.; приводится успешность консенсусных прогнозов температуры воздуха и осадков, составленных в ходе работы предыдущей сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-19), с оценками качества консенсусных прогнозов по территории Северной Евразии; рассматриваются и анализируются основные особенности термического состояния океана и крупно-масштабной циркуляции атмосферы на предстоящее лето 2021 г.; формулируется прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2021 года, согласованный с экспертами-участниками СЕАКОФ-20.

Ключевые слова: Северо-Евразийский климатический форум, Северо-Евразийский климатический центр, консенсусный прогноз, температура воздуха, осадки, крупномасштабная атмосферная циркуляция, гидродинамические модели, температура поверхности океана

Climatic features of the 2020/2021 winter season and the air temperature and precipitation outlook for the summer of 2021 over Northern Eurasia

V.M. Khan, R.M. Vilfand, E.V. Emelina, E.S. Kaverina, E.N. Kruglova, I.A. Kulikova, K.A. Sumerova, V.A. Tischenko

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

The main features of the Northern Hemisphere large-scale atmospheric circulation are analyzed for the past 2020/2021 winter. The accuracy of consensus forecasts of air temperature and precipitation compiled during the work of the 19th session of the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-19) is presented, with the skill scores of consensus forecasts for Northern Eurasia. The main features of the thermal state of the ocean and large-scale atmospheric circulation for the coming summer of 2021 are considered and analyzed. A forecast of surface air temperature and precipitation anomalies for the summer of 2021 agreed with the NEACOF-20 experts is formulated.

Keywords: North Eurasian Climate Outlook Forum, North Eurasian Climate Center, consensus forecast, air temperature, precipitation, large-scale atmospheric circulation, hydrodynamic models, sea surface temperature

Введение

Северо-Евразийский климатический центр – СЕАКЦ [1, 4, 10] под эгидой Всемирной метеорологической организации начиная с 2011 года на регулярной основе проводит Северо-Евразийские климатические форумы. Площадка СЕАКОФ позволяет объединить национальных и международных экспертов из метеослужб и исследовательских центров, отраслевых пользователей и представителей заинтересованных сторон для обсуждения целого ряда вопросов, связанных с научно-оперативными задачами по прогнозированию климатической изменчивости на сезонных масштабах в Северной Евразии [2, 11, 13]. Юбилейная 20-я сессия Северо-Евразийского климатического форума СЕАКОФ-20 прошла в онлайн-режиме на базе ФГБУ «Гидрометцентр России» с 20 по 21 мая 2021 г. В первый день работы СЕАКОФ-20 были представлены доклады и дискуссии ведущих экспертов из прогностических центров Германии, Индии, Китая, Франции, Японии, представителей Секретариата Всемирной метеорологической организации, специалистов Гидрометцентра России, НИУ Росгидромета, Московского автодорожного института. Программа второго дня СЕАКОФ-20 в основном затрагивала оперативно-прогностические вопросы. В ходе мероприятия ведущие специалисты СЕАКЦ и метеослужб стран СНГ обсуждали данные климатического мониторинга и сезонного прогнозирования по результатам анализа и оценок метеослужб стран СНГ и дальнего зарубежья с целью выпуска консенсусного прогноза приземной температуры воздуха и осадков на предстоящий летний сезон 2021 года по территории Северной Евразии.

Хотелось бы отметить, что в рамках работы СЕАКЦ также продолжает развиваться направление мониторинга и прогноза влияния погодно-климатических условий на различные сферы экономики [3]. Задача оценки климатических рисков в интересах различных секторов экономики является важной и актуальной [15]. В ходе форума СЕАКОФ-20 впервые был представлен бюллетень по оценке возможного влияния ожидаемых крупных аномалий температуры воздуха и осадков на жизнедеятельность населения, который в последствии планируется выпускать на регулярной основе.

В данной статье приводятся основные результаты по итогам работы СЕАКОФ-20 в части обобщенного анализа особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии за прошедшую зиму 2020/2021 гг., успешности консенсусных прогнозов температуры воздуха и осадков, составленных в ходе работы предыдущей сессии СЕАКОФ-19.

Обсуждаются основные особенности термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на предстоящее лето 2021 г., приводится формулировка прогноза аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2021 г. по согласованию с экспертами-участниками форума.

Информация о СЕАКОФ-20, программа форума и итоговое консенсусное решение доступны на сайте СЕАКЦ (http://seakc.meteoinfo.ru/-neacof/367-neacof20).

Основные особенности атмосферной циркуляции в Северном полушарии зимой 2020/2021 гг.

По данным мониторинга климатической системы в декабре 2020 года наблюдался сильный стратосферный полярный вихрь со скоростями среднезонального ветра на 20–30 м/с, больше среднеклиматических значений. В конце декабря температура полярной стратосферы начала повышаться и скорость среднезонального ветра замедлилась. В начале января 2021 г. произошло главное внезапное стратосферное потепление (ВСП), длившееся около трех недель и вошедшее в десятку наиболее длительных. ВСП произошло при западной фазе квазидвухлетнего цикла колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере и при холодной фазе Ла-Нинья. ВСП сопровождалось усилением в стратосфере Алеутского антициклона. Восстановление западного направления среднезонального ветра произошло в нижней стратосфере в конце января, в средней – в начале февраля.

В средней тропосфере на уровне АТ500 гПа (рис. 1а) в зимнем сезоне мощные тропосферные гребни распространяли свое влияние на север, взаимодействуя, образовывали над полюсом блокирующие процессы. Под их влиянием околополярный циклон деформировался и сместился относительно нормального положения, тем самым нарушив зональную циркуляцию в полярных широтах.

Индекс Арктического колебания большую часть зимнего периода был отрицательным с минимальными значениями в первой половине февраля. Западно-восточный перенос восстановился только во второй половине февраля, и над Северной Атлантикой активизировался циклогенез.

У поверхности земли над полярной областью в течение зимнего сезона доминировали гребни и антициклоны (рис. 1б), наиболее мощными они были в феврале. Исландский минимум оказался несколько смещен от своего нормально положения, а связанная с ним глубокая ложбина занимала практически всю территорию Европы. Процессы блокирования над Европейской территорией России, а также мощные гребни полярных антициклонов и интенсивная западная периферия Сибирского максимума в декабре привели к формированию обширной зоны положительных аномалий приземного давления над Европейской территорией России.

а)

б)

Рис. 1. Карта аномалий относительно периода 1981–2010 гг. и значений, осредненных за зимний сезон 2020/2021 гг.: геопотенциала на поверхности АТ-500 (а); приземного давления, приведенного к уровню моря (б) по данным реанализа ERA5.

Fig. 1. Anomalies of the averaged over the winter season 2020/2021: geopotential at H-500 hPa (a); sea level pressure (б) based on to ERA5 reanalysis data (reference period 1981-2010).

Сибирский максимум, обширный и мощный в декабре и январе, в феврале оказался сильно ослабленным. На среднемесячной карте центр его располагается на юге центральной Сибири. Восточная часть Сибирского максимума была ослаблена, а северная и западная периферии были интенсивными. В Тихом океане оба центра действия атмосферы, Алеутский минимум и Тихоокеанский максимум, были хорошо выражены, аномалии в районе Алеутских островов составляла -8 гПа, на северо-востоке Тихого океана +6 гПа.

Успешность прогнозов температуры воздуха и осадков за зимний сезон 2020/2021 гг.

С развитием и совершенствованием ансамблевых прогностических систем появляются реальные возможности для объективного подхода к выпуску долгосрочных прогнозов по разным регионам мира. Применение методов статистической интерпретации выходных данных моделей также позволяет несколько улучшить качество прогностической информации [6–8].

В рамках развития методов составления консенсусных прогнозов на двух предыдущих сессиях СЕАКОФ применялся полуобъективный подход к составлению косенсусного прогноза на основе комплексации результатов интегрирования моделей атмосферы и океана пяти прогностических центров: Гидрометцентра России/ИВМ РАН [9], Главной геофизической обсерватории [5], метеослужбы Канады ECCC/MSC, Токийского климатического центра (TCC) и Центра прогнозирования климата (CPC NOAA США). Веса моделей при комплексировании обсуждались участниками форума по результатам обобщенного анализа данных мониторинга крупномасштабных циркуляционных составляющих. По этой причине подход к составлению консенсусного прогноза носил полуобъективный характер.

Ниже приводится анализ успешности прогноза аномалий температуры воздуха и осадков за зиму 2020/2021 гг.

В зимний сезон обширная зона отрицательных аномалий температуры воздуха охватила центральную и восточную части Европейской территории России, Урал и практически всю территорию Сибири (рис. 2б). Основной вклад в эту аномалию внесли очень холодные январь и февраль. Обширные очаги холода на территории России не были спрогнозированы по данным консенсусного прогноза, предсказывались аномалии выше нормы (рис. 2а).

По фактическим данным в российском секторе Арктики аномалии были положительными, максимальные положительные аномалии (более 6 °С) отмечались на арктическом побережье Таймыра. В указанных выше северных регионах прогноз полностью оправдался. Близко к норме и чуть выше температура воздуха за зимний сезон оказалась на юге Восточной Сибири, севере Якутии, Чукотке, в Магаданской области, севере

Камчатки. В республиках Беларусь, Украина и Молдова среднесезонная температура воздуха превысила климатическую норму, что было отражено в прогнозе.

Теплее обычного зимний сезон оказался на юге Европейской территории России и в республиках Закавказья. Эти особенности в консенсусном прогнозе были отмечены.

На большей части Республики Казахстан зимняя температура воздуха была ниже климатической нормы, лишь в крайних западных и восточных областях немного ее превышала.

Рис. 2. Консенсусный прогноз среднесезонной аномалии температуры воздуха на зиму 2020/2021 гг. в вероятностной форме, рассчитанный на основе интерпретации данных 5 моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение нормированных аномалий приземной температуры по данным ERA5 реанализа за зимний сезон 2020/2021 гг. (б).

Fig. 2. Consensus forecast of the average seasonal air temperature anomaly in winter 2020/2021 in probabilistic form based on the interpretation of 5 forecast models (PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of normalized surface temperature anomaliesbased on the ERA5 reanalysis data for the winter season 2020/2021. (б).

Особенно холодным в Казахстане выдалось начало зимнего сезона. Зона отрицательных аномалий среднесезонной температуры воздуха распространилась и на северные районы Узбекистана. На остальной территории среднеазиатских республик средняя за сезон температура воздуха была около и выше климатической нормы. Консенсусный прогноз по температуре воздуха для территории Средней Азии оправдался с умеренной успешностью.

На большей части СНГ осадков за холодный период выпало в пределах или выше нормы (рис. 3б).

а)

б)

Рис. 3. Консенсусный прогноз среднесезонных аномалий осадков на зиму 2020/2021 гг. в вероятностной форме, рассчитанный на основе интерпретации данных 5 моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение нормированных аномалий осадков по данным ERA5 реанализа за зимний сезон 2020/2021 гг. (б).

Fig. 3. Consensus forecast of the average seasonal precipitation anomaly in winter 2020/2021 in probabilistic form based on the interpretation of 5 forecast models (PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of normalized precipitation anomalies based on the ERA5 reanalysis data for the winter season 2020/2021. (б).

Большие влагозапасы снежного покрова были на Азиатской территории России. Месячные суммы осадков в Забайкалье в январе и феврале в 2–3 раза превышали норму. Консенсусный прогноз правильно воспроизвел избыток осадков на севере Красноярского края, северо-востоке и юге Европейской территории России (рис. 3а)

Дефицит осадков отмечался в центральных и юго-западных районах Казахстана, на территории Узбекистана и большей части Туркменистана, Таджикистана, Киргизии. Прогноз воспроизвел основные особенности распределения осадков в Средней Азии.

Успешность консенсусного прогноза на зиму 2020/2021 гг. [2] по всей территории Северной Евразии для приземной температуры воздуха составила 55 %, для осадков – 75 % (таблица). Наиболее высокие оценки оправдываемости прогнозов как для аномалий температуры воздуха (70 %), так и для осадков (86 %) отмечены по территории Средней Азии.

Таблица. Оценки консенсусных прогнозов температуры воздуха и осадков (%) за зимний сезон 2020/2021 гг.
Table. Skill scores in % of consensus forecasts of air temperature and precipitation for the winter season 2020/2021

	Северная Евразия	Европейская часть	Азиатская часть	Центральная Азия
Температура воздуха	55	55	51	70
Осадки	75	77	72	86

Ожидаемые оценки термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на летний сезон 2021 года

Согласно прогнозам IRI/CPC, вероятности событий La Nina (Ла-Нинья), нейтральной фазы, и El Nino (Эль-Ниньо) (Nino3.4, пороговые значения: -0,5 °C и 0,5 °C) в предстоящем летнем сезоне: 20 %, 68 % и 12 % соответственно.

Большинство центров прогнозируют значительные положительные аномалии ТПО в северной части Тихого океана, связанные с отрицательной фазой Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO). Данное обстоятельство может привести к существенному изменению положения и интенсивности Алеутского минимума и Субтропического максимума. В Северной Атлантике на большей части акватории ожидаются положительные аномалии ТПО, наиболее значительные – в районе Гольфстрима, к северу от Исландии и на акватории Баренцева

моря, что соответствует положительной фазе индекса Северо-Атлантического колебания (NAO), а также активизации Исландского минимума и Азорского антициклона.

С точки зрения режимов атмосферной циркуляции, летний сезон 2021 г. на большей части территории Северной Евразии ожидается неоднородным.

В первой половине лета наиболее вероятно преобладание меридиональных форм атмосферной циркуляции, блокирующих ситуаций над Европой на фоне усиления влияния Азорского антициклона и распространения его гребня на север. В свою очередь для Исландского минимума есть сигнал об ослаблении и сокращении сферы влияния.

Во второй половине лета наиболее вероятно усиление зонального переноса над Европой на фоне интенсификации атлантических центров действия и приближения их к своему климатическому положению. При этом циркумполярный вихрь над полюсом активизируется, обуславливая также повышенную активность циклонов над севером Сибири и Дальнего Востока. Тихоокеанские центры действия могут быть сдвинуты на северо-запад. При этом Алеутский минимум, распространившись на Чукотку, по своей интенсивности, возможно, приблизится к норме. Субтропический максимум, довольно сильный и хорошо выраженный, может оказать влияние на юг Дальнего Востока.

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2021 года

По заключению участников СЕАКОФ-20, летний сезон 2021 г. ожидается теплее обычного в полярной зоне Северной Евразии (вероятность 55–65 %), за исключением крайних западных и восточных районов. Положительные аномалии температуры воздуха с вероятностью от 40 до 60 % ожидаются на юге Европейской территории России, на Украине, в Молдавии, Закавказье.

На территории Центральной Азии, за исключением севера Казахстана, температурный фон ожидается выше нормы с вероятностью 40–45 %. Крайний юг Дальнего Востока с вероятностью 60–65 % также будет находиться под влиянием повышенного температурного фона. Температура воздуха ниже нормы с вероятностью около 40 % прогнозируется на северо-западе Европейской территории России, в центральных районах Якутии и на Камчатке (рис. 4).

Избыточное увлажнение с вероятностью до 45% ожидается в полярной зоне Северной Евразии, за исключением северо-восточных районов Северо-Западного федерального округа, на юге Дальневосточного федерального округа. Дефицит осадков возможен (вероятность 40–55 %) на юге Европейской территории России, на Украине, в Белоруссии, Молдавии, Закавказье, сопредельных территориях Приволжского и Уральского федеральных округов, юге Западной Сибири.

Рис. 4. Консенсусный прогноз среднесезонной аномалии температуры воздуха на лето 2021 г. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 5 моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены красным, отрицательные – синим цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.
Fig. 4. Map of the consensus forecast of the mean seasonal air temperature anomaly for the summer of 2021 in probabilistic form, based on the interpretation of data from 5 models (PLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are indicated in red, negative anomalies in blue, the color saturation corresponds to the probability of an anomaly.

На территории Центральной Азии, в центральных районах Красноярского края и Якутии с вероятностью около 40 % возможны осадки ниже нормы (рис. 5).

Авторы выражают глубокую благодарность П.Н. Варгину за ценное консультирование в ходе проведения анализа стратосферной циркуляции

Исследование по предсказуемости крупномасштабных циркуляционных процессов выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00254, https://rscf.ru/project/21-17-00254/.

Рис. 5. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии осадков на лето 2021 г. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 5 моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены зеленым, а отрицательные – красным цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 5. Map of the consensus forecast of the mean seasonal precipitation anomaly for the summer of 2021 in probabilistic form, based on the interpretation of data from 5 models (PLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are indicated in red, negative anomalies in blue, the color saturation corresponds to the probability of an anomaly.

Список литературы

1. *Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М.* Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 151-160.

2. *Вильфанд Р.М., Сумерова К.А., Тищенко В.А., Хан В.М.* Основные особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции в контексте анализа консенсусного прогноза температуры воздуха и осадков на лето 2020 года по Северной Евразии // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). С. 20-35.

3. *Емелина С.В., Хан В.М.* Перспективы развития специализированного климатического прогнозирования в СЕАКЦ // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2021. № 1 (379). С. 101-111.

4. *Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А.* Технология выпуска региональных долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 36-58.

5. *Мирвис В.М., Мелешко В.П.* Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3-40.

6. *Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н.* Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 121-132.

7. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Применение статистической коррекции детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для Арктики // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 361. С. 47-65.

8. *Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А.* Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24-39.

9. *Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю.* Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25-35.

10. *Хан В.М.* Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 5-12.

11. *Хан В.М.* Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 5-13.

12. *Хан В.М., Куликова И.А., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Цепелев В.Ю.* Составление консенсусных метеорологических прогнозов на сезон в рамках СЕАКОФ на примере зимы 2017/2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 88-104.

13. *Хан В.М.* О результатах Девятнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-19), 17–18 ноября 2020 г. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 139-145.

14. *Цепелев В.Ю., Хан В.М.* Вероятностное представление долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 17-31.

15. Use of Climate Prediction to Manage Risks // WMO-No. 1174. 2016. 39 p.

References

1. *Vilfand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A., Tolstych M.A., Khan V.M.* Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya*

i prognozy [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 151-160. [in Russ.].

2. *Vilfand R.M., Sumerova K.A., Tishchenko V.A., Khan V.M.* The main features of large-scale atmospheric circulation in the context of analyzing the consensus forecast of air temperature and precipitation for the 2020 Northern Eurasia summer. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2021, vol. 379, no. 1, pp. 20-35. [in Russ.].

3. *Emelina S.V., Khan V.M.* Plan for the development of specialized climate forecasting in NEACC. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2021, vol. 379, no. 1, pp. 101-111. [in Russ.].

4. *Kiktev D.B., Khan V.M., Kryzhov V.N., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A.* Technology of issue of long-range forecasts in the North-Eurasian Climate Centre (NEACC). *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2015, vol. 358, pp. 36-58. [in Russ.].

5. *Mirvis V. M., Meleshko V. P.* Current Status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy GGO* [*Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory*], vol. 558, pp. 3-40. [in Russ.].

6. *Tishchenko V.A., Khan V.M., Tolstykh M.A., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Gelfan A.N.* Application of statistical correction for deterministic monthly and seasonal PLAV model forecasts of air temperature and precipitation for some regions of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2015, vol. 358, pp. 121-132. [in Russ.].

7. *Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A.* Application of statistical correction to deterministic air temperature and precipitation forecasts for the Arctic region produced by SL-AV model. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2016, vol. 361, pp. 47-65. [in Russ.].

8. *Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A.* Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2019, vol. 44, no. 3, pp. 169-179. DOI: 10.3103/S1068373919030026.

9. *Tolstykh M. A., Geleyn J.-F., Volodin E. M., Bogoslovskii N. N., Vilfand R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Kostrykin S. V., Mizyak V. G., Fadeev R. Yu., Shashkin V. V., Shlyaeva A. V., Ezau I. N., Yurova A. Yu.* Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 374-382. DOI: 10.3103/S1068373915060035.

10. *Khan V.M.* Activity of the North-Eurasian Climate Center (NEACC) and the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF) aimed at climate services improvement within the international structure of WMO. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2015, vol. 358, pp. 5-12. [in Russ.].

11. *Khan V.M.* The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2017, vol. 366, pp. 5-13. [in Russ.].

12. *Khan V.M., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Kruglova E.N., Tsepelev V.Yu.* Consensus meteorological sesonal forecasting within NEACOF activity: a case study for winter 2017/2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2018, vol. 370, pp. 88-104. [in Russ.].

13. *Khan V.M.* The results of the Nineteenth Session of the North Eurasian Climate Forum (NEACOF-19), November 17-18, 2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2020, vol. 378, no. 4, pp. 139-145. [in Russ.].

14. *Tsepelev V.Yu., Khan V.M.* Probabilistic representation of long-range weather forecasts worked out using the synoptic methods. *Russ. Meteorol. Hydrol*., 2015, vol. 40, no. 4, pp. 231-241. DOI: 10.3103/S1068373915040020.

15. Use of Climate Prediction to Manage Risks. WMO-No.1174, 2016, 39 p.

Поступила 20.05.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 20.05.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.062021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-20-42
УДК 551.506.9+551.589.6

Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части Российской Федерации

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

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

По данным наблюдений METAP за 2001–2020 гг. на 26 международных аэродромах в азиатской части Российской Федерации исследованы эпизоды пылевого переноса, приводящего к ухудшению видимости. Обсуждаются условия выпуска сводок о пыльных бурях, их соответствие определению пыльной бури. Установлено, что из 337 сводок, описывающих перенос пыли при сильном ветре в отсутствие осадков, определению пыльной бури соответствовали только шесть, зарегистрированных на аэродромах Иркутска, Абакана, Омска и Благовещенска. Остальные случаи, отмеченные на 15 из 26 аэродромов, могут быть отнесены к «dust event» – эпизодам переноса пыли, приводящим к некритичному ухудшению видимости. Изучается сезонный ход таких эпизодов, его связь с изменением видимости. Приводятся характеристики запыленных воздушных масс и направление их адвекции.

Ключевые слова: пыльная буря, случаи переноса пыли, аэродромы в азиатской части России, сезонный ход, траекторный анализ

Dust storm episodes at the aerodromes in the Asian part of Russia

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

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

According to 2001-2020 METAR data, episodes of dust transfer causing poor visibility at 26 international aerodromes in Asian Russia are studied. The conditions for issuing reports on dust storms, their correspondence to the definition of a dust storm are discussed. It was found that out of 337 reports describing dust transport by strong wind, only 6 episodes registered at the aerodromes of Irkutsk, Abakan, Omsk, and Blagoveshchensk corresponded to the classical definition. The others detected at 15 of 26 aerodromes may be defined as “dust events” – the episodes of dust transfer causing the nonessential visibility reduction. The seasonal variation in such episodes and its connection with changes in visibility are studied. The characteristics of dusty air masses and the direction of their advection are given.

Keywords: dust storm, dust events, aerodromes of Asian Russia, seasonal variation, trajectory analysis

Введение

Статья является продолжением исследования повторяемости пыльных бурь на аэродромах Российской Федерации. В предыдущей работе [2] был дан анализ воздействия переносимых песка и пыли на функционирование авиационного транспорта, их негативное влияние на видимость и состояние критических систем воздушных судов, а также проанализированы все наблюдения за период 2001–2019 гг. на аэродромах европейской части России, в которых содержалось сообщение о пыльной буре, DS (“dust storm”). Было установлено, что, несмотря на большое количество подобных сообщений в сводках METAP, пыльная буря по определению [9], сопровождающаяся уменьшением видимости до 1000 м и менее, наблюдалась всего однажды – 19 апреля 2003 г. на аэродроме Шпаковское (Ставрополь). Это свидетельствует о серьезной методической проблеме на наблюдательной сети, когда искусственно завышается количество опасных явлений.

В настоящей работе продолжен анализ случаев пыльных бурь на аэродромах Российской Федерации – в ее азиатской части, а также эпизодов пылевого переноса, приводящих к ухудшению видимости.

В [2] было отмечено, что территория России, хотя и не является в глобальном масштабе источником минерального аэрозоля, может подвергаться воздействию дальнего пылевого переноса со стороны расположенных южнее соседних государств, для которых характерны сухой климат, дефицит осадков и эрозия почвы. Для азиатской части страны такими соседями являются Казахстан и республики Средней Азии, большая часть которых расположена в аридной и полуаридной климатических зонах [7], Монголия, более половины которой занимает пустыня Гоби, и КНР. В Китае находится один из двух координационных центров системы предупреждений о песчаных и пыльных бурях и их оценки (SDS-WAS) Всемирной метеорологической организации [https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/SDS/warnings].

Для Китая пыльные и песчаные бури являются острой проблемой. С середины прошлого века ученые наблюдают тенденцию расширения засушливых районов северного Китая [12, 13]. Кроме пустыни Гоби (распространяющейся, помимо Монголии, на центральную часть Северного Китая) и других подобных, менее крупных аридных ландшафтов, источником аэрозоля является огромное количество промышленных выбросов. Существующая в этой стране сеть аэрозольных наблюдений CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network) проводит с помощью лидаров регулярные измерения 8 раз в сутки оптической толщины атмосферы [19]. Мониторинг этой характеристики осуществляется также с помощью аппаратуры, установленной на китайском спутнике Fengyun-3A [18]. Концентрация и минеральный состав пыли определяются с помощью отбора проб как на наземных пунктах [21], так и на высотах с помощью

самолетных измерений [20]. Китайскими специалистами изучается климатология пылевого переноса и ее изменчивость [11, 15]. Моделирование процессов переноса позволило установить, что большое количество пыли выносится на акваторию Тихого океана и может достигать не только Японии [14], но и – в 3 % случаев – западного побережья Северной Америки [22]. При этом пыль, основным источником которой являются пустыни Монголии, может подниматься при переносе на высоты до 10 км [22].

В свою очередь, исследователи загрязнения воздуха в Монголии отмечали, что высокие концентрации минерального аэрозоля наблюдаются там в дни с сильным ветром при переносе воздушных масс из пустынь Китая [1]. Кроме природных источников пыли (пустынь), большой вклад в аэрозольное загрязнение вносят разработки открытых месторождений в Монголии и Китае. При реализации проекта ACE-Asia по исследованию региональных климатических эффектов и оценке влияния на химическое загрязнение атмосферы аэрозоля было отмечено, что азиатский континент – самый крупный источник аэрозоля на планете [16].

Перенос пыли из степных и пустынных районов Казахстана и Средней Азии может оказывать потенциальное влияние главным образом на аэродромы Западной Сибири, Алтайского края и Республики Алтай. В кернах ледника г. Белуха исследователи обнаружили слои аэрозоля, источником которого были пыльные бури, пришедшие из районов Северного Казахстана [8]. Отметим в качестве положительного факта упомянутую в [5] тенденцию к уменьшению сильных пыльных бурь в Казахстане – их повторяемость сократилась более чем в 3 раза в 2003–2015 гг. по сравнению с периодом 1990–2002 гг.

1. Используемые материалы

Для исследования использовались созданные в Гидрометцентре России базы данных аэродромных наблюдений в коде METAP на крупных международных аэродромах азиатской части Российской Федерации за период с 2001 по 2020 год. Они содержат, помимо прочего, информацию об опасных явлениях погоды, к которым относятся и пыльные бури. Последние кодируются в сводках METAP буквами «DS», при этом приводится указание на изменение интенсивности процесса (+DS означает усиление пыльной бури, -DS соответствует ее ослаблению). Пыльная буря (DS) считается сильной, если «видимость менее 200 м и определение состояния неба затруднено» [3] и умеренной, если видимость «составляет менее 200 м и можно определить состояние неба или находится в диапазоне 200–600 м» [3].

Поскольку предыдущее исследование [2] показало, что выпускаемые на аэродромах сообщения о пыльных бурях в массе своей не соответствуют действительности (уменьшению видимости до значений 1 км и менее), особое внимание в данной работе уделялось проверке сводок

METAP. С этой целью были проанализированы сообщения о явлениях из синоптических наблюдений на ближайших станциях, а также условия погоды, характерные для пыльных бурь (низкая относительная влажность, сильный ветер).

Подробный анализ всех сводок с обозначением пыльных бурь позволил сделать вывод о том, что и на аэродромах в азиатской части страны сохраняется та же серьезная методическая проблема, заключающаяся в неверном кодировании наблюдаемого явления. Еще раз подчеркнем, что при пыльной буре видимость обязательно уменьшается до значений ниже 1000 м. Таких эпизодов было всего шесть, каждый из них был упомянут в разное время в единственной сводке и только однажды – в двух сводках подряд с интервалом 30 мин. Все прочие, если только не были ошибочными, могут быть отнесены к «dust events» – эпизодам переноса пыли, приводящие к ухудшению видимости [17].

Такие случаи часто могли быть закодированы как пыльный (DRDU) или песчаный поземок (DRSA) – введенный в 2015 г. инструктивный материал позволяет вносить в сводку это явление, если оно уменьшает видимость до значений, не превышающих 5000 м на высоте не более 2 м. Если помутнение атмосферы из-за пыли при значительных скоростях ветра происходит выше 2 м, такое явление должно определяться как низовая пылевая метель и кодироваться как BLDU.

На практике на многих аэродромах наблюдаемый перенос пыли был закодирован неверно. В подавляющем большинстве случаев пыльная буря регистрировалась при дальности видимости более 1000 м. Отметим, что аэродром Иркутск – единственный, где при окончании пыльной бури (или пылевого переноса) наблюдатели аккуратно отмечают в сводке METAP это явление в прошедшей погоде (REDS). На других аэродромах пыльная буря часто регистрировалась при максимальной видимости (10000 м и более) – например, в Чите в апреле 2006 г. в течение восьми сроков подряд. На аэродроме Елизово в Петропавловске-Камчатском в ноябре 2013 г. во время ремонта взлетно-посадочной полосы перенос строительной пыли, ухудшающей видимость при сильном ветре до 1000 м, кодировался как пыльный позёмок и песчаный позёмок.

Каждый эпизод, связанный с упоминанием пыли в сводках METAP, подвергался тщательному исследованию с привлечением траекторного анализа. Для оценки влияния дальнего переноса пыли на видимость на аэродроме были максимально исключены случаи ошибок кодирования и наблюдений. При этом в выборку были добавлены некоторые сводки с закодированной мглой (HZ), представляющей собой «помутнение воздуха из-за взвешенных в нем пыли, дыма, механических частиц» [9], если мгла наблюдалась при скоростях ветра более 6 м/с и низкой относительный влажности. Известно, что в некоторых случаях исследователи отождествляют «мглу» и «пыльную бурю» при переносе пыли из Китая в районы Дальнего Востока [4]. Сложность состояла в том, что в азиатской

части страны мгла часто обусловлена в равной степени как адвекцией пыли, так и дымом лесных пожаров. По этой причине сводки METAP со мглой исключались из рассмотрения, если соседние синоптические станции передавали сообщения о дымах. Если же синоптический код на станциях подтверждал наличие пыльной бури различной интенсивности (цифры кода 31–35), такие сообщения со мглой добавлялись к общей выборке.

В итоге процедура фильтрации начальной выборки с почти пятью сотнями сообщений о переносе пыли сократилась на треть, до 337.

Данные о явлениях в сводках METAP анализировались наряду с информацией о видимости, скорости ветра, температуре и точке росы. Два последние параметра, передаваемые с округлением до целых значений, использовались для расчета примерных значений относительной влажности. Траекторный анализ (построение обратных траекторий частицы над уровнем земли) выполнялся с помощью модели HYSPLIT (NOAA) на базе реанализа GDAS с разрешением 0,5×0,5º.

2. Анализ данных

Сформированная в итоге выборка наблюдений пылевого переноса содержала сводки METAP, выпущенные на 15 аэродромах (из 26) в азиатской части России в период 2001–2020 гг. Повторяемость таких сообщений, как и на аэродромах, расположенных в европейской части страны, весьма мала. Максимальное количество сводок было выпущено в Иркутске, Улан-Удэ и Благовещенске, их повторяемость за исследуемый период составила 0,015–0,018 %. Несмотря на значительную фильтрацию начальных данных, значения видимости, содержащиеся в подобных сводках, сильно варьируют, однако в 80 % случаев они не превышают 5000 м (табл. 1).

Таблица 1. Распределение значений видимости в сводках METAP при явлениях, связанных с переносом пыли за 2001–2020 гг. на аэродромах азиатской части России
Table 1. Visibility in METAP reports with dust transport for 2001-2020 at the aerodromes in Asian Russia

Видимость, м	0–1000	1001–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000	5001–6000	6001–7000	7001–8000	8001–9000	>9000	Сумма
Кол-во случаев	7	22	70	80	92	22	8	12	11	13	337
%	2.1	6,5	20,8	23,7	27,3	6,5	2,4	3,6	3,3	3,9	100

Помимо количества сводок METAP с явлениями пылевого переноса, было проанализировано число дней, в которые эти явления

регистрировались. Подобная характеристика может представлять интерес для климатического описания аэродрома [6]. Количество дней с переносом пыли за исследуемый 20-летний период отражено в табл. 2. Там же приведены значения минимальной видимости, отмеченной на каждом аэродроме, а также максимальная продолжительность «пылевого» эпизода (округленная до получаса, поскольку оценивалась только по данным METAR).

Таблица 2. Характеристики эпизодов с переносом пыли на аэродромах азиатской части России
Table 2. Characteristics of episodes with dust transfer at aerodromes in the Asian part of Russia

№	Индекс ИКАО	Индекс ВМО	Пункт* (аэродром)	Количество дней со случаями пылевого переноса	Минимальная видимость, м	Максимальная продолжительность, ч
1	USRR	23849	Сургут	2	2500	2
2	USSS	28440	Екатеринбург (Кольцово)	2	4800	0,5
3	USCC	28645	Челябинск	5	3000	5,5
4	UNOO	28698	Омск (Центральный)	5	700	1
5	UNKL	29570	Красноярск	2	2800	6
6	UNNT	29630	Новосибирск (Толмачево)	3	2200	6,5
7	UNEE	29642	Кемерово	4	2100	7
8	UNBB	29838	Барнаул	2	4000	2
9	UNWW	29846	Новокузнецк (Спиченково)	2	3100	4,5
10	UNAA	29865	Абакан	11	900	8
11	UIII	30710	Иркутск	30	700	2,5
12	UIAA	30758	Чита (Кадала)	6	2200	4
13	UIUU	30823	Улан-Удэ	18	1500	4
14	UHBB	31510	Благовещенск	5	900	10,5
15	UHHH	31735	Хабаровск (Новый)	1	6000	0,5

Примечание. * Здесь и далее в таблицах название аэродрома, совпадающее с названием населенного пункта, не указывается.
Note. * Hereinafter in the tables, the aerodrome name that coincides with the settlement name is not indicated.

Случаи, когда такой эпизод можно было рассматривать как пыльную бурю (уменьшение значений видимости до 1000 м и менее), регистрировались всего на четырех аэродромах: Омск, Абакан, Иркутск и Благовещенск. Во всех случаях интенсивность явления характеризовалась категорией «слабая». Самый продолжительный эпизод (10,5 ч), который наблюдался в Благовещенске в 2017 году, будет подробнее проанализирован в следующем разделе.

Оценка повторяемости эпизодов переноса пыли производилась для каждого года и для 5-летних периодов (минимальный отрезок наблюдений для составления климатического описания аэродрома). В период 2001–2020 гг. (табл. 3) особо выделяется интервал с 2006 по 2010 год, когда повторяемость количества дней с пылью на аэродромах азиатской части страны более чем в 2 раза превысила значения за предыдущую и последующую пятилетки. Рекордсменом является 2007 год: тогда было отмечено 15 дней (втрое выше, чем среднегодовое значение по 20-летней выборке) с пылевым переносом, зарегистрированным на 10 из 15 аэродромов. Большой вклад в этот рекорд внесла обширная пыльная буря из района Приаралья [10], которая в начале мая накрывала последовательно аэродромы Новосибирска, Кемерово, Барнаула, Новокузнецка, Абакана и Иркутска.

Отметим, что только на аэродроме Улан-Удэ имеет место существенное повышение повторяемости эпизодов пылевого переноса за последние 5 лет (11 из 18 дней за 20-летний период).

Анализ сезонного распределения эпизодов переноса пыли (табл. 4) выявил их отсутствие с ноября по март на всех аэродромах, за исключением Благовещенска (там был отмечен один мартовский эпизод). Чаще всего помутнение атмосферы из-за пыли на аэродромах регистрируется в апреле и мае. Число дней от общего количества за год в эти месяцы составляет 68 %, еще 12 % приходится на первый месяц лета. Из шести эпизодов реальных пыльных бурь с уменьшением значений видимости до 1000 м и менее, четыре были отмечены в мае и по одному – в апреле и июне.

В качестве региональных особенностей сезонного хода эпизодов пылевого переноса можно отметить, что на аэродроме Кольцово в Екатеринбурге они наблюдались в сентябре и октябре, в Кемерово – в мае и сентябре, на аэродроме Новый в Хабаровске единственный случай был зарегистрирован в октябре.

Поскольку большинство эпизодов переноса пыли приходится на весну и начало лета, значения температуры закономерно находятся в диапазоне от 11 до 25 °С в большинстве (74 %) случаев (рис. 1а). В 4 % сводок температура превышала 30 °С, в 5,6 % изменялась в диапазоне от 0 до 5 °С. Как и следовало ожидать, большинство запыленных воздушных масс оказываются очень сухими – в 63 % случаев значения относительной влажности воздуха не превышают 40 % (рис. 1б).

Таблица 3. Межгодовое распределение числа дней с пылевым переносом на аэродромах азиатской части России в период 2001-2020 гг.

Table 3. Interannual distribution of number of days/METAR reports in the sample of dust transfer episodes at aerodromes in the Asian Russia in 2001-2020

	Пункт (Аэродром)	Год																				
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Сумма
1	Сургут	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2	Екатеринбург (Кольцово)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
3	Челябинск	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	5
4	Омск (Центральный)	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
5	Красноярск	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6	Новосибирск (Толмачево)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
7	Кемерово	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
8	Барнаул	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
9	Новокузнецк (Спиченково)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
10	Абакан	1	1	2	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	11
11	Иркутск	0	2	2	1	0	3	3	2	1	1	1	2	1	3	2	1	2	1	1	1	30
12	Чита (Кадала)	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	6
13	Улан-Удэ	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	8	0	18
14	Благовещенск	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	5
15	Хабаровск (Новый)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Сумма		5	3	5	3	2	8	15	7	4	4	3	5	1	4	4	1	7	5	11	1	98
Среднее за период		3,6					7,6					3,4					5,0					4,9

Таблица 4. Сезонный ход числа дней в выборке эпизодов переноса пыли на аэродромах азиатской части России в период 2001-2020 гг.
Table 4. Seasonal distribution of number of days/METAR reports in the sample of dust transfer episodes at aerodromes in the Asian Russia in 2001-2020

№	Пункт (Аэродром)	Месяцы												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Сургут	0/0	0/0	0/0	0/0	1/5	0/0	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/6
2	Екатеринбург (Кольцово)	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	0/0	0/0	2/2
3	Челябинск	0/0	0/0	0/0	2/17	1/1	1/1	1/11	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	5/30
4	Омск (Центральный)	0/0	0/0	0/0	1/2	0/0	1/1	0/0	0/0	2/4	1/2	0/0	0/0	5/9
5	Красноярск	0/0	0/0	0/0	0/0	2/13	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/13
6	Новосибирск (Толмачево)	0/0	0/0	0/0	0/0	3/16	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/16
7	Кемерово	0/0	0/0	0/0	0/0	2/14	0/0	0/0	0/0	2/4	0/0	0/0	0/0	4/18
8	Барнаул	0/0	0/0	0/0	0/0	1/8	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/9
9	Новокузнецк (Спиченково)	0/0	0/0	0/0	0/0	2/12	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/12
10	Абакан	0/0	0/0	0/0	3/17	4/21	4/4	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	11/42
11	Иркутск	0/0	0/0	0/0	9/19	13/24	4/5	2/2	0/0	1/2	1/1	0/0	0/0	30/53
12	Чита (Кадала)	0/0	0/0	0/0	4/17	1/5	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	6/23
13	Улан-Удэ	0/0	0/0	0/0	6/22	10/31	0/0	1/2	1/1	0/0	0/0	0/0	0/0	18/56
14	Благовещенск	0/0	0/0	1/10	2/12	2/25	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	5/47
15	Хабаровск (Новый)	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/0	1/1
Сумма		0/0	0/0	1/10	27/106	42/175	12/13	5/16	1/1	6/11	4/5	0/0	0/0	**98/337**

а)

б)

Рис. 1. Распределение значений температуры (слева) и относительной влажности (справа) для дней с переносом пыли на аэродромах азиатской части России в период 2001–2020 гг.
Fig. 1. Temperature (left) and relative humidity (right) distribution for dust episodes at aerodromes in Asian Russia in 2001–2020.

Азиатская территория России, особенно ее восточная часть, характеризуется весьма сложной орографией. В таких условиях направление переноса пыли, попадающей на аэродром, может существенно изменяться из-за особенностей рельефа (табл. 5). Чаще всего наблюдается адвекция запыленных воздушных масс при ветрах западной четверти. Это характерно для аэродромов, расположенных к западу от Абакана, здесь «пылевые» эпизоды регистрировались при переносе с запада

и юго-запада. Для Иркутска преимущественным направлением ветра в таких случаях является северо-западное и западное, для Улан-Удэ – северо-западное и северное, для Благовещенска – южное и юго-западное.

Таблица 5. Распределение направления ветра на аэродромах азиатской части России, указанное в сводках METAP, для случаев пылевого переноса в период 2001–2020 гг.
Table 5. Wind direction from METAR reports at the aerodromes for dust events in Asian Russia in 2001–2020

№	Пункт (Аэродром)	Направление ветра, румбы								
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Переменный
1	Сургут	0	0	0	0	0	0	5	0	1
2	Екатеринбург (Кольцово)	0	0	0	0	0	2	0	0	0
3	Челябинск	0	0	6	5	1	0	14	4	0
4	Омск (Центральный)	0	0	0	0	2	3	3	0	1
5	Красноярск	0	0	0	0	0	1	12	0	0
6	Новосибирск (Толмачево)	0	0	0	0	0	6	10	0	0
7	Кемерово	0	0	0	0	0	18	0	0	0
8	Барнаул	0	0	0	0	1	8	0	0	0
9	Новокузнецк (Спиченково)	0	0	0	0	0	7	5	0	0
10	Абакан	5	0	0	0	0	20	16	0	1
11	Иркутск	1	0	0	0	1	0	10	40	1
12	Чита (Кадала)	1	0	0	0	0	0	9	13	0
13	Улан-Удэ	14	1	1	0	0	0	3	30	7
14	Благовещенск	9	0	0	0	25	13	0	0	0
15	Хабаровск (Новый)	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Сумма		30	1	7	5	30	79	87	87	11

3. Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части России

В данном разделе представлен краткий анализ для шести эпизодов пыльных бурь, зарегистрированных на аэродромах Иркутск, Омск, Абакан и Благовещенск в период 2001–2020 гг. Иллюстрации суточного хода метеоэлементов (округленных до целых значений) по данным сообщений METAP были дополнены 48-часовыми обратными траекториями частиц, построенными для срока, максимально близкого к моменту регистрации пыльной бури на аэродроме (обозначенного на рисунках звездочкой). Мониторинг движения частиц производился на высотах в слое 0–500 м

над уровнем земли. В отсутствие необходимого синоптического материала (микрокольцевых карт и пр.), не вдаваясь в подробности синоптического анализа, обратим внимание на регионы возможного источника пыли, обусловившей понижение видимости на аэродроме до значений ниже 1000 м, и на взаимосвязь видимости с динамикой других параметров атмосферы по данным METAP. Аэродром Иркутск является лидером по числу подобных эпизодов – они отмечались трижды за 20-летний период: 5 мая 2007 г., 17 апреля 2012 г. и 9 мая 2016 г.

Аэродром Иркутск, 5 мая 2007 г.

Ухудшение видимости на аэродроме наблюдалось с 11 ч ВСВ (рис. 2а), когда в течение часа ее значения понизились с 10 км до 700 м. Перед регистрацией факта пыльной бури в 12 ч ВСВ довольно длительное время господствовали ветры южного направления, приносившие с территории Монголии (рис. 2в) запыленную воздушную массу с температурой до 29 °С (рис. 2б) и относительной влажностью, понижающейся почти до 10 %. Минимальная видимость была отмечена в тот момент, когда давление уже начало повышаться (с 995 до 1000 гПа), а влажность резко выросла, хотя и не превысила 50 %. В сводках об осадках ничего не сообщалось. Очевидно, что пыльная буря была зафиксирована на фоне прохождения сухого холодного фронта, которое отмечалось резким усилением (с 4 до 16 м/с, порывы до 25 м/с) и поворотом ветра (смена направления на северо-западное). Температура воздуха в течение 2 ч (с 10 до 12 ч ВСВ) опустилась на 11 °С и далее продолжила понижаться.

Аэродром Иркутск, 17 апреля 2012 г.

Этот эпизод во многом похож на предыдущий. Здесь также наблюдается прохождение холодного фронта непосредственно перед фактом регистрации пыльной бури (рис. 3 а,б), сопровождающееся изменением направления ветра с южного на северо-западное и сменой воздушной массы (с ростом значений относительной влажности с 20 до 100 % и понижением температуры на полтора десятка градусов). Отметим, что пыльная буря на аэродроме отмечалась при видимости 1100 м в 11.30 ч ВСВ, за полчаса до регистрации минимальной видимости, когда начался упомянутый в сводках слабый ливневой дождь. Последующие скачки значений видимости также совпадали с фактом наблюдаемого ливневого дождя в сообщениях METAP. Адвекция частиц пыли осуществлялась с территории Монголии по весьма сложным петлеобразным траекториям (рис. 3в).

Аэродром Иркутск, 9 мая 2016 г.

Наблюдавшаяся в этот день пыльная буря активно упоминалась в средствах массовой информации [http://baikal-info.ru/veter-ostavil-bez-salyuta], а условия ее возникновения были проанализированы в [http://geogr.isu.ru/ru/news/docs/dust_storm.pdf]. Видимость на аэродроме

в 10.30 ч ВСВ понизилась до 900 м, ветер достигал 19 м/с с порывами до 28 м/с. Температура в период с 9 до 13 ч ВСВ понизилась с 24 до 3 °С, относительная влажность выросла с 15 до 95 %. Отличие этого эпизода от предыдущих заключается в более значительном контрасте воздушных масс (рис. 4 а,б) при прохождении более глубокого холодного фронта, а также в регионе источника пыли: траекторный анализ показывает, что это могли быть районы северо-восточного Казахстана и Прибалхашья (рис. 4в).

Аэродром Абакан, 14 мая 2006 г.

Для эпизода этой пыльной бури, зарегистрированной на аэродроме в 8.30 и 9.00 ч ВСВ, когда видимость в течение получаса снизилась с 10000 до 900 м, также характерна смена воздушных масс (рис. 5 а,б), поступавших на этот раз из районов северо-западного Китая (рис. 5в). При этом контрасты температуры и влажности на холодном фронте были не столь велики. Направление ветра у земли, хотя и изменилось, еще в течение 10 ч сохраняло южную составляющую – до тех пор, пока не подошел следующий холодный фронт со слабыми ливневыми дождями, видимость в которых уменьшилась не столь значительно (до 5000 м).

Аэродром Омск, 18 июня 2009 г.

Данный эпизод пыльной бури, когда в 13.30 ч ВСВ видимость на аэродроме снизилась до 700 м (рис. 6а), отличается от описанных выше прежде всего относительно слабыми скоростями ветра (7–12 м/с). В период с 12 до 14 ч ВСВ наблюдалось уменьшение значений температуры на 10 °С и увеличение значений влажности с 35 до 80 % (рис. 6 а,б). Последующие, хотя и не столь существенные изменения видимости были обусловлены грозами с дождем, отмеченными в сводках METAP. Траекторный анализ показывает, что потенциальным источником пыли могли быть области северного Казахстана (рис. 6в).

Аэродром Благовещенск, 4 мая 2017 г.

На аэродроме с 2 до 12 ч ВСВ (11–21 ч местного времени) наблюдатели фиксировали «мглу» (HZ). В данном эпизоде, в отличие от других, видимость снижалась постепенно в течение 3,5 ч и достигла минимума (900 м) к 5.30 ч ВСВ (рис. 7а). Скорость ветра в этот период не превышала 9 м/с (порывы до 15 м/с). Ход значений относительной влажности был таким же плавным, как и видимости, с минимумом около 12 %. На этот раз адвекция пыли осуществлялась над протяженной территорией пустыни Гоби: траектории частиц пролегали вблизи южной границы Монголии и над северо-западом Китая (рис. 7в). По окончании мглы воздух остался довольно сухим (RH~50 %), поскольку сохранялась южная составляющая переноса.

а)

б)

в)

Рис. 2. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Иркутск в течение суток (ВСВ) 5 мая 2007 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 0 м (красная) и 100 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 2. The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Irkutsk aerodrome during the day on May 5, 2007 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 0 (red) m and 100 m (blue) AGL (в).

а)

б)

в)

Рис. 3. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Иркутск в течение суток (ВСВ) 17 апреля 2012 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 0 м (красная) и 100 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 3. The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Irkutsk aerodrome during the day on April 17, 2012 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 0 (red) m and 100 m (blue) AGL (в).

а)

б)

в)

Рис. 4. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Иркутск в течение суток (ВСВ) 9 мая 2016 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 100 м (красная) и 500 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 4. The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Irkutsk aerodrome during the day on May 9, 2016 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 100 (red) m and 500 m (blue) AGL (в).

а)

б)

в)

Рис. 5. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Абакан в течение суток (ВСВ) 14 мая 2006 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 0 м (красная) и 100 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 5. The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Abakan aerodrome during the day on May 14, 2006 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 0 (red) m and 100 m (blue) AGL (в).

а)

б)

в)

Рис. 6. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Омск в течение суток (ВСВ) 18 июня 2009 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 0 м (красная) и 100 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 6 The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Omsk aerodrome during the day on June 18, 2009 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 0 (red) m and 100 m (blue) AGL (в).

а)

б)

в)

Рис. 7. Ход относительной влажности, видимости, ветра (а), давления и температуры (б) на аэродроме Благовещенск в течение суток (ВСВ) 4 мая 2017 г. Траектории частиц, пришедших в течение 48 ч на станцию на высоту 0 м (красная) и 100 м (синяя) над уровнем земли (в).

Fig. 7. The course of the relative humidity, visibility, wind (a), pressure and temperature (б) at the Blagoveshchensk aerodrome during the day on May 4, 2017 (UTC). The 48-hour backward trajectories of particles arriving at the station at an altitude of 0 (red) m and 100 m (blue) AGL (в).

Заключение

Хотя пыльные бури могут представлять ощутимую опасность для авиации, на аэродромах Российской Федерации, к счастью, их повторяемость крайне мала. Это было установлено ранее для аэродромов в европейской части России [2] и подтверждено настоящим исследованием, содержащим анализ данных METAR за 2001–2020 гг. для аэродромов, расположенных в азиатской части страны.

Эпизоды ухудшения видимости, связанные с переносом пыли, были выявлены на 15 из 26 исследуемых аэродромов. Повторяемость таких эпизодов невелика, ее максимальные значения отмечались на аэродромах Иркутск (0,015 %), Улан-Удэ (0,017 %) и Благовещенск (0,018 %).

80 % подобных эпизодов регистрируется в апреле–июне, максимум приходится на май. Значения температуры при этом находятся в диапазоне от 10 до 25 °С в 74 % случаев, относительная влажность чаще всего не превышает 50 %. Направление ветра для таких эпизодов корректируется рельефом и отличается на разных станциях. Увеличение повторяемости эпизодов переноса пыли за последние 5 лет было отмечено только на аэродроме Улан-Удэ.

Тщательный анализ данных аэродромных наблюдений позволил установить, что наблюдатели часто кодируют как пыльные бури явления, которые таковыми не являются. Фактически случаев пылевого переноса, достигающих интенсивности пыльной бури, крайне мало.

Проведенный в работе анализ позволил установить, что за последние 20 лет на аэродромах азиатской части страны не было отмечено ни одного случая, который соответствовал бы определению умеренной или сильной пыльной бури [3]. В то же время на аэродромах Иркутск, Омск, Абакан и Благовещенск было зарегистрировано 6 эпизодов пыльных бурь слабой интенсивности, сопровождавшихся падением значений видимости до 700–1000 м в течение короткого времени (в 5 из 6 случаев подобные значения отмечались в единственной получасовой сводке). Источниками пыли были сухие территории южных соседей России – север Казахстана, север Китая и Монголия. Минимум видимости, как правило, отмечался в условиях прохождения атмосферного фронта, в момент резкой смены воздушных масс.

Список литературы

1. *Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Цыдыпов В.В., Бальжанов Т.С., Оюнчимэг Д.* Оценка воздействия атмосферных примесей на окружающую природную среду пустыни Гоби в условиях промышленного развития Монголии // Вестник БНЦ СО РАН. 2013. № 2 (10). С. 229-246.

2. *Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И., Завьялова А.А.* Влияние пыльных и песчаных бурь на работу авиационного транспорта и оценка условий их возникновения на аэродромах европейской части России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. №4 (378). С. 78-95.

3. Инструктивный материал по кодам METAR, SPECI, TAF: Утвержден приказом Росгидромета № 115 от 05.03.2015 г.

4. *Кондратьев И.И., Скалыша О.О.* Трансграничный перенос цезия-137 с терригенной пылью азиатских пустынь на юг Дальнего востока // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 32-38.

5. *Кохжаметов П.С., Кохжаметова Э.П.* Экстремальные метеорологические явления в Казахстане в условиях глобального потепления климата // Гидрометеорология и экология. 2016. № 2. С. 7-19.

6. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации: Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО: издание девятнадцатое, июль 2016 г.

7. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. М.: Физматкнига, 2020. 448 с.

8. *Фролова Н.С., Зинченко Г.С., Папина Т.С.* Региональные атмосферные процессы и пылевое загрязнение ледника г. Белуха // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 46-49.

9. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 1976. 568 с.

10. *Чередниченко В.С., Чередниченко А.В., Чередниченко Ал.В.* Синоптическая ситуация, предшествующая пыльной буре 7 мая 2007 г. в районе Аральского моря // Гидрометеорология и экология. 2012. № 1. С. 41-57.

11. *Gong S.L., Zhang X.Y., Zhao T.L., Zhang X.B., Barrie L.A., McKendry I.G., Zhao C.S.* A Simulated Climatology of Asian Dust Aerosol and Its Trans-Pacific Transport. Part II: Interannual Variability and Climate Connections // Journal of Climate. 2006. Vol. 19, no. 1. P. 104-122.

12. *Guan Q., Sun X., Yang J., Pan B., Zhao Sh., Wang L.* Dust Storms in Northern China: Long-Term Spatiotemporal Characteristics and Climate Controls // Journal of Climate. 2017. Vol. 30, no. 9. P. 6683-6700.

13. *Li Y., Huang J., Ji M., Ran J.* Dryland Expansion in Northern China from 1948 to 2008 // Advances in Atmospheric Sciences. 2015. Vol. 32. P. 870-876.

14. *Tsunematsu N., Iwai H., Ishii Sh., Yasui M., Murayama Y., Mizutani K.* Influence of Surface-Based Stable Layer Development on Asian Dust Behaviour Over Tokyo // Boundary Layer Meteorol. 2009. Vol. 131. P. 263-275.

15. *Qian W., Quan L., Shi Sh.* Variations of the Dust Storm in China and its Climatic Control // Journal of Climate. 2002. Vol. 15, no. 5. P. 1216-1229.

16. *Seinfield J.H., Carmichael G.R., Arimoto R., Conant W.C., Brechtel F.G. et al.* ACE-Asia // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. No. 3. P. 367-380.

17. *Villiers M. P., van Heerden J.* Dust storm and dust at Abu Dabi international airport // Weather. 2007. Vol. 62, no. 12. P. 339-343.

18. *Xia X., Min J., Shen F., Wang Y., Yang C.* Aerosol data assimilation using data from Fengyun-3A and MODIS: application to a dust storm over East Asia in 2011 // Advances in Atmospheric Sciences. 2019. Vol. 36, no. 1. P. 1-14.

19. *Xin J., Do W., Wang Y., Gao X., Li Zh., Wang M.* Aerosol optical properties affected by a strong dust storm over Central and Northern China // Advances in Atmospheric Sciences. 2010. Vol. 27, no. 3. P. 562-574.

20. *Yang J., Lei H., Lu Y.* Airborne Observations of Cloud Condensation Nuclei Spectra and Aerosols over East Inner Mongolia // Advances in Atmospheric Sciences. 2017. Vol. 34, no. 8. P. 1003-1016.

21. *Zhang R., Han Zh., Shen Zh., Cao J.* Continuous Measurement of Number Concentrations and Elemental Composition of Aerosol Particles for a Dust Storm Event in Beijing // Advances in Atmospheric Sciences. 2008. Vol. 25, no. 1. P. 89-95.

22. *Zhao T.L., Gong S.L., Zhang X.Y., Blanchet J.-P., McKendry I.G., Zhou Z.J.* Simulated climatology of Asian dust aerosol and its Trans-Pacific transport // Journal of Climate. 2006. Vol. 18, no. 1. P. 88-103.

References

1. *Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Tsydypov V.V., Bal'zhanov T.S., Azzaya D., Oyunchimeg D.* The impact assessment of atmospheric pollutants on the environment of the gobi desert in the conditions of Mongolia's industrial development. *Vestnik BNC SO RAN* [*Bulletin of the BSC SB RAS*], 2013, vol. 10, no. 2, pp. 229-246. [in Russ.].

2. *Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Komasko N.I., Zavialova A.A.* Impact of dust and sand storms on the aviation operation and assessment of conditions for their occurrence at aerodromes in European Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2020, vol. 378, no. 4, pp. 78-95. [in Russ.].

3. Instruktivnyy material po kodam METAR, SPECI, TAF. (Utverzhden prikazom Rosgidrometa 05.03.2015. No. 115. [in Russ.].

4. *Kondratiev I.I., Skalyga O.R.* Atmospheric transboundary transport of cesium-137 with terrigenous dust from Asian deserts to the southern Far East. *Geography and natural resources*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 126-131. DOI: 10.1134/S1875372811020041.

5. *Kozhakhmetov P.Z., Kozhakhmetova L.P.* Extreme meteorological phenomena in the Kazakhstan in conditions of global climate warming. *Gidrometeorologiya i ekologiya,* 2016, no. 2, pp. 7-19. [in Russ.].

6. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoy aeronavigacii: Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoy grazhdanskoy aviacii. IKAO: izdanie devyatnadcatoe, iyul' 2016 g. [in Russ.].

7. *Semenov O.E.* Vvedenie v eksperimental'nuyu meteorologiyu i klimatologiyu peschanyh bur'. Moscow, Fizmatkniga, 2020, 448 p. [in Russ.].

8. *Frolova N.S., Zinchenko G.S., Papina T.S.* Regional atmospheric processes and dust pollution of the Mt. Belukha glacier. *Geography and natural resources*, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 26-29. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.03.006.

9. *Hromov S.P., Mamontova L.I.* Meteorologicheskiy slovar'. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1976, 568 p. [in Russ.].

10. *Cherednichenko V.S., Cherednichenko A.V., Cherednichenko Al.V.* Sinopticheskaya situaciya, predshestvuyushchaya pyl'noy bure 7 maya 2007 g. v rayone Aral'skogo morya. *Gidrometeorologiya i ekologiya,* 2012, no. 1, pp. 41-57. [in Russ.].

11. *Gong S.L., Zhang X.Y., Zhao T.L., Zhang X.B., Barrie L.A., McKendry I.G., Zhao C.S.* A Simulated Climatology of Asian Dust Aerosol and Its Trans-Pacific Transport. Part II: Interannual Variability and Climate Connections. *Journal of Climate,* 2006, vol. 19, no. 1, pp. 104-122.

12. *Guan Q., Sun X., Yang J., Pan B., Zhao Sh., Wang L.* Dust Storms in Northern China: Long-Term Spatiotemporal Characteristics and Climate Controls. *Journal of Climate,* 2017, vol. 30, no. 9, pp. 6683-6700.

13. *Li Y., Huang J., Ji M., Ran J.* Dryland Expansion in Northern China from 1948 to 2008. *Adv. Atmos. Sci.,* 2015, vol. 32, pp. 870-876.

14. *Tsunematsu N., Iwai H., Ishii Sh., Yasui M., Murayama Y., Mizutani K.* Influence of Surface-Based Stable Layer Development on Asian Dust Behaviour Over Tokyo. *Boundary Layer Meteorol*., 2009, vol. 131, pp. 263-275.

15. *Qian W., Quan L., Shi Sh.* Variations of the Dust Storm in China and its Climatic Control. *Journal of Climate*, 2002, vol. 15, no. 5, pp. 1216-1229.

16. *Seinfield J.H., Carmichael G.R., Arimoto R., Conant W.C., Brechtel F.G. et al.* ACE-Asia. *Bull. Amer. Meteorol. Soc*., 2004, no. 3, pp. 367-380.

17. *Villiers M. P., van Heerden J.* Dust storm and dust at Abu Dabi international airport. *Weather,* 2007, vol. 62, no.12, pp. 339-343.

18. *Xia X., Min J., Shen F., Wang Y., Yang C.* Aerosol data assimilation using data from Fengyun-3A and MODIS: application to a dust storm over East Asia in 2011. *Adv. Atmos. Sci*, 2019, vol. 36, no. 1, pp. 1-14.

19. *Xin J., Do W., Wang Y., Gao X., Li Zh., Wang M.* Aerosol optical properties affected by a strong dust storm over Central and Northern China. *Adv. Atmos. Sci.,* 2010, vol. 27, no. 3, pp. 562-574.

20. *Yang J., Lei H., Lu Y.* Airborne Observations of Cloud Condensation Nuclei Spectra and Aerosols over East Inner Mongolia. *Adv. Atmos. Sci.,* 2017, vol. 34, no. 8, pp. 1003-1016.

21. *Zhang R., Han Zh., Shen Zh., Cao J.* Continuous Measurement of Number Concentrations and Elemental Composition of Aerosol Particles for a Dust Storm Event in Beijing. *Adv. Atmos. Sci.,* 2008, vol. 25, no. 1, pp. 89-95.

22. *Zhao T.L., Gong S.L., Zhang X.Y., Blanchet J.-P., McKendry I.G., Zhou Z.J.* Simulated climatology of Asian dust aerosol and its Trans-Pacific transport. *Journal of Climate,* 2006, vol. 18, no. 1, pp. 88-103.

Поступила 17.05.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021
Submitted 17.05.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-43-51
УДК 551.509.324.2:519.24

Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май-сентябрь) 2016-2020 гг. по модели COSMO-Ru2

В.З. Кисельникова

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

Приведены результаты объектно-ориентированных оценок прогноза накопленных за 6 часов осадков по модели COSMO-Ru2 за теплые периоды (май-сентябрь) 2016–2020 гг. Область прогноза соответствует Центральному федеральному округу Российской Федерации. Оценки разбиты на две части (2016–2019 гг. и 2020 г.), существенно различающиеся числом (8 и 12) учитываемых локаторов. Параметры оценки второго периода заметно лучше соответствующих параметров оценки первого периода.

Ключевые слова: объектно-ориентированная оценка, прогноз накопленных осадков, модель COSMO-Ru2, теплый период, Центральный федеральный округ Российской Федерации

Object-oriented assessment of COSMO-Ru2 precipitation forecast quality for the warm season (May-September) in 2016-2020

V.Z. Kiselnikova

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

The results of the object-based verification of COSMO-Ru2 6-hour total precipitation forecasts for warm season (May-September) during 2016-2020 are given. The forecast domain corresponds to the Central Federal District of the Russian Federation. The estimates are divided into two parts (2016-2019 and 2020) essentially differing in the number (8 and 12) of weather radars that are taken in to account. The estimates parameters for the second period were significantly better than the respective parameters for the first period.

Keywords: object-based verification, total precipitation forecast, COSMO-Ru2, warm season, Central Federal District

Один из распространенных методов оценки успешности прогноза пространственного положения исследуемых погодных явлений [8] – объектно-ориентированная оценка прогнозов [1–4, 6, 7] – будет использован

здесь для сравнительной оценки качества рассчитанных по модели COSMO-Ru2 [5] прогнозов накопленных осадков за теплые периоды (май–сентябрь) 2016–2019 гг. и 2020 года.

Приведенная на рис. 1 область прогноза – криволинейная трапеция с угловыми точками ~ (50,399° с. ш., 30,305° в. д.; 59,753° с. ш., 29,058° в. д.; 59,472° с. ш., 45,597° в. д.; 50,170° с. ш., 43,397° в. д.) охватывает территорию Центрального федерального округа (ЦФО) Российской Федерации.

Рис. 1. Закрашенная область включает ЦФО и соответствует одной из подобластей интегрирования используемой в Гидрометцентре России модели COSMO-Ru2.
Fig. 1. Green painted area contains Central Federal District of Russia and corresponds to one part of global area of COSMO-Ru2 model that used in HMC RF.

Реализация метода объектно-ориентированной оценки прогнозов требует определения в прогностических и построенных по данным локаторов полях осадков объектов простой структуры. Для этого используются процедуры сглаживания и порогового отсечения.

Сглаживание сводится к замене значений указанных полей в данной точке сетки модели средними значениями по точкам сетки, оказавшимися внутри окружности с центром в данной точке. Радиус окружности равен нескольким интервалам сетки и задается заранее.

Пороговое отсечение выделяет зоны осадков в соответствии с заранее заданными порогами. Точки сетки, где осадки превышают такой порог, отмечаются единицей, остальные – нулями.

Для формируемых таким образом объектов определяются их параметры: размер, площадь, координаты центра тяжести (ЦТ) и интенсивность осадков в этом центре.

На рис. 2 приведен пример перехода от прогностических и наблюденных полей к соответствующим объектам. Интервал накопления осадков от 6 до 12 часов 8 мая 2020 года. Верхняя панель: слева – прогностическая карта с изолиниями через 1 мм, максимальное значение 67,8 мм; справа – карта по данным локаторов с изолиниями через 0,5 мм, максимальное значение 10,5 мм. Нижняя панель: – соответствующие объекты для порога 3 мм.

Рис. 2. Пример перехода от прогностических и наблюденных полей осадков к соответствующим объектам. Сверху слева: прогностическая карта накопленных 8мая 2020 в интервале 6–12 ч осадков; справа: карта накопленных за тот же срок осадков по данным локаторов. Снизу: соответствующие объекты, определенные для порога 3мм.
Fig. 2. Example of transition from forecasted and locators precipitation fields to correspondent objects. Above left picture: forecasted field and above right picture: locator field of accumulated at 6-12h 8 May 2020 precipitattion. Below: corresponddent objects for 3mm threshold.

Использованные данные и организация расчетов

Прогностические поля количества осадков по региональной мезомасштабной модели COSMO-Ru2 [5] при начальных данных за 00 ч ВСВ по территории Центрального федерального округа считывались из базы СМС2 Гидрометцентра России. Размер сетки модели 420×470 узлов с шагом 2,2 км. По ежечасным данным определялись поля суммарных осадков за 6-часовые интервалы (00–06, 06–12, 12–18,18–24 ч) и сопоставлялись

с соответствующими полями осадков, полученными с помощью измерений допплеровскими метеорологическими радиолокаторами (ДМРЛ-С), интерполированными на сетку прогностической модели. Эти интерполированные радарные поля называются далее “наблюденными” полями. При построении радарных полей для теплых периодов 2016–2019 гг. использовались данные 7–8 локаторов, а для лета 2020 г. стало возможным увеличить число локаторов до 12. Данные наблюдений радиолокаторов ДМРС-С поступали из Центральной аэрологической обсерватории.

При выделении объектов в 2016–2019 гг. задавались пороги, равные 5 мм/6ч, 10 мм/6ч, 15 мм/6ч, а для объектов 2020 г. добавлен порог 3 мм/6ч.

Процедура сглаживания сводится к осреднению по точкам круга радиусом двух сеточных интервалов модели.

Результаты объектно-ориентированной оценки

Следующие параметры выделенных в прогностических и наблюденных полях объектов являются исходными для проведения расчетов оценки: их площадь, размер, координаты центра тяжести (центроид) и интенсивность осадков в этом центре. Объекты с площадью менее 25 точек сетки исключались из анализа.

Координаты центра тяжести определяются формулами $x=\sum P_i x_i/\sum P_i$; $y=\sum P_i y_i/\sum P_i$, где P_i – количество осадков в мм/6ч в точке сетки модели (суммирование по точкам сетки объекта).

Были приняты три категории оправдавшихся прогнозов. Прогноз объекта принадлежит к первой категории, когда расстояние D между центрами тяжести прогностического и соответствующего наблюденного объектов оказалось меньше или равно 50 км, ко второй – меньше или равно 100 км, и к третьей – меньше или равно $S = A_{\mathrm{mod}}^{1/2}+A_{rad}^{1/2}$, где A_{mod} и A_{rad} – площади прогностического и наблюденного объектов соответственно.

Результаты объектно-ориентированной оценки за теплые периоды 2016–2019 гг. приведены в табл. 1, 2020 г. – в табл. 2. В каждой категории синонимами являются определения “совпадающие” и “оправдавшиеся”; пропуском объекта называется случай его отстутствия в прогнозе при наличии его наблюдения; ложная тревога – случай прогноза объекта при его отсутствии в наблюдении. В таблицах использованы следующие обозначения:

NH – число совпадающих объектов (hit number);

NM – число пропусков прогностических объектов (miss number);

NF – число объектов ложной тревоги (false alarm number);

NN=NH+NM+NF;

CSI = NH/ NN – индекс критического успеха (critical success index);

PM=NM/ NN – доля пропусков прогнозов;

PF=NF/ NN – доля ложных тревог;

Pc – доля случаев, когда оправдавшийся прогностический объект по площади больше наблюденного по локатору;

Da – отношение суммы площадей прогностических объектов к сумме площадей соответствующих (спаренных) наблюденных объектов. Устанавливаемое соответствие взаимно однозначно. Площади неспаренных объектов не участвуют в расчетах Da;

S= $\sqrt{A_{\text{mod}}} + \sqrt{A_{rad}}$, где A_{mod} и A_{rad} – площади прогностического и соответствующего наблюденного объектов соответственно;

Pr – интенсивность осадков в мм/6ч в ЦТ оправдавшихся прогностических объектов;

Pl – интенсивность осадков в мм/6ч в ЦТ соответствующих радиолокационных объектов.

Таблица 1. Результаты объектно-ориентированной оценки прогноза количества накопленных за 6-часовые интервалы осадков для градаций 5 мм, 10 мм и 15 мм по модели COSMO-Ru2 за май-сентябрь 2016-2019 гг.
Table 1. Object-oriented verification table of COSMO-Ru2 forecasted precipitation, accumulated at 6h intervals, for periods May-September 2016-2019 for thresholds 5mm, 10mm, 15mm

Оценки прогноза	Расстояние между ЦТ, км		
	D≤50	D≤100	D≤S
Количество накопленных осадков ≥5 мм/6ч			
CSI	0,06	0,18	0,26
PM	0,31	0,23	0,17
PF	0,63	0,59	0,57
NH	252	686	924
NM	950	847	609
NF	2648	2226	2031
Pc	0,44	0,51	0,64
Da	1,5	1,9	3,9
Pr	8,7	8,7	9,2
Pl	6,8	6,8	6,9
Количество накопленных осадков ≥10 мм/6ч			
CSI	0,04	0,10	0,12
PM	0,20	0,16	0,14
PF	0,76	0,74	0,74
NH	84	198	231
NM	426	312	279
NF	1612	1500	1473
Pc	0,52	0,58	0,70
Da	1,9	2,1	3,6
Pr	16,3	15,7	16,1
Pl	12,6	12,5	12,7

Количество накопленных осадков ≥15 мм/6ч			
CSI	0,02	0,05	0,05
PM	0,13	0,11	0,10
PF	0,85	0,84	0,85
NH	24	51	56
NM	135	108	104
NF	891	864	861
Pc	0,71	0,59	0,65
Da	2,4	1,9	2,3
Pr	22,0	21,9	22,5
Pl	17,9	18,4	18,8

Таблица 2. Результаты объектно-ориентированной оценки прогноза количества накопленных за 6-часовые интервалы осадков для градаций 3 мм, 5 мм, 10 мм и 15 мм по модели COSMO-Ru2 за май-сентябрь 2020 г.
Table 2. Object-oriented verification table of COSMO-Ru2 forecasted precipitation, accumulated at 6h intervals, for periods May-September 2020 for thresholds 3 mm, 5mm, 10mm, 15mm

Оценки прогноза	Расстояние между ЦТ, км		
	D≤50	D≤100	D≤S
Количество накопленных осадков ≥3 мм/6ч			
CSI	0,13	0,34	0,44
PM	0,68	0,53	0,45
PF	0,19	0,14	0,11
NH	682	1658	2105
NM	3588	2612	2185
NF	1043	672	538
Pc	5313	4942	4828
Da	0,45	0,49	0,62
Pr	0,8	0,91	2,31
Pl	5,8	5,9	6,6
Количество накопленных осадков ≥5 мм/6ч			
CSI	0,13	0,34	0,40
PM	0,68	0,52	0,49
PF	0,19	0,13	0,12
NH	534	1357	1548
NM	2889	2066	1896
NF	815	529	461
Pc	4238	3952	3905
Da	0,45	0,48	0,59
Pr	0,93	1,04	2,26
Pl	8,8	8,8	9,5

Количество накопленных осадков ≥10 мм/6ч			
CSI	0,13	0,31	0,28
PM	0,68	0,54	0,57
PF	0,19	0,15	0,15
NH	301	703	639
NM	1610	1208	1283
NF	456	330	330
Pc	2367	2241	2252
Da	0,46	0,50	0,57
Pr	0,92	1,18	1,66
Pl	15,8	15,9	16,2
Количество накопленных осадков ≥15 мм/6ч			
CSI	0,11	0,26	0,21
PM	0,69	0,57	0,61
PF	0,20	0,17	0,17
NH	139	324	270
NM	902	717	779
NF	265	211	221
Pc	1306	1252	1270
Da	0,47	0,50	0,56
Pr	1,03	1,18	1,79
Pl	22,7	23,2	23,4

Заключение

Из приведенных в таблицах результатов следует, что некоторые параметры объектно-ориентированной оценки прогнозов по данным 2020 г. улучшились по сравнению с параметрами оценок за 2016–2019 гг. Индекс критического успеха, равного доле оправдавшихся прогнозов, по данным 2020 г составил 0,13 для критерия $D \leq 50$ км и 0,44 для критерия $D \leq A_{\mathrm{mod}}^{1/2} + A_{rad}^{1/2}$ Эти значения CSI в 1,5–2 раза превышают значения аналогичного индекса по данным теплого периода 2016–2019 гг. По сравнению с оценками периода 2016–2019 гг. уменьшилась доля ложных тревог при возросшей доле пропущенных объектов. В 2020 г. отношение Da площадей совпадающих прогностических объектов и радиолокационных объектов для классов $D \leq 50$ км и $D \leq 100$ км меняется от 0,80 до 1,18, а для $D \leq A_{\mathrm{mod}}^{1/2} + A_{rad}^{1/2}$ достигает 2,31. Отметим, что 6-часовые осадки в центрах тяжести совпадающих прогностических и наблюденных объектов различаются на 0,3–1,6 мм. В 2016–2019 гг. (табл. 1) площади прогностических объектов значительно превышали площади радарных объектов: Da изменялось от 1,5 до 3,9, а интенсивности 6-часовых осадков Pr и Pl различались на 1,9–4,1 мм.

Увеличение доли оправдавшихся прогнозов и другие положительные изменения в параметрах оценки по данным 2020 г. могут быть связаны как с большей реалистичностью наблюдаемого поля, построенного по данным более плотной сети радаров, так и с совершенствованием прогностической модели. По-видимому, основная причина улучшения метода объектно-ориентированной оценки прогнозов состоит в уточнении параметров наблюденных объектов, так как заметное увеличение числа покрывающих область прогноза локаторов (в 1.5 раза) существенно при построении объединенной карты локаторных данных. Отсутствие данных какого-либо радара компенсируется данными радара, близкого к нему, а при наличии данных нескольких локаторов можно построить наилучшее приближение.

Использование объектно-ориентированной оценки в Гидрометцентре России инициировано Н.Ф. Вельтищевым для оценки модели WRF; данные радаров упорядочены и декодированы программой В.Д. Жупанова, после чего интерполированы на сетку прогностической модели COSMO-Ru2 программой Д.Я. Прессмана При подготовке рисунков применен пакет программ ISOGRAPH Ю.В. Алферова.

Список литературы

1. *Вельтищев Н Ф., Жупанов В.Д.* Эксперименты по усвоению радиолокационной отражаемости в моделях WRF-AFW // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 5-19.

2. *Кисельникова В.З.* Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 5-10.

3. *Кисельникова В.З.* Результаты объектно-ориентированной оценки качества прогнозов осадков по мезомасштабной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 34-42.

4. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.* Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода (май-сентябрь 2017) // Гидрологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 6-38.

5. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др.* Система COSMO-Ru негидростатического прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-71.

6. *Bullock B., Brown B., Rowler T.* Method for object-based evaluation // NCAR/TN-532+STR. NCAR. 2016. http://library.ucar.edu/research/publish-technote

7. *Davis C.A., Brown B., Bullock R.* Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems // Mon. Wea. Rev. 2006. Vol. 134, no. 7. P. 1785-1795.

8. *Gilleland E., Ahijevch D., Brown B., Casati B., Ebert E.* Intercomparison of spatial forecast verification methods // Weather and Forecasting. 2009. vol. 24, no. 5. P. 1416-1430.

References

1. *Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D.* Experiments on the radar reflectivity data assimilation in the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 149-158. DOI: 10.3103/S1068373912030016.

2. *Kisel'nikova V.Z.* Object-based evaluation of precipitation forecast quality. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 3, pp. 217–221. DOI: 10.3103/S1068373913040018.

3. *Kisel'nikova V.Z.* The results of object-oriented estimation of precipitation forecast quality using the mesoscale model of the Hydrometcentre of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2014, vol. 351, pp. 34-42 [in Russ.].

4. *Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V.* Operational precipitation nowcasting system based on radar data and verification results for the warm period of the year (May-September 2017). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2018, vol. 367, no. 1, pp. 6-38 [in Russ.].

5. *Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M. M.* The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2015, vol. 40, no. 6, pp 400-410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.

6. *Bullock B., Brown B., Rowler T.* Method for object-based evaluation // NCAR/TN-532+STR. NCAR. 2016. Available at: http://library.ucar.edu/research /publish-technote.

7. *Davis C.A., Brown B., Bullock R.* Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems. *Mon. Wea. Rev.,* 2006, vol. 134, no. 7, pp. 1785-1795.

8. *Gilleland E., Ahijevch D., Brown B., Casati B., Ebert E.* Intercomparison of spatial forecast verification methods. *Weather and Forecasting*, 2009, vol. 24, no. 5, pp. 1416-1430.

Поступила 22.04.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 22.04.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-52-65
УДК 551.513

Решение задачи оптимального управления рассеянием тумана

В.В. Клёмин, С.С. Суворов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматривается возможность применения одного из основополагающих современных методов оптимизации, а именно метода Понтрягина, при решении задач управления процессами, поведение которых описывается диффузионным уравнением. Диффузионное уравнение, относящееся к параболическому классу, дискретизируется методом прямых и сводится к замкнутой системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая позволяет отыскать оптимальное по быстродействию управляющее воздействие.

Доказано существование решения задачи оптимального управления рассеянием тумана при упомянутой дискретизации. Обоснована методика отыскания моментов переключения управляющего воздействия и выполнены расчеты для установленных двух и трех моментов переключения.

Ключевые слова: метод Понтрягина, управление рассеянием тумана, диффузионное уравнение

Solving the problem of optimal control of fog diffusion

V.V. Klyomin, S.S. Suvorov

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

The paper discusses a possibility of applying one of the fundamental modern optimization methods, namely, the Pontryagin's method for solving process control problems, whose behavior is described by the diffusion equation.

The parabolic diffusion equation is discretized by the method of straight lines and comes to a closed system of ordinary differential equations, which allow finding an optimal control impact in terms of operating speed.

The existence of a solution to the problem of optimal control of fog diffusion is proved for the mentioned sampling. The methodology for finding control action switching points is substantiated, the calculations for the revealed two and three switching moments are performed.

Keywords: Pontryagin's method, fog diffusion control, diffusion equation

Введение

В статьях [5] и [6] изложены основы применения классической теории оптимального управления системами с распределёнными параметрами (вариационного исчисления) к решению задачи искусственного стационирования волн Россби.

В предлагаемой статье рассматривается возможность применения одного из основополагающих современных методов оптимизации, а именно метода Понтрягина [10], при решении задач управления процессами, поведение которых описывается диффузионным уравнением. В частности, такими задачами являются управление распространением примесей в жидких и газообразных средах, управление рассеянием тумана, управление климатом путем создания условий таяния значительных массивов льда. Ниже, на примере задачи управления рассеянием тумана, приводится ее решение.

1. Модель эволюции тумана и слоистообразующей облачности

Математической моделью процессов образования и рассеяния тумана является замкнутая система уравнений притока тепла и влаги в турбулентной атмосфере [3, 8]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{d\Theta}{\partial z} + \frac{Lm}{c_p \rho}, \qquad (1.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial S}{\partial z} - \frac{m}{\rho}. \qquad (1.2)$$

Здесь z — вертикальная координата; Θ — потенциальная температура; S — массовая доля водяного пара; m — скорость конденсации водяного пара; k — коэффициент турбулентности; L — удельная теплота парообразования; c_p — теплоемкость; ρ — плотность.

Прямой метод решения полной системы уравнений переноса тепла и влаги (1.1), (1.2) сопряжен с большими трудностями. В [8] указывается, что основной физической предпосылкой упрощения модели служит представление о достаточно полном увлечении относительно малых влагообразных элементов облачности и тумана частицами воздуха, которые участвуют в турбулентном обмене. Уравнение переноса водности при полном увлечении облачных элементов имеет вид

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \delta}{\partial z} + \frac{m}{\rho}, \qquad (1.3)$$

где δ — удельная водность облака.

Под удельным влагосодержанием $\tilde{S}$ будем понимать массу водяного пара, капель воды и кристаллов льда в единичной массе воздуха. То есть

$$\tilde{S} = S + \delta \qquad (1.4)$$

Сложив уравнения (1.2) и (1.3) и раскрывая полную производную с помощью оператора Эйлера, получим

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{S}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{S}}{\partial y} + w \frac{\partial \tilde{S}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \tilde{S}}{\partial z} \qquad (1.5)$$

Умножим уравнение (1.2) на L/c_p и сложим с (1.1). Получим:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} + u\frac{\partial \Pi}{\partial x} + v\frac{\partial \Pi}{\partial y} + w\frac{\partial \Pi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial \Pi}{\partial z}. \qquad (1.6)$$

Здесь через П обозначена функция

$$\Pi(x,y,z,t) = \Theta(x,y,z,t) + \frac{L}{c_p}S(x,y,z,t). \qquad (1.7)$$

Граничные условия для уравнений (1.5) и (1.6) задаются в виде потоков тепла и влаги, которые определяются в первую очередь разностью температур воздуха и подстилающей поверхности.

Предположим, что моделируется туман над сушей на значительном удалении от водной поверхности. Тогда можно пренебречь притоком влаги от подстилающей поверхности, а также горизонтальными градиентами температуры и влагосодержания [3]. Если при этом отсутствуют упорядоченные вертикальные движения, то распределение удельного влагосодержания с высотой будет стационарным, т. е. $\tilde{S}$ будет заданной функцией высоты z.

Уравнение (1.6) при сделанных предположениях примет вид:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial \Pi}{\partial z}. \qquad (1.8)$$

Будем для простоты считать, что коэффициент турбулентности не зависит от высоты. Тогда получаем

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = k\frac{\partial^2 \Pi}{\partial z^2}. \qquad (1.9)$$

Так как в тумане удельная влажность S является насыщающей, т. е. определяется температурой T, при неизменном давлении p функция П однозначно определяется температурой воздуха T.

Пусть в начальный момент времени распределение по высоте удельной влажности и водности известно, удельное влагосодержание стационарно. Можно вычислить такое распределение температуры по высоте, при котором удельная водность будет равна нулю. Это будет условием рассеяния тумана. Достижение соответствующего распределения температуры может быть целью управления.

Таким образом, задача оптимального по быстродействию управления рассеянием тумана или слоистообразной облачности может быть сформулирована следующим образом:

За минимальное время путем воздействия на температуру воздуха вблизи подстилающей поверхности распределение температуры воздуха с высотой из заданного начального перевести в требуемое для рассеяния влагообразных облачных элементов (капель или кристаллов льда)

распределение, т. е. $T(0,z) \to T(t_{min},z)$, где t_{min} – минимальное время рассеяния тумана.

2. Постановка задачи оптимального управления

Рассмотрим задачу оптимального по быстродействию управления системой, которая описывается широко распространенным одномерным диффузионным уравнением (или уравнением теплопроводности):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = a\frac{\partial^2 q}{\partial z^2}\,. \qquad (2.1)$$

Здесь состояние системы описывается функцией распределения

$$q = q(z,t), \qquad (2.2)$$

где z – пространственная координата (в нашем случае – высота над подстилающей поверхностью), $0 \leqslant z \leqslant H$; t – временная координата, $0 \leqslant t \leqslant T$.

В уравнении теплопроводности (2.1) приняты следующие обозначения:

a – постоянный коэффициент температуропроводности,

$a = \dfrac{\lambda}{c_p\rho}$,

λ – коэффициент теплопроводности;

c_p – удельная теплоемкость;

ρ – плотность.

Для q задано начальное распределение.

Пусть управление $u(z,t)$ осуществляется на нижней границе слоя $0 \leqslant z \leqslant H$. Тогда краевые и начальные условия будут иметь вид

$$-\lambda\frac{\partial q}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \alpha_1[u\,(0,t) - q(0,t)]\,, \qquad (2.3)$$

$$-\lambda\frac{\partial q}{\partial z}\bigg|_{z=H} = \alpha_2[q(H,t) - f]\,, \qquad (2.4)$$

$$q(z,0) = q_0(z)\,. \qquad (2.5)$$

Здесь $q\,(z,t)$ – известная функция; α_1 – коэффициент теплообмена на нижней границе рассматриваемого слоя; α_2 – коэффициент теплообмена на верхней границе слоя; $u(0,t)$ – управляющее воздействие на нижней границе слоя, которое в дальнейшем обозначено $u(t)$; f – известная постоянная величина, которая определяет отток тепла на верхней границе, необходимый для существования решения краевой задачи. Управляющее воздействие $u(t)$, как видно, приложено к нижней границе системы.

Задачу оптимального управления в этом случае можно сформулировать следующим образом.

Пусть задана некоторая функция $q^*(z), 0 \leqslant z \leqslant H$, характеризующая требуемое состояние системы. Нужно найти такое допустимое управляющее воздействие $u = u(t), 0 \leqslant t \leqslant T$, удовлетворяющее условию $|u| \leqslant l$ (l –известная постоянная величина), чтобы управляемая система, описываемая уравнениями (2.1) – (2.5) перешла из начального состояния, описываемого функцией $q_0(z)$ (2.5) в требуемое состояние $q^*(z)$ за минимальное время T. Используя термины теории оптимального управления, говорят, что нужно минимизировать функционал I, где

$$I \equiv \int_0^{\tau} dt = \tau .$$

3. Методика решения задачи

3.1. Дискретизация математической задачи

Для решения сформулированной в п.2 задачи оптимального по быстродействию управления проведем дискретизацию, заменив с помощью метода прямых дифференциальное уравнение в частных производных (2.1) системой обыкновенных дифференциальных уравнений (см. рис. 1). При этом для разностного представления производных по z в крайних интервалах $0 \div 1$ и $n - 1 \div 1$ используем направленные разности.

Рис. 1. Дискретизация системы с распределенными параметрами.
Fig. 1. Discretization of a distributed system.

Во внутренних точках $i = 2, 3, \dots, n-1$ применим формулу центральных разностей. В итоге получим

$$
\begin{aligned}
&q_0 = \frac{\beta_1}{2+\beta_1} U + \frac{2}{2+\beta_1} q_1, \\
&\frac{dq_1}{d\tau} = 2q_0 - 3q_1 + q_2, \\
&\frac{dq_i}{d\tau} = q_{i-1} - 2q_i + 2q_{n+1}, \qquad i = 2,3, \dots, n-1 \\
&\frac{dq_n}{d\tau} = q_{n-1} - 3q_n + 2q_{n+1}, \qquad (3.1) \\
&q_{n+1} = \frac{2}{2+\beta_2} q_n + \frac{\beta_2}{2+\beta_2} f.
\end{aligned}
$$

Система уравнений (3.1) записана в безразмерной критериальной форме, где $\tau = \frac{at}{h^2} = n^2 F_0$, $\beta_1 = \frac{\alpha_1 h}{\lambda}$, $\beta_2 = \frac{\alpha_2 h}{\lambda}$, $\beta = \frac{1}{n}\beta_i$, F_0 –критерий Фурье, β_i –критерий Био, α_1, α_2 и f – обозначения, принятые в п. 2.

Подставляя q_0 и q_{n+1} из первого и последнего уравнения во второе и четвертое уравнения системы (3.1) соответственно, получим окончательную форму системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$
\begin{cases}
\dfrac{dq_1}{d\tau} = \dfrac{2\beta_1}{2+\beta_1} U - \dfrac{2+3\beta_1}{2+\beta_1} q_1 + q_2, \\
\dfrac{dq_i}{d\tau} = q_{i-1} - 2q_i + q_{i+1}, \qquad i = 2,3, \dots, n-1 \\
\dfrac{dq_n}{d\tau} = \dfrac{2\beta_2}{2+\beta_2} f + q_{n-1} - \dfrac{2+3\beta_2}{2+\beta_2} q_n,
\end{cases}
\qquad (3.2)
$$

используемой для доказательства существования решения сформулированной задачи оптимального по быстродействию управления.

3.2. Существование решения задачи управления

Изложим кратко логику этого доказательства. Как следует из теории принципа максимума Понтрягина, для существования решения все собственные числа матрицы A однородной системы уравнений, соответствующей (3.2), т. е

$$
A = \begin{pmatrix}
-\frac{2+3\beta_1}{2+\beta_1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 \\
0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & 0 & 0 & \dots & -2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -\frac{2+3\beta_2}{2+\beta_2}
\end{pmatrix}, \qquad (3.3)
$$

должны быть отрицательными. В [7] подробно изложено доказательство существования решения задачи. В частности, установлено, что 0 не является собственным числом матрицы A и что все собственные числа λ матрицы A принадлежат отрезку $-4 \leqslant \lambda < 0$. Из этого следует, что оператор A_1 матрицы A устойчив и что для любого начального состояния Q_0, принадлежащего области определения Q, существует оптимальное по быстродействию управление, переводящее точку Q_0 в начало координат.

3.3. Теорема об n интервалах

Задача нахождения оптимального по быстродействию управления U решается с помощью принципа максимума Понтрягина. Согласно принципу максимума, оптимальное управление должно доставлять максимум функции Гамильтона, которая для системы (3.2) имеет следующий вид

$$H = -\psi_0 + \psi_1\left(\frac{2\beta_1}{2+\beta_1}U - \frac{2+3\beta_1}{2+\beta_1}q_1 + q_2\right) + \sum_{i=2}^{n-1}\psi_i(q_{i-1} - 2q_i + q_{i+1}) +$$
$$+\psi_n\left(\frac{2\beta_2}{2+\beta_2}f + q_{n-1} - \frac{2+3\beta_2}{2+\beta_2}q_n\right), \qquad (3.4)$$

где ψ_1, ψ_i, ψ_n подлежат определению как множители Лагранжа.

Из выражения (3.4) следует, что H достигает максимума по $|U| \leqslant l$, где $l -$ оптимальное значение функции U, когда

$$U = l\, sign\, \psi_1(t).$$

В принципе максимума доказывается теорема об n интервалах переключения (см.[10]), согласно которой оптимальное по быстродействию управление системой (3.2) достигается при n переключениях управляющего воздействия $|U| \leqslant l$ с $-l$ на l и обратно с l на $-l$ на соседних интервалах переключения.

Таким образом, задача нахождения оптимального по быстродействию управления сводится к задаче определения моментов переключения.

Для определения моментов переключения управляющего воздействия в предлагаемой работе использован метод стыкования решений дифференциальных уравнений (3.2), который в итоге приводит к решению замкнутой системы трансцендентных уравнений относительно моментов переключения управляющего воздействия (см.[9]).

Отметим, что получение самой системы трансцендентных уравнений представляет из себя самостоятельную математическую задачу, сопряженную с существенными трудностями.

3.4. Метод стыкования решений

Итак, объект управления в нашей задаче описывается следующей системой:

$$\dot{Q} = AQ + B\,, \tag{3.5}$$

где

$$Q(t) = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix}, \tag{3.6}$$

$$\dot{Q}(t) = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix}, \tag{3.7}$$

$$B = \begin{pmatrix} k_1 U \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_2 f \end{pmatrix}, \tag{3.8}$$

Здесь A –матрица размерности $n \times n$, определяемая отношениями (3.3); Q –вектор-столбец размерности n, включающий функции состояния системы $q_1, q_2, \dots, q_n$, $\dot{Q}$ –вектор-столбец размерности n, включающий в качестве элементов производные функций $q_1, \dots, q_n$, B –вектор-столбец размерности n, включающий элементы, определяющиеся внешними связями системы.

Символами k_1 и k_2 обозначены величины:

$$k_1 = \frac{2\beta_1}{2 + \beta_1}\,, \tag{3.9}$$

$$k_2 = \frac{2\beta_2}{2 + \beta_2}\,. \tag{3.10}$$

Пусть заданы векторы начальных и конечных условий: $Q(0)$ и $Q(T)$.

Тогда последовательность поиска моментов переключения может быть представлена следующим образом.

1. Будем искать решение системы (3.5) в виде

$$Q = e^{At} \cdot C - A^{-1} \cdot B\,, \tag{3.11}$$

где

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} - \text{вектор – столбец, состоящий из постоянных коэффициентов.}$$

2. Запишем решение системы в виде (3.11) на конце последнего интервала управления, то есть при $t = t_n$:

$$e^{At_n} \cdot C^n = Q(T) + A^{-1}B^n\,. \qquad (3.12)$$

Учтем, что вектор B можно записать в следующих видах:

$$B = \begin{pmatrix} k_1 U \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_2 f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm k_1 l \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_2 f \end{pmatrix}. \qquad (3.13)$$

Знак первого элемента вектора (3.4.9) определяется следующим образом. Выбираем знак управления на первом интервале, затем меняем его на каждом из последующих интервалов, кончая n-м. Таким образом получаем вектор B для разных моментов переключения. Вектор B^n соответствует последнему интервалу управления.

3. Определим из (3.12) постоянные интегрирования для последнего отрезка, т. е. вектор C^n.

$$C^n = e^{-At_n}(Q(T) + A^{-1}B^n)\,. \qquad (3.14)$$

4. Произведем стыкование решений на границе последнего и предпоследнего интервалов:

$$e^{At_{n-1}} \cdot C^n - A^{-1} \cdot B^n = e^{At_{n-1}} \cdot C^{n-1} - A^{-1} \cdot B^{n-1} \qquad (3.15)$$

или

$$e^{At_{n-1}}(C^{n-1} - C^n) = A^{-1} \cdot B^{n-1} - A^{-1} \cdot B^n\,. \qquad (3.16)$$

5. Найдем $(C^{n-1} - C^n)$ из (3.16):

$$C^{n-1} - C^n = e^{-At_{n-1}}(A^{-1} \cdot B^{n-1} - A^{-1} \cdot B^n)\,. \qquad (3.17)$$

6.Определим вектор постоянных интегрирования для предпоследнего отрезка с помощью подстановки C^n из (3.14) в (3.17).

7. Состыкуем решения на границе последующих интервалов для разностей векторов $(C^{n-2} - C^{n-1})$. Это делается аналогично пунктам 4–6.

8. Определим вектор C^1 из начальных условий путем решения следующей системы:

$$e^{At_0} \cdot C^1 = Q(0) + A^{-1} \cdot B^1\,. \qquad (3.18)$$

Получим:

$$C^1 = e^{-At_0}(Q(0) + A^{-1} \cdot B^1)\,. \qquad (3.19)$$

9. Приравняем значения векторов C^1, полученных в пунктах (7) и (8). Определяем систему уравнений для определения неизвестных $t_1, t_2, \dots, t_n$, которые, согласно (3.17), входят в C^1.

10. Рассчитываются моменты переключения управления.

3.5. Математические методы реализации стыкования уравнений

Обычно для нахождения моментов переключения t_i отыскивают собственные числа и собственные векторы матрицы коэффициентов системы уравнений (3.3), затем через них выражают решение системы. Собственные числа матрицы находят, составляя характеристический многочлен и отыскивая его корни. Сначала методом Штурма определяют корни характеристического многочлена, а затем уточняют их методом хорд и касательных.

В представленной работе при решении нашей задачи матрица A приводится к Жордановой форме методом вращений. Затем полученная методом вращений матрица приводится к диагональному виду, из определителя которой градиентным методом находятся приближенные значения t_i. Приближенные значения затем уточняются методом хорд и касательных. Такой подход существенно упрощает нахождение моментов переключения t_n и сокращает время, затрачиваемое на решение задачи.

3.6. Проверка результатов с помощью численного интегрирования. Анализ результатов

Проверка результатов решения задачи оптимального управления осуществлена путем численного интегрирования системы уравнений (3.3) методом Рунге-Кутта четвертого порядка точности для двух и трех найденных моментов переключения.

Значения констант задавались следующим образом:

$$\lambda = 0{,}034\,\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}},$$

$$h = 200\ \text{м}.$$

Для простоты расчетов α_1 и α_2 задавались для достаточно больших β_1 и β_2.

Тогда

$$K_1 = \frac{2\beta_1}{2+\beta_1} \approx 2\,,$$

$$K_2 = \frac{2\beta_2}{2+\beta_2} \approx 2\,,$$

$$m_1 = -\frac{2+3\beta_1}{2+\beta_1} \approx -3\,,$$

$$m_2 = -\frac{2+3\beta_2}{2+\beta_2} \approx -3\,.$$

Пусть $l = 5K$, $f = 3K$.

Тогда $K_1 u = \pm 10$, $K_2 f = 6$.

Все перечисленные безразмерные величины K_1, K_2, m_1, m_2 соответствуют коэффициенту турбулентности $a = 10M^2c^{-1}$.

Рассмотрим случай, когда $n = 2$. Это соответствует ситуации, когда слой состоит из двух граничных и двух внутренних точек, т.е. $q_1(0) = 11{,}3$, $q_2(0) = -1{,}82$, $q_1(T) = 5$, $q_2(T) = 2$.

Соответствующая система уравнений для нахождения моментов переключения t_1 и t_2 будет иметь вид

$$\begin{cases} 7e^{4t_2} - 5e^{4t_1} - 12{,}12 = 0 \\ 9e^{2t_2} - 10e^{2t_1} - 1{,}48 = 0 \end{cases}.$$

Решение системы методом градиентного спуска и последующее уточнение решений методом хорд и касательных приводит к результатам:

$t_1 = 13{,}53$ минут,

$t_2 = 20{,}06$ минут.

Максимальная погрешность решений системы имеет порядок 10^{-4}.

Результаты решения задачи при $n = 2$ представлены на рис. 2.

Рис. 2. Осциллограмма оптимального процесса при n=2.
Fig. 2. Oscillogram of the optimal process at n=2.

Как видно из графика хода кривых, система из начального состояния ($q_1(0) = 11{,}3$, $q_2(0) = -1{,}82$) переведена в конечное ($q_1(T) = 5$, $q_2(T) = 2$) состояние, соответствующее нулевой водности, т. е. рассеяния тумана.

На графике видно, что поведение функций q_1 и q_2, соответствующих нижнему 1 и верхнему уровню от земной поверхности совершенно неочевидно. Так, на первом из моментов переключения функция q_1 достигает минимума, а затем возрастает до второго момента переключения, тогда как функция q_2 монотонно возрастает. Интересно, что обе функции остаются постоянными после второго момента переключения вплоть до конечного момента интегрирования, равного 25 минутам. Можно говорить о том, что система остается в равновесии некоторое время после повторного переключения управления.

Аналогичные расчеты выполнены для $n = 3$. Исходные условия были взяты такие же, как для предыдущего случая, а начальные и конечные значения вектора $Q(z,t)$ определялись следующими векторами:

$$Q(z,0) = \begin{pmatrix} 5 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$Q(z,T) = \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3. На этом рисунке по оси ординат отложена нормированная разность между составляющими векторов начального и конечного состояния системы.

Рис. 3. Осциллограмма оптимального по быстродействию процесса.
Fig. 3. Oscillogram of the optimal process at n=3.

Как и в случае двух переключений, на нижних трех уровнях функции q_1, q_2, q_3 осциллируют, приближаясь к заданным значениям, тогда как на верхнем уровне функция q_4 убывает монотонно. После достижения поставленных целей, так же, как в первом случае, наступает равновесие.

В заключение авторы выносят благодарность Ирине Леонидовне Малковой, выполнившей все математические расчеты.

Список литературы

1. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 2009. 213 с.

2. *Бутковский А.Г.* Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 474 с.

3. *Геникович Е.Л.* О применении квазистационарного подхода в моделях формирования поля средних концентраций // Труды ГГО. 1985. Вып. 495.

4. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. М. Наука, 1966. 664 с.

5. *Клемин В.В.* Управление фазовой скоростью движения волн Россби // Труды ЛГМИ. 1990. Вып. 106. Гидрометеорология – научно-техническому прогрессу. С. 32-44.

6. *Клемин В.В.* О теоретической возможности искусственного стационирования волн Россби // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №1 (371). С. 60-66.

7. *Клемин В.В. Суворов С.С.* Оптимальное управление рассеянием тумана // Труды ЛГМИ. 1985. Вып. 90. С. 107-114.

8. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 876 с.

9. *Понтрягин Л.С.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1970. 364 с.

10. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 391 с.

11. *Фельдбаум А.А., Бутковский Л.Г.* Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971. 640 с.

References

1. *Berlyand M.E.* Sovremennye problemy atmosfernoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 2009, 213 p. [in Russ.].

2. *Butkovskiy A.G.* Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami. Moscow, Nauka publ., 1965, 474 p. [in Russ.].

3. *Genikovich E.L.* O primenenii kvazistatsionarnogo podhoda v modelyah formirovaniya polya srednih kontsentratsiy. *Trudy GGO*, 1985, Vyp. 495. [in Russ.].

4. *Demidovich B.P., Maron I.A.* Osnovy vychislitel'noy matematiki. Moscow, Nauka publ., 1966, 664 p. [in Russ.].

5. *Klemin V.V.* Upravlenie fazovoy skorost'yu dvizheniya voln Rossbi. Trudy LGMI, 1990, Vyp. 106. Gidrometeorologiya – nauchno-tekhnicheskomu progressu. pp. 32-44. [in Russ.].

6. *Klemin V.V.* On the theoretical possibility of Rossby wave stabilization. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 371, no. 1, pp. 60-66. [in Russ.].

7. *Klemin V.V. Suvorov S.S.* Optimal'noe upravlenie rasseyaniem tumana. *Trudy LGMI*, 1985, vol. 90, pp. 107-114. [in Russ.].

8. *Matveev L.T.* Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984, 876 p. [in Russ.].

9. *Pontryagin L.S.* Obyknovennye differentsial'nye uravneniya. Moscow, Nauka publ., 1970, 364 p. [in Russ.].

10. *Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F.* Matematicheskaya teoriya optimal'nyh protsessov. Moscow, Fizmatgiz, 1961, 391 p. [in Russ.].

11. *Fel'dbaum A.A., Butkovskiy L.G.* Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, Nauka publ., 1971, 640 p. [in Russ.].

Поступила 31.03.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 31.03.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-66-76
УДК 551.582

Анализ выхода южных циклонов на территорию Республики Башкортостан

О.В. Волобуева, О.Н. Топтунова, Я.В. Дробжева

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
ovvolobueva@ramble, olgakolp@yandex.ru

Представлены результаты анализа выхода южных циклонов на территорию Республики Башкортостан за период 1993–2018 гг. Выявлены типовые траектории циклонов, территории их зарождения, а также сопутствующие неблагоприятные явления погоды по данным наблюдательной сети ФГБУ «Башкирское УГМС». В 70 % случаев южные циклоны смещаются через территорию республики и покидают ее в северо-восточном направлении. Около 50 % барических депрессий приходит на территорию Республики Башкортостан с районов Черного моря и его побережья. Высотное поле для выхода южных циклонов – передняя часть барической ложбины со значительными градиентами геопотенциала. Выходы южных циклонов оказывают значительное влияние на указанную территорию и тесно связаны с формированием опасных гидрометеорологических явлений.

Ключевые слова: южный циклон, характерные территории, Республика Башкортостан

Analysis of the arrival of southern cyclones to the Republic of Bashkortostan

O.V. Volobueva, O.N. Toptunova, Y.V. Drobzheva

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia
ovvolobueva@ramble, olgakolp@yandex.ru

The results of the analysis of the arrival of southern cyclones to the territory of the Republic of Bashkortostan for the period of 1993-2018 are presented. Typical trajectories of cyclones, areas of their origin, as well as accompanying adverse weather phenomena are identified according to the observational network of the Bashkir Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. In 70 % of cases, southern cyclones move through the territory of the republic and leave it in the north-east direction. About 50 % of the depressions come to the Republic of Bashkortostan from the Black Sea and its coast. The upper-air field for the arrival of southern cyclones is the front part of the pressure trough with high geopotential height gradients. The arrivals of southern cyclones have a significant impact on the study area and are closely related to the formation of severe hydrometeorological events.

Keywords: southern cyclone, typical territories, the Republic of Bashkortostan

Введение

Циклоны являются важнейшим звеном крупномасштабной и региональной атмосферной циркуляции, отвечают за транспортировку тепла и влаги. Интенсивная циклоническая деятельность тесно связана с формированием опасных гидрометеорологических явлений: сильных ветров, ливней, метелей, наводнений и пр. [1, 2]. Кроме того, особенный интерес представляют изменения в циклонических режимах в условиях меняющегося климата [3]. Изменения в повторяемости и характеристиках циклонов влекут за собой перераспределение всех метеорологических величин. Именно поэтому анализ циклонической деятельности – важная задача, которая может решаться как численным способом [4], так и синоптико-статистическим. В данной работе выходы так называемых южных циклонов исследованы именно синоптико-статистическим способом.

Исходные данные и методы расчета

Исследование проводилось за период с 1993 по 2018 год. Данные получены с помощью карт ЕСП (Естественный Синоптический Период), карт АТ-500 и приземных. На приземной карте фиксировались данные давления в центре циклона, а также направление их перемещения. По карте АТ-500 определялась стадия развития барических образований, а также направление ведущего потока. При отсутствии высотных карт для анализа барического поля привлекались данные реанализа ERA-5 с разрешением 0,25°×0,25° [https://cds.climate.copernicus.eu/].

Для анализа явлений погоды, наблюдаемых в связи с выходами южных циклонов на территорию Республики Башкортостан, были выбраны пять метеорологических станций: по две на юге (Зилаир, Акъяр) и севере республики (Янаул, Дуван) и одна в центральной части (Уфа-Дема). Период исследования: с 2004 по 2018 год.

Анализ южных циклонов, выходящих на территорию Республики Башкортостан

Южными циклонами называют такие барические депрессии, которые смещаются из более южных широт. Часто они возникают после завершения такого процесса, как меридиональное макроциркуляционное преобразование и формирование благоприятного для циклогенеза термобарического поля [5]. Участок зарождения южного циклона и его дальнейшая траектория зависят от конкретной географической локализации высотной ложбины. Возникновение происходит у основания высотной ложбины под ее передней частью, где отмечаются большие горизонтальные градиенты температуры.

Типовое высотное поле, при котором происходит образование южных циклонов и выход их на территорию Республики Башкортостан, приведено на рис. 1. При этом территория республики находится в передней

части высотной ложбины. На рисунке кругом отмечена исследуемая территория – Республика Башкортостан.

Рис. 1. Типичное поле АТ-500, характерное для выхода южных циклонов.
Fig. 1. Typical AT-500 field, typical for the exit of southern cyclones.

Ниже представлен сформированный архив случаев вторжения южных циклонов на исследуемую территорию за период с 1993 по 2018 год (табл. 1), а также места их зарождения.

Таблица 1. Даты образования южных циклонов и продолжительность их перемещения до территории Республики Башкортостан
Table 1. Dates of formation of southern cyclones and the duration of their movement to the territory of the Republic of Bashkortostan

Год	Дата	Продолжительность, дни	Год	Дата	Продолжительность, дни
1993	30.01	1	1995	14.11	1
1993	25.06	2	1996	9.06	3
1993	29-30.06	2	1996	29-30.12	2
1993	11-12.09	1	1997	28.05	2
1993	15.09	2	1998	11.04	2
1994	30.09	3	2000	23.12	3
1995	6 ноября	1	2002	3-4.10	1,5

Год	Дата	Продолжительность, дни	Год	Дата	Продолжительность, дни
2002	12.09	3	2010	1.12	3
2003	2-3.02	1,5	2012	6.03	7
2004	3.05	2	2014	11.08	5
2004	17-18.05	2,5	2016	21.03	2
2004	17-18.11	1,5	2016	28.03	3
2006	10.03	2	2017	30.03	3
2007	6.01	3	2017	11-12.05	2,5
2008	29-30.07	1,5	2017	22.05	1

Географически формирование южных циклонов было отнесено к следующим пяти морям: Средиземное, Адриатическое, Черное, Каспийское и Аральское (табл. 2).

Таблица 2. Районы зарождения южных циклонов, перемещающихся на территорию Республики Башкортостан
Table 2. Areas of origin of southern cyclones moving to the territory of the Republic of Bashkortostan

Территория зарождения	Средиземное море	Адриатическое море	Черное море	Каспийское море	Аральское море
Над морем	3	1	9	6	1
На побережье	2	1	6	1	0
Итого	5	2	15	7	1

Максимальное количество зарождений циклонов (50 %) было над Черным морем и над его побережьем (15). Можно выделить циклоны, зародившиеся над Средиземным, Адриатическим и Черным морями, которые приходят в республику с юго-западного направления, и циклоны, продвигающиеся с южного направления, т. е. с Каспийского и Аральского морей.

С выходом южных циклонов на станциях наблюдались такие опасные явления, как усиление ветра, сильные осадки, гололед, метели, грозы и град (табл. 3).

Так, например, в исследуемых случаях наибольшее количество осадков выпало в 2004 г. (17–18.11), в 2010, 2014 и в 2017 гг. (11–12.05, 22.05).

Максимальное значение количества осадков (28 мм) зафиксировано 22 мая 2017 года. В этот день по другим станциям республики отмечались

сильные осадки до 34 мм. Максимальное значение скорости ветра (21 м/с) наблюдалось при выходе южного циклона на территорию республики 17–18 ноября 2004 года.

Таблица 3. Опасные и неблагоприятные гидрометеорологические явления по данным метеорологических станций Республики Башкортостан в период прохождения южных циклонов
Table 3. Dangerous and unfavorable hydrometeorological phenomena according to the data of meteorological stations of the Republic of Bashkortostan during the passage of southern cyclones

Дата	Осадки, мм/12 час	Ветер, м/с	Явления погоды (пункт наблюдений)
Зима			
01.12.2010	Дуван (9), Акъяр (10,4)	Зилаир (15), Акъяр (**18**)	Сильный снег (Янаул, Дуван) метель (Зилаир); гололед (Акъяр)
Весна			
03.05.2004	Янаул (**15**), Зилаир (13)	Уфа (14), Акъяр (**19**)	Сильный дождь (Янаул); гроза, град (Дуван, Зилаир)
17-18.05.2004		Дуван (**19**), Уфа (16)	
10.03.2006	Дуван (9), Уфа (9)		Гололед (Дуван, Уфа); сильный снег (Уфа)
11-12.05.2017	Янаул (7), Дуван (**17**)	Дуван (13), Уфа (13), Акъяр (14)	Сильный дождь, гроза (Дуван)
22.05.2017	Янаул (14), Дуван (**28**)		Сильный дождь (Дуван); гроза (Уфа, Зилаир)
30.03.2017	Уфа (6,4)	Уфа (14)	Отложения мокрого снега (Уфа)
Лето			
29-30.07.2008		Акъяр (14)	Гроза (Уфа, Зилаир, Акъяр)
11.08.2014	Янаул (13), Уфа (8,9)	Акъяр (14)	Гроза (Янаул, Дуван, Уфа)
Осень			
17-18.11.2004	Янаул (10), Уфа (9)	Дуван (**21**), Уфа (16)	

Для более подробного анализа передвижения южных циклонов на территорию республики выбраны три преобладающих типа трекинга:

1) так называемые «Северные ворота». Циклон, проходя через всю территорию, покидает ее в северо-восточной части республики. «Северные ворота» – термин, используемый синоптиками Башкирского УГМС;

2) стационирование и заполнение на территории республики;

3) перемещение циклона вдоль Уральских гор на север.

Все три варианта перемещений представлены на рис. 2.

Рис. 2. Перемещение циклонов после попадания на территорию Республики Башкортостан: 1 – «Северные ворота»; 2 - заполнение циклона на территории республики; 3 – перемещение циклона вдоль Уральских гор на север).
Fig. 2. Movement of cyclones after entering the territory of the Republic of Bashkortostan: 1 – "Northern Gate"; 2 – filling the cyclone on the territory of the republic; 3 – movement of the cyclone along the Ural Mountains to the north).

Важно отметить, что траектории прохождения циклонов по территории республики определяются не только преобладающими направлениями воздушного потока, но и наличием Уральских гор, вытянутых в меридиональном направлении на востоке республики. Горы препятствуют западному переносу воздушных масс, и барические образования вынуждены или оставаться на территории республики, постепенно заполняясь (тип 2), или искать выход, обходя южную или северную оконечность Уральских гор. Стоит отметить, что одним из типов трекинга до 90-х годов являлась так называемая траектория «Южных ворот», когда циклоны, двигаясь в широтном направлении, заходя на территорию республики с юго-запада, покидали ее в северо-восточном или восточном направлении, огибая Уральские горы с юга. Однако в период с 1993 по 2018 г. не было ни одного случая таких перемещений, хотя в предыдущие годы (по записям синоптиков Гидрометцентра Башкирского УГМС) такие случаи встречались. Таким образом, можно утверждать, что усилился межширотный обмен, а процессы стали все более меридиональными.

На рис. 3 представлена типовая траектория перемещения южного циклона по территории республики через «Северные ворота».

а) сборно-кинематическая приземная карта

б) карта АТ-500 за 21.05.2017 00 ВСВ

Рис. 3. Траектория движения циклона (21-24.05.2017 г.) по территории Республики Башкортостан через «Северные ворота».
Fig. 3. The trajectory of the cyclone movement (21-24.05.2017 г.) through the territory of the Republic of Bashkortostan through the "Northern Gate".

Из 30 рассмотренных случаев за исследуемый период в 21 случае, а это 70 %, перемещение циклонов происходило через «Северные ворота».

При таком типе трекинга происходит дальнейшее углубление циклона, давление в центре циклона падает приблизительно на 5 гПа и достигает значений 995 гПа. До республики циклон доходит в среднем за сутки.

Более редким типом трекинга (5 из 30, или 17 %) является стационирование циклонов и заполнение на территории республики. На рис. 4 представлена типовая траектория таких циклонов. Изменение давления по второму типу происходит скачкообразным образом (рост, падение, рост) и давление меняется с 995 гПа (в стадии зарождения) до 1008 гПа (в стадии заполнения). До территории республики циклон смещается в среднем за 4 суток.

а) сборно-кинематическая приземная карта

б) карта АТ-500 за 25.03.2016 00 ВСВ

Рис. 4. Траектория движения циклонов, заполняющихся на территории Республики Башкортостан (25-28.03.2016 г.).
Fig. 4. Trajectory of movement of cyclones filling in the territory of the Republic Bashkortostan (25-28.03.2016).

Третий установленный за период исследований тип трекинга – циклоны, смещающиеся вдоль Уральских гор. Таких случаев оказалось 4 из 30 (13 %). Уральские горы оказывают влияние на перемещение циклонов, расположенных в меридиональном направлении на восточной окраине республики. По 3 типу давление в центре циклона постепенно понижается, а в последние сутки, достигнув значения в центре 999 гПа, практически остается постоянным (рис. 5).

а) сборно-кинематическая приземная карта

б) карта АТ-500 за 27.06.1993 00 ВСВ

Рис. 5. Траектория движения циклона (26.06-1.07.1993 г.), прошедшего вдоль Уральских гор, при перемещении по территории Республики Башкортостан (26.06-1.07.1993 г.).
Fig. 5. The trajectory of the cyclone (26.06-1.07.1993 г.), which passed along the Ural Mountains, while moving through the territory of the Republic Bashkortostan.

Если говорить о сезонной повторяемости, то больше всего циклонов наблюдается весной (36 %) и осенью (27 %). Это объясняется тем, что в переходные периоды обостряются атмосферные процессы и происходит более частое и быстрое перемещения барических образований.

Заключение

Приблизительно в 70 % случаев южные циклоны смещаются через «Северные ворота», при этом в течение первых суток давление в центре циклона падает приблизительно на 5 гПа. Циклон покидает территорию республики в течение следующих суток. Около 17 % случаев приходится на заполняющиеся на территории республики южные циклоны. Оставшиеся 13 % составляют циклоны, смещающиеся вдоль Уральских гор.

Перемещения через «Южные ворота» за данный период исследований не наблюдалось. Таким образом, можно говорить об усилении межширотного обмена и тенденции на увеличение меридиональных процессов.

Большинство южных циклонов образуется в переходное время года, около 50 % барических депрессий приходит на территорию Республики Башкортостан с районов Черного моря и его побережья, около 23 % с районов Каспийского моря, реже циклоны выходят на республику с районов Средиземного, Адриатического и Аральского морей.

Наиболее благоприятное высотное поле для выхода южных циклонов – передняя часть высотной ложбины с высокими градиентами.

Исследование южных циклов, влияющих на синоптические процессы данного региона – важнейшая задача, стоящая перед прогнозистами, поскольку своевременный и точный прогноз траектории перемещения, времени прохождения через территорию республики позволяет своевременно предупредить пользователей гидрометеорологической информации: промышленные предприятия, энергетиков, дорожные службы и т. д. – все погодозависимые структуры экономики, а также органы власти. В республике расположено большое количество добывающих и перерабатывающих предприятий, заводов, аэропорт и разветвленная сеть автодорог, а также крупный железнодорожный транспортный узел.

Синоптики отдела метеорологических прогнозов Башкирского УГМС используют модельные прогнозы и схемы, такие как Рединг, BRACKNELL, GFS, COSMO, модель ПЛАВ, и действительно учитывают их в оперативной работе при отслеживании перемещения южных циклонов. Но, например, при типе трекинга «Северные ворота» с момента зарождения циклон доходит до территории республики в среднем за сутки. Это слишком короткий интервал времени, и очень важно своевременно определить по какой траектории циклон будет перемещаться по территории республики. Задача анализа точности модельных прогнозов, связанных с южными циклонами, выходящими на исследуемую территорию, представляется не только очень интересной, но и достаточно масштабной,

требующей отдельного исследования, чем авторы статьи и предполагают заняться в ближайшее время. Результаты данного исследования в настоящее время в качестве дополнительного источника информации могут быть использованы синоптиками-прогнозистами в оперативной работе.

Список литературы

1. *Горохольская В.З., Волобуева О.В.* Сильные ветры и метели на территории Республики Башкортостан // Метеорология и гидрология. 2006. № 7. С. 49-55.

2. *Ильин В.Г., Волобуева О.В., Горохольская В.З.* Опасные для отраслей экономики Республики Башкортостан явления погоды, обусловленные южными циклонами // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 14-15 марта 2019 г. С. 88-89.

3. *Топтунова О.Н., Анискина О.Г.* Изменения циклонических режимов северного и южного полушарий в условиях меняющегося климата // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 114 (10). С. 14-20.

4. *Топтунова О.Н.* Анализ циклонических режимов северного и южного полушарий: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. СПб.: РГГМУ, 2016. 27 с.

5. *Хандожко Л.А.* Региональные синоптические процессы: Учебное пособие. Л.: Изд.-во ЛГМИ, 1988. 103 с.

References

1. *Goroholskaya V.Z, Volobueva O.V.* Sil'nye vetry i meteli na territorii Respubliki Bashkortostan. [Strong winds and blizzards in the territory of the Republic of Bashkortostan]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [*Russ. Meteorol. Hydrol.*], 2006, no. 7, pp. 49-55. [in Russ.].

2. Ilyin V.G.1, Volobueva O.V.1, Goroholskaya V.Z. Opasnye dlja otraslej jekonomiki Respubliki Bashkortostan javlenija pogody, obuslovlennye juzhnymi ciklonami [Weather phenomena caused by southern cyclones that are dangerous for industries of the Republic of Bashkortostan]. *Collection of abstracts of the All-Russian scientific and practical conference «Modern problems of hydrometeorology and sustainable development of the Russian Federation»* Saint Petersburg, 2019, pp. 88-89. [in Russ.].

3. *Toptunova O.N., Aniskina O.G.* Izmenenija ciklonicheskih rezhimov severnogo i juzhnogo polusharij v uslovijah menjajushhegosja klimata [Changes in the cyclonic regimes of the northern and southern hemispheres in a changing climate]. Science Magazine KSAU, 2015, vol. 114, no. 10, pp. 14-20. [in Russ.].

4. *Toptunova O.N.* Analiz ciklonicheskih rezhimov severnogo i juzhnogo polusharij [Analysis of cyclonic regimes in the northern and southern hemispheres]. Extended Abstract of dissertation of the Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Saint Petersburg, RGGMU, 2016, 27 p. [in Russ.].

5. *Handozhko L.A.* Regional'nye sinopticheskie processy [Regional synoptic processes]. L.LSHI publ. 1988. 103 p. [in Russ.].

Поступила 21.04.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021; принята в печать 21.06.2021.
Submitted 21.04.2021; approved after reviewing 25.05.2021; accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-77-94
УДК 556.06

Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа

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

На основе метода экстраполяции гидрографа разработана автоматизированная система, которая позволяет ежедневно в течение всего года прогнозировать характеристики стока рек России с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Прогноз расходов или уровней воды выражается линейной формулой в зависимости от их значений за дату выпуска прогноза и за пять предыдущих суток. Прогноз ограничивается снизу и сверху минимальным и максимальным значениями расхода или уровня воды за период наблюдений. Схемы прогнозирования получены для 2776 речных створов. Использован единый для всех створов период ежедневных наблюдений за расходами и уровнями воды с 2010 по 2019 год. Верификация прогнозов показала, что данный метод может успешно применяться для достаточно крупных рек с плавным очертанием гидрографов.

Ключевые слова: среднесуточные расходы и уровни воды, краткосрочные и среднесрочные прогнозы, метод экстраполяции гидрографа, верификация прогнозов, максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов, самообучение автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов

Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation

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

An automated system has been developed based on the hydrograph extrapolation method, which allows the year-round daily forecasting of water level and streamflow for the Russian rivers with up to 10-day lead time.The forecast of discharges or water levels is expressed by a linear formula depending on their values on the date of the forecast issue and five previous days. The forecasting scheme limits the possible minimum and maximum values of the discharge or water level based on historical data.Forecast schemes were obtained for 2776 river gauges. The time period from 2010 to 2019 with daily observations of discharge and water level was used. The forecast verification shows that this method can be successfully applied to large rivers with smooth hydrographs.

Keywords: daily discharge and water levels, short- and medium-term forecasts, hydrograph extrapolation method, forecast verification, maximum lead time of satisfactory forecasts, self-learning of an automated system for preparing and issuing forecasts

Введение

Увеличение точности и заблаговременности гидрологических прогнозов и расширение сферы их применения необходимо в целях повышения эффективности использования и охраны водных ресурсов и защиты населения и хозяйственных объектов от участившихся в последние годы наводнений, вызванных интенсивным снеготаянием, дождевыми паводками, заторами и зажорами льда.

Важная роль при этом отводится ежедневно выпускаемым краткосрочным и среднесрочным прогнозам расходов и уровней воды в речных створах с заблаговременностью от 1 до 5 суток и от 6 до 10 суток соответственно [1, 7, 8, 13].

Изменение климата и усиление антропогенного воздействия на речные бассейны приводит к изменению условий формирования речного стока и его режима во многих регионах России. Это требует постоянного пересчета параметров схемы получения прогноза по мере поступления новой гидрометеорологической информации. Таким образом, возникает необходимость в использовании методов искусственного интеллекта и, в частности, машинного обучения в системе оперативного гидрологического прогнозирования.

Применение методов машинного обучения может быть максимально эффективным в рамках систем автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов для крупных речных бассейнов. Разработка систем автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов является одним из важнейших направлений деятельности Гидрометцентра России. Эти системы включают подсистемы информационного обеспечения, составления и выпуска прогнозов, доведения прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей в режиме реального времени.

Подсистема информационного обеспечения в автоматизированном режиме обеспечивает наличие обширной гидрометеорологической информационной основы для прогнозирования в режиме реального времени. Она основана на использовании современной системы управления базами данных (СУБД), которая функционирует в рамках автоматизированной системы обработки оперативной информации АСООИ Гидрометцентра России [9].

Подсистема составления и выпуска гидрологических прогнозов основана на использовании специально разработанных автоматизированных программных средств, реализующих разнообразные методики подготовки и коррекции гидрологических прогнозов.

Для оперативного обеспечения потребителей фактической и прогностической информацией реализована подсистема доведения выходной прогностической и информационно-аналитической продукции до пользователей. Подсистема реализована на основе Веб и ГИС-технологий, что позволяет интегрировать и визуализировать в единой информационной среде (сети Интернет) всю выходную продукцию. Взаимодействие с пользователями осуществляется с помощью ВЕБ приложения, функционал которого разрабатывается с учетом требований пользователей системы [11].

В настоящее время существует весьма обширный набор методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока. Эти методы в той или иной степени учитывают закономерности формирования стока на водосборе и движения воды в русловой сети. Они реализуются в виде физико-математических и концептуальных моделей или в виде статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза гидрологических и метеорологических характеристик [5, 6, 8, 10, 12, 14, 15].

Для разработки автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов целесообразно использование максимально простого и универсального метода, который позволял бы устойчиво получать с достаточной точностью ежедневные прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды в течение всего года. В связи с этим предлагается метод экстраполяции гидрографа, реализации которого для рек России посвящена настоящая статья.

Метод экстраполяции гидрографа

Характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход среднесуточных расходов и уровней воды в течение года дает основание для простейшего варианта их прогнозирования путем экстраполяции гидрографа текущего года. Такая экстраполяция может определять прогноз среднесуточного расхода воды с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома:

$$\hat{Q}(t+\Delta t) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(\Delta t) + \ldots + c_k(t)\varphi_k(\Delta t), \qquad (1)$$

где $\varphi_1(\Delta t)$,…, $\varphi_k(\Delta t)$ – некоторые заданные функции. Например, при $\varphi_1(\Delta t) = \Delta t$, …, $\varphi_k(\Delta t) = (\Delta t)^k$ формула (1) означает экстраполяцию гидрографа на Δt суток с помощью многочлена степени k. В частности, при значении $k = 1$ производится линейная экстраполяция, а при значении $k = 2$ – параболическая. В зависимости от даты составления прогноза t входящие в формулу (1) коэффициенты $c_0(t)$, $c_1(t)$, …, $c_k(t)$ определяются исходя из предположения о том, что последовательность наблюдавшихся расходов $Q(t)$, $Q(t-1)$, …, $Q(t-k)$ для даты составления

прогноза и для k предыдущих суток описывается тем же обобщенным полиномом. Данное предположение выражается в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q(t-i) = c_0(t) + c_1(t)\varphi_1(-i) + \ldots + c_k(t)\varphi_k(-i), \\ i = 0,1,\ldots,k. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (2) приводит к тому, что коэффициенты $c_0(t)$, $c_1(t)$, …, $c_k(t)$ линейно выражаются через расходы $Q(t)$, $Q(t-1)$, …, $Q(t-k)$. После подстановки этих выражений в формулу (1) она приобретает вид:

$$\hat{Q}(t+\Delta t) = \sum_{i=0}^{k} a_i(\Delta t) Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (3)$$

где $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$,…, $a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной формулы, зависящие от заблаговременности прогноза Δt и подлежащие оценке по данным гидрологических наблюдений.

Таким образом, экстраполяция гидрографа с помощью любого полинома вида (1) приводит к тому, что прогноз $\hat{Q}(t+\Delta t)$ выражается в виде линейной комбинации соответствующего дате составления прогноза расхода воды $Q(t)$ и k предыдущих расходов $Q(t-1)$, …, $Q(t-k)$.

Определяемые формулой (3) величины $\hat{Q}(t+\Delta t)$ могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения $\hat{Q}(t+\Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения $\hat{Q}(t+\Delta t)$ могут возникать при прогнозировании расходов и уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (3) необходимо корректировать, заменяя такие экстремальные значения $\hat{Q}(t+\Delta t)$ допустимым минимумом *minQ* или максимумом *maxQ* [4]. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t+\Delta t) = \begin{cases} minQ, & \text{если } \hat{Q}(t+\Delta t) < minQ; \\ \hat{Q}(t+\Delta t), & \text{если } minQ \le \hat{Q}(t+\Delta t) \le maxQ; \\ maxQ, & \text{если } \hat{Q}(t+\Delta t) > maxQ. \end{cases} \quad (4)$$

Обобщенная экстраполяция хода среднесуточных уровней воды приводит к аналогичной формуле, которая выражает прогноз уровня воды

$\hat{H}(t+\Delta t)$ в виде линейной комбинации известного к дате составления прогноза среднесуточного уровня $H(t)$ и k уровней $H(t-1)$, …, $H(t-k)$ за предшествующие сутки:

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

Результаты применения формулы (5) корректируются аналогичным образом путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t+\Delta t)$ допустимым минимумом *minH* или максимумом *maxH*. Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t+\Delta t)=\begin{cases} minH, & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t)<minH; \\ \hat{H}(t+\Delta t), & \text{если } minH\le\hat{H}(t+\Delta t)\le maxH; \\ \max H & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t)>maxH. \end{cases} \quad (6)$$

Данный метод может применяться для краткосрочного или среднесрочного прогнозирования речного стока в течение определенной фазы водного режима или в течение всего года. Он не является чисто формальным, так учитываемые в формулах (3) и (5) расходы и уровни воды за $k+1$ суток косвенно характеризуют поступление талых или дождевых вод, пополнение или истощение почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение русловых и пойменных запасов воды и трансформацию волны половодья или паводка в течение предшествующего периода. Возможности использования данного метода подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных прогнозов стока рек бассейна Камского водохранилища [3].

Реализация метода

Метод экстраполяции гидрографа использован для прогнозирования в течение всего года среднесуточных расходов и уровней воды в оборудованных гидрологическими постами речных створах, расположенных по всей территории России. Среднесуточные уровни воды прогнозировались для 2776 створов (рис 1). Среднесуточные расходы воды прогнозировались для 2098 створов.

При заданной заблаговременности прогноза Δt = 1,…,10 параметры $a_0(\Delta t)$, $a_1(\Delta t)$,…, $a_k(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формул (3) или (5) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2019. Входящие в формулы (4) и (6) минимальные и максимальные значения расходов и уровней воды определялись по тому же ряду и должны ежегодно пересчитываться по мере поступления новых данных наблюдений.

Рис. 1. Расположение анализируемых речных створов.
Fig. 1. Analyzed river gauges location.

При каждом значении заблаговременности Δt от 1 до 10 суток для формул (3) и (5) подбиралось оптимальное число k, при котором среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение. Анализ показал, что для всех значений заблаговременности прогноза $\Delta t = 1,\ldots,10$ суток такие оптимальные значения параметра k не превышали 5. На этом основании все прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды определялись с помощью формул (3) и (5) при $k = 5$.

В качестве примера в табл. 1 приведены параметры формул (3) и (4) для получения прогнозов среднесуточных расходов воды в створе на реке Дон у города Серафимович с заблаговременностью $\Delta t = 1,\ldots,10$ суток.

В табл. 2 приведены параметры формул (5) и (6) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда (приток Тобола) у города Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \ldots, 10$ суток.

Значения коэффициентов a_1, a_3 и a_4 оказались нулевыми вследствие их округления.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python разработана компьютерная программа.

Таблица 1. Параметры формул (3) и (4) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович
Table 1. Formula parameters (3) and (4) for obtaining a forecast of daily water discharge in the section of the river Don – Serafimovich

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minQ$	$maxQ$
1	1,435	-0,309	-0,082	0,053	-0,048	-0,054	2,21	148	5531
2	1,746	-0,522	-0,068	0,015	-0,065	-0,118	5,48	148	5531
3	1,981	-0,605	-0,129	0,02	-0,169	-0,117	9,41	148	5531
4	2,236	-0,740	-0,143	-0,068	-0,199	-0,116	13,84	148	5531
5	2,462	-0,829	-0,255	-0,099	-0,141	-0,178	18,90	148	5531
6	2,689	-1,007	-0,309	-0,048	-0,128	-0,249	24,57	148	5531
7	2,829	-1,126	-0,282	-0,046	-0,105	-0,335	30,87	148	5531
8	2,898	-1,136	-0,299	-0,044	-0,064	-0,435	37,65	148	5531
9	2,977	-1,168	-0,309	-0,025	-0,050	-0,52	44,75	148	5531
10	3,116	-1,208	-0,315	-0,037	-0,027	-0,658	60,09	148	5531

Таблица 2. Параметры формул (5) и (6) получения прогноза ежедневных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда
Table 2. Formula parameters (5) and (6) for obtaining a forecast of daily water levels in the river section of the river Tavda – Tavda

Δt	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b	$minH$	$maxH$
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,01	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,45	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,87	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,45	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Компьютерная программа включает следующие этапы:

– считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;

– оценку параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;

– оценку показателей качества получаемых прогнозов;

– создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры схемы получения прогноза и показатели его качества;

– создание сводной таблицы с результатами прогнозирования.

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [1].

1. Из 10-летнего периода наблюдений исключался первый год.

2. Данные за оставшиеся 9 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.

3. Полученные оценки подставлялись в формулы (3) и (4) или (5) и (6) для прогнозирования расходов или уровней воды в течение исключенного года.

4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или (для високосного года) за 366 суток.

5. Данные за исключенный первый год возвращались и исключался следующий год.

6. После повторения описанной процедуры для всех 10 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 3652$, полученный на независимом материале.

Если обозначить через $Y(t)$ значение прогнозируемой величины (расхода или уровня воды) за сутки t, а через $\widetilde{Y}(t)$ ее прогноз, то для периода с 01.01.2010 по 31.12.2019 г. среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}[Y(t) - \widetilde{Y}(t)]^2} \ . \qquad (7)$$

В соответствии с Наставлением [7] для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\widetilde{Y}_I(t + \Delta t)$ использует известное на дату его составления значение $Y(t)$ и определяется формулой:

$$\widetilde{Y}_I(t + \Delta t) = Y(t) + \overline{\Delta}, \qquad (8)$$

где $\overline{\Delta}$ вычисляется, как среднее арифметическое ряда $\Delta_1, \ldots, \Delta_N$, образованного N наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta_i - \overline{\Delta})^2} \ . \qquad (9)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования делается на основании отношения S/σ_Δ: при достаточно большом числе N проверочных прогнозов методика считается хорошей при $S/\sigma_\Delta \le 0{,}50$, удовлетворительной при $0{,}50 < S/\sigma_\Delta \le 0{,}80$ и неудовлетворительной при $S/\sigma_\Delta > 0{,}80$ [1, 7].

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

В Наставлении [7] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя S/σ_Δ соответствуют значения оправдываемости P = 82,5 % и P = 60 % соответственно [7].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович с заблаговременностью Δt = 1, …, 10 суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

В табл. 3:

R – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;

S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, м^3/с;

σ_Δ – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, м^3/с;

S/σ_Δ – показатель эффективности прогнозов;

P – оправдываемость прогнозов.

На рис. 2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью Δt = 5 суток расходов воды в 2016 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом расходов воды перед датой составления прогноза.

Показатели качества ежедневных прогнозов уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда приведены в табл. 4.

На рис. 3 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью Δt = 7 суток уровней воды в 2018 году.

Таблица 3. Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович
Table 3. Quality indicators of daily forecasts of water discharge of the river Don – Serafimovich

Δt	R	S	σ_Δ	S/σ_Δ	P, %
1	0,9995	22,3	38,3	0,58	91
2	0,998	41,8	72,7	0,58	86
3	0,996	63,0	106	0,59	85
4	0,993	84,1	139	0,61	84
5	0,989	109	171	0,64	84
6	0,983	134	202	0,66	85
7	0,975	160	232	0,69	83
8	0,967	185	260	0,71	84
9	0,957	209	288	0,72	83
10	0,937	253	341	0,74	83

Рис. 2. Фактические (синим) и спрогнозированные с заблаговременностью Δt = 5 суток (красным) гидрографы в створе р. Дон – г. Серафимович в 2016 г.
Fig. 2. Observed (blue) and predicted with a lead time = 5 days (red) hydrographs in the section of the river Don - Serafimovich in 2016.

Таблица 4. Показатели качества ежедневных прогнозов расходов воды в створе р. Тавда – г. Тавда
Table 4. Quality indicators of daily forecasts of water levels of the river Tavda - Tavda

Δt	R	S	σ_Δ	S/σ_Δ	P, %
1	1,000	2,8	7,8	0,36	96
2	1,000	6,1	15,4	0,40	95
3	0,999	10,0	22,8	0,44	94
4	0,998	14,0	30,1	0,47	93
5	0,996	18,4	37,3	0,49	91
6	0,993	22,9	44,3	0,52	90
7	0,990	27,5	51,1	0,54	88
8	0,987	32,4	57,9	0,56	86
9	0,982	37,4	64,4	0,58	85
10	0,977	42,6	70,9	0,60	85

Рис. 3. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью Δt = 10 суток (красным) ход уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.
Fig. 3. Observed (blue) and predicted with a lead time = 10 days (red) stage-time curve in the section of the river Tavda – Tavda in 2018.

Анализ результатов

Анализ результатов верификации прогнозов расходов и уровней воды в речных створах России позволяет оценить возможности используемого метода экстраполяции гидрографа и внедряемой системы автоматизированной подготовки и выпуска прогнозов.

Эти возможности демонстрирует табл. 5, в которой для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов, для которых получены удовлетворительные прогнозы расходов Q м^3/с и уровней воды H см с показателем $S/\sigma_\Delta < 0{,}80$ и оправдываемостью $P > 60\%$.

Таблица 5. Число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности.
Table 5. The number of river sections with satisfactory forecasts of various lead times

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	1000	723	545	456	382	328	301	277	258	240
H	1262	909	704	558	461	384	337	294	252	223

Приведенные в таблице данные показывают, что с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки удовлетворительные прогнозы расходов воды могут быть получены для 1000 створов, а уровней воды – для 1262 створов; с заблаговременностью $\Delta t = 2$ суток для 723 створов (расходы Q) и для 909 створов (уровни H) и т. д. При этом в число створов с удовлетворительными прогнозами при заблаговременности Δt входят и створы, для которых получены удовлетворительные прогнозы с большей заблаговременностью.

Обращает на себя внимание, что с максимальной для среднесрочных прогнозов заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток расходы воды удовлетворительно прогнозируются для 240 створов, а уровни воды для 223 створов.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографов оказался неприменимым для рек с малой площадью и большим уклоном водосбора, в частности для малых горных рек. Расположенные на таких реках створы дали приблизительно половину случаев, когда прогнозы расходов и уровней воды оказались неудовлетворительными даже при минимальной заблаговременности $\Delta t = 1$ сутки. Это объясняется тем, что при малых размерах и больших уклонах водосбора речной сток очень быстро, часто за несколько часов реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков [2]. В результате водный режим определяется серией

кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных расходов и уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки. Для таких рек необходимо использование методов, применяемых для прогнозирования быстроразвивающихся паводков, к примеру, методов, которые основаны на моделировании процессов формирования речного стока.

Для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора ход среднесуточных расходов и уровней имеет, как правило, плавный характер, как на рис. 2 и 3, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью. Для таких крупнейших российских рек, как Амур, Лена, Енисей, Обь, Иртыш, Тобол, Кама, Дон, Северная Двина и Печора, это метод дает не только удовлетворительные, но и хорошие прогнозы с заблаговременностью до 10 суток.

С увеличением заблаговременности прогноза Δt его среднеквадратическая погрешность S всегда возрастает. Растет и погрешность σ_Δ инерционного прогноза. В то же время изменение показателя эффективности прогноза S/σ_Δ и его оправдываемости P может иметь более сложный характер. Для крупных рек с очень плавным очертанием гидрографов при прогнозировании расходов или уровней воды с небольшой заблаговременностью Δt = 1–3 суток малая величина S может сочетаться с настолько малой величиной σ_Δ, что показатель S/σ_Δ может превысить критическое значение 0,80. В то же время при дальнейшем росте заблаговременности Δt прогнозы становятся удовлетворительными. Пример такой ситуации демонстрирует табл. 6 с аномальным характером изменения показателя эффективности прогнозов уровней воды в реке Иртыш у города Ханты-Мансийск (площадь водосбора 1 650 000 км^2) с ростом их заблаговременности.

Таблица 6. Значения показателя эффективности прогноза уровней воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск.
Table 6. Indicator values forecasting water levels effectiveness in the section Irtysh river – Khanty-Mansiysk

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/σ_Δ	0,83	0,78	0,78	0,77	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74

Следует, однако, заметить, что описанные случаи являются единичными, и в целом с увеличением заблаговременности прогноза показатель S/σ_Δ растет, а показатель P снижается. Это позволяет определить максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов

$max(\Delta t)$ таким образом, что прогнозы с показателями $S/\sigma_{\Delta} < 0{,}80$ и $P > 60\%$ могут быть получены при всех значениях Δt, не превышающих величину $max(\Delta t)$.

Будучи характеристикой водного режима реки, максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов зависит не только от размера и уклона водосбора, но и от климата, рельефа, ландшафтной структуры, факторов хозяйственной деятельности и других условий формирования стока. Поэтому получить зависимость величины $max(\Delta t)$ от площади и уклона водосбора можно только для достаточно однородных в географическом отношении регионов. Как правило, для таких регионов имеет место достаточно высокая отрицательная корреляция между площадью водосбора и его средним уклоном. Это позволило в первом приближении ограничиться анализом соотношений между максимальной заблаговременностью удовлетворительных прогнозов $max(\Delta t)$ и площадью водосбора A для различных речных бассейнов. Эти зависимости носят логарифмический характер и достаточно однотипны. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены зависимости $max(\Delta t)$ от $\ln A$ для бассейнов Амура и Оби.

Рис. 4. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов уровней воды $max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна реки Амур.
Fig. 4. Dependence of the maximum lead time of satisfactory forecasts of water levels on the logarithm of the catchment area for the Amur river basin.

Теснота представленной на рис. 4 зависимости характеризуется коэффициентом корреляции 0,83. Распределение точек на графике показывает, что удовлетворительные прогнозы уровней воды на реках бассейна Амура даже на одни сутки, как правило, невозможны при площади водосбора менее 5000 км^2, а удовлетворительные среднесрочные прогнозы с заблаговременностью более 5 суток возможны для речных створов с площадью водосбора более 500 000 км^2.

Рис. 5. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов уровней воды $max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна реки Обь.
Fig. 5. Dependence of the maximum lead time of satisfactory forecasts of water levels on the logarithm of the catchment area for the Ob river basin.

Теснота представленной на рис. 5 зависимости характеризуется коэффициентом корреляции 0,90. Распределение точек на графике показывает, что удовлетворительные прогнозы уровней воды на реках бассейна Оби даже на одни сутки, как правило, невозможны при площади водосбора менее 100 000 км^2, а удовлетворительные среднесрочные прогнозы с заблаговременностью более 5 суток возможны для речных створов с площадью водосбора более 500 000 км^2.

Получение подобных и более детальных зависимостей для различных регионов страны позволит заранее оценивать возможность применения метода экстраполяции гидрографа и является предметом дальнейших исследований.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана самообучающаяся автоматизированная система подготовки и ежедневного выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов расходов и уровней воды, которая применена для 2776 речных створов, расположенных практически по всей территории страны. В основу системы положен метод экстраполяции гидрографа.

Метод экстраполяции позволил в течение всего года прогнозировать с заблаговременностью от 1 до 10 суток ежедневные расходы и уровни воды с помощью всего двух простых формул, параметры которых определены по данным ежедневных гидрологических наблюдений за период с 2010 по 2019 год.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа, которая позволяет производить пересчет всех параметров и характеристик по мере изменения состава речных створов и поступления новой гидрологической информации.

Анализ результатов верификации прогнозов показал, что метод экстраполяции гидрографа и реализующая его автоматизированная система позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов и уровней воды для достаточно крупных рек с плавным изменением этих характеристик. В частности, удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью десять суток могут выпускаться более чем для 200 речных створов. Для ряда крупных речных бассейнов обнаружена достаточно тесная зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов от логарифма площади водосбора.

Разработанная автоматизированная система подготовки и выпуска прогнозов способна к самообучению, которое выражается в обновлении параметров прогностических формул по мере поступления данных гидрологических наблюдений. Это позволяет учитывать происходящие во многих регионах России климатические и антропогенные изменения условий формирования стока и его режима.

Список литературы

1. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.

2. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 356. 247 с.

3. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Чупин И.В., Юмина Н.М.* Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 74-86.

4. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162–175.

5. *Кучмент Л.С.* Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: Изд-во ИВП РАН, 2008. 394 с.

6. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2019. 300 с.

7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.

8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 245 с.

9. *Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В.* Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 257-285.

10. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. Amsterdam; Boston: Elsevier/AP, 2016. 478 p.

11. *Borsch S., Khristoforov A., Krovotynzev V., Leontieva E., Simonov Y., Zatyagalova V.* A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin // Geosciences. 2018. Vol. 8, no. 93. P. 1-16.

12. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.

13. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO- No. 168. 2009. 302 p.

14. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva: HWR, 1995. 26 p.

15. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.

References

1. *Borsch S.V., Khristoforov A.V.* Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].

2. *Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V.* Flood forecasting and early warning system for rivers of the Black sea shore of Caucasian region and the Kuban river basin. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], Special issue, 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].

3. *Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Chupin I.V., Yumina N.M.* Extrapolation of hydrographs as a method of short-range runoff forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2018, vol. 369, no. 3, pp. 74-86. [in Russ.].

4. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A.* Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175. [in Russ.].

5. *Kuchment L.S.* Rechnoy stok (genezis, modelirovanie, predvychislenie). Moscow, IVP RAN publ., 2008, 394 p. [in Russ.].

6. *Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N.* Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo Rossiyskoy akademii nauk, 2019, 300 p. [in Russ.].

7. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].

8. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].

9. *Stepanov Yu.A., Zhabina I.I., Purina I.E., Nedachina A.Yu., Eliseev G.V.* Automated technology of the Hydrometeorological Center of Russia for operational information processing in a high-performance cluster infrastructure. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 257-285. [in Russ.].

10. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. Amsterdam; Boston, Elsevier/AP, 2016, 478 p.

11. *Borsch S.V., Khristoforov A.V., A.; Krovotynzev V.A., Leontieva, E.F., Simonov Y.A., Zatyagalova V.V.* A Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin. Geosciences, 2018, vol. 8, no. 93, pp. 1-16.

12. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.

13. *WMO-No. 168. Guide* to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO, Geneva, 2009, 302 p.

14. Management Overview of Flood forecasting Systems (MOFFS): Version 3. Geneva, HWR, 1995, 26 pp.

15. *WMO-No. 1072.* Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. Geneva, 2011, 138 p.

Поступила 21.01.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 21.01.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-95-110
УДК 551.506.3+551.582.2

Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края

А.Д. Крючков, Н.А. Калинин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
meteo@psu.ru

Проанализирована согласованность информации о высоте снежного покрова, содержащейся в реанализе ERA5-Land, данным метеорологических станций Пермского края. Исследования проведены на материалах за период с октября 1990 по май 2020 года. Показано, что межгодовая изменчивость снежного покрова в целом успешно отображается указанной версией реанализа. Данные о наличии снега более качественно воспроизводятся в период возникновения снежного покрова, чем в период схода. В реанализе ERA5-Land наблюдается систематическое завышение высоты снежного покрова по отношению к фактическим наблюдениям, а распределение ошибок по территории Пермского края носит преимущественно меридиональный характер. В сезонной изменчивости снежного покрова согласно реанализу наблюдается смещение максимумов в сторону их более раннего наступления по отношению к фактическим наблюдениям.

Ключевые слова: снежный покров, реанализ, метеорологические станции, сезонная изменчивость, межгодовая изменчивость

Comparison of snow cover characteristics according to weather stations and ERA 5-Land reanalysis in the Perm region

A.D. Kryuchkov, N.A. Kalinin

Perm State University, Perm, Russia
meteo@psu.ru

The consistency of information on the snow depth contained in the ERA 5-Land reanalysis with data of weather stations of the Perm region is analyzed. The study is performed for the period from October 1990 to May 2020. It is shown that the interannual variability of the snow cover is generally successfully reflected by the current version of the reanalysis. Data on the snow availability are more accurately reproduced during the period of formation of the snow cover than during its melt. The performed calculations demonstrate a systematic overestimation of the snow depth in the ERA 5-Land reanalysis relative to the actual observations and a predominantly meridional error distribution on the territory of the Perm region. The maximum values in the seasonal variability of the snow cover occur earlier in the reanalysis than in the actual observations.

Keywords: snow cover, reanalysis, weather stations, seasonal variability, interannual variability

Введение

Многие физические процессы, управляющие климатической системой, сильно зависят от наличия снега на земле. Благодаря таким свойствам, как высокое альбедо и излучательная способность, поглощение тепла при таянии и низкая шероховатость, снежный покров резко изменяет приповерхностный энергетический обмен и, следовательно, состояние окружающей среды, что особенно проявляется в Северном полушарии. Обладая низкой теплопроводностью, снег предохраняет почву от промерзания, а посевы от вымерзания. Стоит заметить, что снег является важной частью глобального круговорота воды, содержит в себе огромные запасы влаги, которые при таянии существенно влияют на речной сток [2].

Основным источником сведений о состоянии снежного покрова на данный момент являются наблюдения за характеристиками снега на гидрометеорологических станциях. Однако существующие данные сети наблюдений распределены неравномерно. Кроме того, информация по отдельным пунктам не всегда бывает доступна. Данная проблема особенно актуальна в регионах с высокой контрастностью залегания снежного покрова из-за обширного пространства и сложного рельефа, например в Пермском крае. Указанные факторы сильно влияют на уровень знаний о формировании и пространственно-временном распределении характеристик снежного покрова, в том числе при восстановлении условий прошлых лет.

Одним из перспективных источников данных о снежном покрове являются результаты дистанционного зондирования, полученные с помощью искусственных спутников Земли. Для восполнения ограниченности наземных наблюдений применение спутниковых измерений рассматривается в плане более широкого пространственного охвата территории, благодаря чему можно увидеть динамику процессов, связанных со снегом. При анализе состояния местности немаловажным фактором является объективность на момент съёмки. С другой стороны, существует ряд проблем, связанных с состоянием снежного покрова, влиянием на него растительности и наличием облачности во время зондирования, что характерно для Пермского края [8].

В сложившейся ситуации потенциальными источниками данных о снежном покрове являются реанализы. Их преимущество заключается в полноте и однородности предоставляемых данных, а также охвате труднодоступных для наземных наблюдений территорий. В работах [9–14, 16] проведены исследования различных реанализов, по результатам которых можно сделать вывод об адекватном воспроизведении характеристик снежного покрова на глобальном уровне реанализом ERA-INTERIM Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF).

Исследования возможности применения ERA-INTERIM для изучения распределения характеристик снежного покрова на региональном уровне,

приведенные в [3, 7, 9–11 16], показали неоднозначные результаты. Так, верификация характеристик снежности на территории Пермского края [3] выявила некоторые проблемы, связанные в первую очередь с низким пространственным разрешением, применяемым в указанном реанализе.

В то же время реанализы постоянно совершенствуются, исправляются ошибки более ранних версий, улучшается разрешение во времени и пространстве. Качество таких изменений также требует специальной оценки.

Целью данной работы является исследование сезонной и межгодовой изменчивости высоты снежного покрова в Пермском крае по данным станционных наблюдений и последней версии реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA 5-Land.

Материалы и методы

В данном исследовании использованы следующие материалы за период с октября 1990 по май 2020 года:

1. Средние значения высоты снежного покрова, полученные путем деления суммы высоты снежного покрова за месяц на число дней со снегом. Информация по 25 метеорологическим станциям Пермского края представлена в метеорологических ежемесячниках [5].

2. Среднемесячные данные по высоте снежного покрова из реанализа ERA 5-Land. Используемый реанализ является детализированной версией информации о поверхности суши обновленного глобального реанализа ECMWF ERA 5, предоставляющего ежечасные данные по многим параметрам состояния атмосферы, земли и моря вместе с оценками неопределенности. Информация представляет собой мгновенное значение высоты снежного покрова, осредненное по квадрату сетки с пространственным разрешением 9 км (0,1×0,1°) [15]. Из почасовых данных рассчитываются средние ежемесячные значения. Осреднение по квадрату сетки позволяет извлекать необходимую информацию из массива глобальных данных напрямую по координатам метеорологических станций без дополнительных расчетов.

Для каждой станции проводилось сопоставление высоты снежного покрова (в сантиметрах) по результатам измерений и данным реанализа ERA 5-Land как за весь период (1990–2020 гг.), так и с разделением по десятилетиям. Рассматривалось наличие или отсутствие снежного покрова в начале (в Пермском крае по данным долгосрочных наблюдений снежный покров появляется преимущественно в октябре) и конце (в мае) его залегания. Произведен расчет разности сопоставляемых величин, которая в дальнейшем была принята за величину ошибки. Текущие отклонения были вычислены как для всего холодного периода, так и отдельно по месяцам. Приведены ошибки в абсолютном значении, рассчитанные по формуле:

$$\Delta X = X_{ф} - X_{r},$$

где ΔX – абсолютная ошибка измерения; $X_{ф}$ – значение фактического наблюдения; X_{r} –значение реанализа.

Расчет относительных ошибок производился по формуле

$$E = \frac{|\Delta X|}{X_{ф}} \cdot 100\ \%.$$

В качестве дополнительной меры сходства рассчитаны коэффициенты корреляции между данными наблюдений и реанализа ERA 5-Land.

Оценка адекватности воспроизведения реанализом ERA 5-Land сведений о наличии снега

Соответствие сведений о наличии снега по данным метеорологических станций Пермского края и реанализа ERA 5-Land в октябре наблюдается в 87 % случаев. Совпадение по всем пунктам наблюдений зафиксировано в 10 из 30 исследуемых лет, последний раз в 2015 году. Наименьшее число совпавших данных в октябре встречается в Чернушке (22 случая из 30), наибольшее – на станциях Вая, Чердынь, Коса, Октябрьский (29 случаев из 30). В целом отмечается постепенный рост числа совпадений с юго-запада на северо-восток, причем основной вклад в проявление данной зависимости вносит последнее десятилетие (2010–2020 гг.).

Анализ расхождений данных в октябре за тридцатилетний период показывает, что 49 % ошибок возникает при недооценке реанализом появления в той или иной местности снежного покрова. В остальных случаях реанализ, наоборот, показывает наличие снега на станциях, где его не зафиксировали наблюдатели. На общем фоне выделяются октябрь 1998 г., когда одновременно в 13 пунктах наблюдений не совпала информация из исследуемых источников, и октябрь 2005 г. с 12 ошибками. В первом случае массив реанализа преимущественно показал наличие снежного покрова, а фактические наблюдения не зафиксировали искомую характеристику, а во втором – снежный покров отмечен на метеорологических станциях, но не отображен в реанализе.

В мае информация о наличии снежного покрова из двух исследуемых источников совпала в 73 % случаев. За тридцатилетний период не зафиксировано ни одного совпадения одновременно во всех сравниваемых пунктах. С другой стороны, если в октябре в Чернушке отмечено минимальное число совпадающих данных, то в мае, наоборот, наблюдается максимум из возможных значений. В противоположность этой южной станции можно отметить Добрянку, где данные совпали лишь в 14 случаях из 30. В среднем по краю соответствие выявлено в 22 случаях из 30, что меньше значений октября на 4 пункта. При этом можно отметить

некоторую концентрацию наибольших совпадений на юге исследуемой территории.

Разбор случаев несовпадения данных указывает на то, что в мае большая часть ошибок (80 %) связана с фактическим отсутствием снежного покрова там, где его определяет реанализ. В остальных случаях метеорологические наблюдения зафиксировали наличие снега, но в реанализе соответствующих данных не обнаружено. Максимальные несоответствия получены в мае 2014 г. (14 станций). Еще для восьми лет ошибки есть от 10 до 12 пунктов наблюдений.

Стоит отметить, что в ряде случаев не было абсолютного отсутствия данных и реанализ ERA 5-Land показывает наличие снега, однако приведенные значения толщины снежного покрова в 0,4 см и менее принимались равными нулю. Если же высота снежного покрова по реанализу определялась как 0,5 см и более, то этот момент фиксировался как случай с наличием снега.

Высота снежного покрова

Анализ данных за 30 лет показывает, что среднемесячные значения высоты снежного покрова, которые содержатся в реанализе ERA 5-Land, в целом превышают станционные данные (табл. 1). Превышение, осредненное за год, характерно для 21 пункта наблюдений из 24 (88 % станций; информация по Чермозу рассматривается отдельно), составив в среднем 6 см. На станции Кудымкар отмечено совпадение исследуемых характеристик, а для Ножовки и Осы реанализ занижает показатели на 5 и 7 см соответственно. Относительная ошибка составляет 32 % в годовом выражении.

Значения средней ошибки 5 см и менее соответствуют преимущественно станциям, расположенным на западе Пермского края (рис. 1а), что можно считать хорошим результатом. Исключением является пункт наблюдений в Чайковском, для которого реанализ завышает показания в среднем на 10 см. С другой стороны, малая величина ошибки выявлена в Перми (5 см), Чердыни (4 см) и Кунгуре (3 см), расположенных восточнее.

Наибольшие показатели (10 см и более), кроме Чайковского, получены для Добрянки (12 см), Березников (10 см) и станций, расположенных на востоке Пермского края вблизи Уральского хребта. Например, в Губахе среднее отклонение составляет 11 см, в Лысьве – 15 см, а для станции Вая исследуемая характеристика составила 18 см.

Подобная закономерность прослеживается и при анализе относительных ошибок (рис. 1б). На западе Пермского края величины отклонений в относительном выражении изменяются от 12 до 29 %, в то время как для восточных станций данная характеристика составляет 40–65 %.

Исходя из приведенных выше расчетов можно предположить, что изменения величины ошибки носят в целом меридиональный

характер, т. е. наблюдается прямая зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с запада на восток. Значения на отдельных станциях, не соответствующие данному положению, являются скорее исключениями и зависят от локальных условий местности.

Таблица 1. Средние значения абсолютной ошибки высоты снежного покрова, см
Table 1. Average absolute error values of the snow depth, cm

Станция	Месяц								Среднее
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	
Вая	-4	-17	-24	-26	-20	-13	-26	-12	-18
Ныроб	0	-7	-14	-16	-10	-2	-11	-2	-8
Чердынь	0	-6	-10	-10	-4	4	-7	-1	-4
Усть-Черная	1	-3	-7	-5	1	7	0	1	-1
Гайны	1	-4	-9	-11	-6	2	-4	0	-4
Коса	0	-4	-9	-10	-6	1	-4	0	-4
Кочево	0	-4	-7	-7	-5	0	-6	0	-3
Березники	0	-6	-12	-14	-14	-10	-18	-3	-10
Кудымкар	1	-1	-4	-4	-1	4	0	0	0
Губаха	1	-6	-14	-15	-14	-9	-22	-8	-11
Бисер	-1	-9	-15	-17	-12	-2	-16	-6	-10
Добрянка	0	-6	-14	-18	-18	-17	-19	-1	-12
Верещагино	0	-3	-5	-8	-7	-5	-6	1	-4
Лысьва	-1	-9	-18	-23	-23	-23	-26	-2	-15
Пермь	1	-1	-7	-10	-8	-6	-8	1	-5
Кын	0	-8	-15	-16	-13	-11	-16	-2	-10
Оханск	0	-5	-11	-14	-12	-10	-10	0	-8
Б. Соснова	0	-2	-8	-9	-7	-6	-3	0	-4
Кунгур	1	-4	-10	-10	-5	-2	3	1	-3
Оса	1	2	6	13	18	15	3	0	7
Ножовка	1	1	0	5	11	13	6	1	5
Чайковский	0	-4	-12	-16	-15	-16	-16	-1	-10
Чернушка	0	-5	-14	–15	-11	-5	1	0	-6
Октябрьский	1	-6	-14	-17	-14	-9	-8	-0	-9
Чермоз 1	2	6	12	21	27	28	10	1	13
Чермоз 2	1	-2	-7	–9	-8	-6	-11	-1	-5
Чермоз среднее	1	2	3	6	10	11	-1	0	4
Среднее	0	-5	-10	-11	-8	-4	-9	-1	-6

Рис. 1. Разница между наблюдениями на метеорологических станциях Пермского края и данными реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: средняя абсолютная ошибка, см (а); средняя относительная ошибка, % (б).
Fig. 1. The difference between observations at meteorological stations in the Perm Region and the ERA 5-Land reanalysis data for the period 1990–2020: average absolute error, cm (a); average relative error, (б).

Отдельное внимание стоит уделить станции Чермоз. Указанный пункт наблюдений находится почти на границе двух квадратов пространственной сетки реанализа. Отметим, что подобное положение имеют несколько метеорологических станций, однако только для Чермоза, ввиду его особенного географического положения, данный фактор имеет критическое значение. Условия репрезентативности метеостанции выполняются, однако пункт наблюдения находится на возвышенности, которая с трех сторон окружена водоемами, поэтому зимой происходит заметное перераспределение снежных масс [6]. Физико-географические условия приводят к тому, что станция Чермоз отличается наименьшими показателями высоты снежного покрова среди станций Пермского края [4].

В то же время соответствующие Чермозу и ближайшие к нему квадраты пространственной сетки реанализа ERA 5-Land отличаются существенными различиями. При этом подобных контрастов не наблюдается в отношении других станций. В зависимости от попадания в ту или иную ячейку реанализ может как превышать фактические наблюдения,

так и существенно их занижать. Расхождения в данных представлены на рис. 2.

Рис. 2. Разница между наблюдениями на метеорологической станции Чермоз и данными реанализа ERA 5-Land в двух квадратах (Чермоз 1 и Чермоз 2), а также средние значения (Чермоз среднее) за период 1990–2020 гг.
Fig. 2. The difference between the observations at the Chermoz meteorological station and the ERA 5-Land reanalysis data in two grid boxes (Chermoz 1 and Chermoz 2), and the average values (Chermoz average) for the period 1990–2020.

Стоит отметить, что используемые в данном исследовании координаты станции Чермоз соответствуют квадрату, в котором значения реанализа оказываются значительно ниже измеряемых на метеорологической станции (Чермоз 1). При этом ближе к фактическим наблюдениям находятся показатели соседней ячейки (Чермоз 2). Было произведено линейное интерполирование значений путем расчета среднего арифметического для получения пограничной информации. Рассчитанные значения также представлены на рис. 2.

Вычисленные пограничные значения оказываются в среднем ближе к данным наблюдений. Отклонение от фактических значений составляет 4 см, в то время как для квадрата сетки № 1 (Чермоз 1) разница показателей достигает 13 см, а для второй ячейки (Чермоз 2) – 5 см со знаком минус. Однако в последние годы заметна тенденция к росту данных наблюдений на станции Чермоз по отношению к информации, содержащейся в массиве ERA 5-Land. В частности, в последние 2 года складывается ситуация, когда данные второго квадрата (Чермоз 2) оказываются ближе к фактическим наблюдениям, чем проинтерполированные значения.

Сезонная изменчивость высоты снежного покрова

Результаты расчета коэффициентов корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land отдельно по месяцам (30 случаев для выборочной совокупности) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land
Table 2. Correlation coefficients between observational data and reanalysis ERA 5-Land

Станция	Месяц								Среднее
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	
Вая	0,62	0,65	0,67	0,78	0,72	0,70	0,79	0,65	0,94
Ныроб	0,70	0,83	0,75	0,65	0,69	0,65	0,70	0,70	0,95
Чердынь	0,89	0,87	0,85	0,82	0,67	0,66	0,77	0,86	0,96
Усть-Черная	**0,27**	0,91	0,77	0,87	0,74	0,72	0,71	0,53	0,95
Гайны	0,64	0,87	0,86	0,87	0,81	0,79	0,79	0,71	0,96
Коса	0,69	0,84	0,87	0,90	0,82	0,81	0,80	0,88	0,96
Кочево	0,74	0,85	0,85	0,84	0,75	0,77	0,75	0,55	0,96
Березники	0,70	0,73	0,84	0,77	0,72	0,70	0,63	0,71	0,94
Кудымкар	0,82	0,77	0,87	0,79	0,83	0,85	0,78	0,82	0,96
Губаха	0,67	0,54	0,63	0,67	0,79	0,74	0,76	0,70	0,95
Бисер	0,84	0,88	0,79	0,76	0,81	0,80	0,69	0,61	0,95
Добрянка	0,63	0,52	0,88	0,83	0,84	0,69	0,65	0,81	0,96
Верещагино	0,86	0,84	0,49	0,86	0,83	0,80	0,63	0,80	0,96
Лысьва	0,79	0,65	0,85	0,84	0,90	0,81	0,65	**0,34**	0,95
Пермь	0,89	0,70	0,92	0,86	0,87	0,84	0,76	0,73	0,97
Кын	0,74	0,57	0,67	0,74	0,63	0,44	0,41	0,36	0,91
Оханск	0,91	0,64	0,83	0,75	0,76	0,73	0,72	0,85	0,96
Б. Соснова	0,81	0,68	0,83	0,82	0,84	0,80	0,67	**-0,07**	0,96
Кунгур	0,88	0,69	0,84	0,78	0,76	0,75	0,86	0,96	0,93
Оса	0,82	0,62	0,77	0,56	0,66	0,61	0,73	0,88	0,91
Ножовка	0,85	0,65	0,81	0,75	0,81	0,77	0,82	0,97	0,95
Чайковский	0,63	0,74	0,82	0,76	0,87	0,68	0,80	0,76	0,96
Чернушка	**0,31**	0,81	0,78	0,70	0,69	0,67	0,73	0,93	0,92
Октябрьский	0,81	0,75	0,76	0,82	0,85	0,82	0,74	0,73	0,96
Чермоз 1	0,83	0,61	0,86	0,76	0,63	0,61	0,78	**0,18**	0,91
Чермоз 2	0,79	0,61	0,87	0,76	0,65	0,59	0,78	**0,19**	0,91
Чермоз среднее	0,81	0,61	0,87	0,76	0,64	0,59	0,78	**0,19**	0,91

Примечание. Жирным шрифтом выделены незначимые величины коэффициентов корреляции.

Оценка значимости для малого числа выборочных случаев выполнена с использованием предложенного Р. Фишером метода зэт (z) для доверительной вероятности 0,95. Метод z основан на том, что между коэффициентом корреляции (r) и показателем z существует определенная

функциональная связь, позволяющая переводить r в z и наоборот: $z \approx \frac{1}{2}\ln\frac{1+r}{1-r}$. Полученную с помощью z величину выборочного порога достоверности коэффициента корреляции сопоставляют по таблице Стьюдента, а затем находят доверительные границы коэффициентов корреляции [1].

Анализ среднего многолетнего сезонного хода высоты снежного покрова с 1990 по 2020 год показывает, что максимальные значения по станционным данным приходятся на март, в то время как в реанализе максимум наступает в феврале, а в марте зафиксировано некоторое снижение средней высоты (рис. 3). В результате в марте наблюдается относительно небольшое (13 %) превышение данных ERA 5-Land над фактическими наблюдениями. В апреле, в период активного снеготаяния, разница становится более значительной. Наибольшие отличия в двух типах данных, несмотря на высокий уровень связи (коэффициент корреляции равен 0,78), наблюдаются в зимние месяцы, в частности в январе.

Рис. 3. Средние многолетние месячные значения высоты снежного покрова по данным станционных наблюдений и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.
Fig. 3. Average long-term monthly values of snow cover height according to the data of station observations and reanalysis of ERA 5-Land for the period 1990-2020.

При более тщательном изучении особенностей сезонного хода высоты снежного покрова отдельно по станциям выявлено, что наступление максимумов исследуемой характеристики в марте согласно фактическим наблюдениям отмечается в 21 пункте из 25. В Перми и Лысьве наибольшие значения высоты снега наблюдаются как в марте, так и феврале, а на станциях Оса и Чайковский максимумы наступают в феврале, после чего высота снежного покрова начинает снижаться. По данным реанализа обратная картина (наибольшие значения в феврале) характерна для 19 пунктов наблюдений, в том числе для Чайковского. В пяти случаях, среди которых Лысьва, отмечается равенство во второй и третий месяцы

зимы, и только для станции Бисер, как и при фактических наблюдениях, максимум наступает в марте. Таким образом, сезонный ход высоты снежного покрова в исследуемых массивах данных полностью совпадает только в трех пунктах наблюдений.

Согласно анализу тесноты связей, можно отметить высокие значения коэффициентов корреляции в течение сезона на станции Кудымкар, которые изменяются от 0,77 до 0,87. Данный пункт наблюдений отличается также наименьшими значениями среднемесячных отклонений (4 см и менее), а в процентном соотношении существенные ошибки (34 %) в Кудымкаре зафиксированы только в мае.

Средняя и даже слабая связь между двумя массивами данных прослеживается на станции Кын. В ноябре коэффициент корреляции составляет 0,57, а относительная ошибка достигает 78 %. В зимние месяцы значения r изменяются от 0,63 до 0,74, а в весенние месяцы связь вновь ослабевает, значение коэффициента корреляции в мае опускается до 0,36, а относительная ошибка в данном пункте наблюдений при этом составляет 144 %. На этом фоне отклонение в 17 % в марте можно считать положительным результатом, который объясняется наступлением в этом месяце периода максимального снегонакопления.

Стоит отметить, что большие значения относительной ошибки являются результатом осреднения данной характеристики по всем месяцам за 30 лет. В отдельные месяцы для разных пунктов наблюдений относительная ошибка может, как отсутствовать, так и достигать четырехзначной величины.

Для большинства станций Пермского края уровень связи в исследуемый период изменяется от среднего до высокого. Например, в Кунгуре и Ножовке в мае коэффициент корреляции имеет значения 0,96 и 0,97 соответственно, в то время как в этот же месяц в Усть-Черной данная характеристика составляет 0,53.

Исследование среднемесячных отклонений показывает, что в период максимального снегонакопления средняя абсолютная ошибка 5 см и менее (относительная ошибка до 10 %) отмечается на 10 станциях. При этом в Кочево зафиксировано полное совпадение данных станционных наблюдений и реанализа. В 10 пунктах наблюдений отклонение составляет 10 см и более, причем на 4 станциях величина ошибки превышает 15 см, достигая максимального значения в Лысьве 23 см (относительная ошибка 39 %).

Общая тенденция, характерная для среднегодовых значений, в марте отчетливо не прослеживается. В частности, для станции Бисер, расположенной на востоке края, среднее превышение в указанном месяце составляет всего 2 см (табл. 1). Стоит отметить, что в текущей версии европейского реанализа отмечается качественное улучшение представления данных по сравнению с реанализом ERA-INTERIM. Результаты сопоставления фактических наблюдений и ERA 5-Land для Бисера в целом

показывают уменьшение величины расхождения по сравнению с расчетами в предыдущем исследовании [3].

Межгодовая изменчивость высоты снежного покрова

В последнем столбце табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land для межгодовой изменчивости (240 случаев для выборочной совокупности). Расчеты произведены для последовательных рядов данных о высоте снежного покрова с октября 1990 по май 2020 года (исключены месяцы, в которых снежный покров отсутствует). Оценка значимости выполнена с использованием критерия Стьюдента для доверительной вероятности 0, 95 [1].

Превышение данных реанализа ERA 5-Land над значениями инструментальных измерений, о котором упоминалось выше, отчетливо прослеживается при исследовании межгодовой изменчивости высоты снежного покрова по всей территории Пермского края (рис. 4). Большая часть экстремумов, наблюдаемых на кривой станционных наблюдений, отображается и на графике реанализа. В холодные периоды 1998–1999, 2005–2006, 2007–2008, 2010–2011, 2016–2017 и 2019–2020 гг. можно видеть некоторое расхождение тенденций.

Рис. 4. Средняя высота снежного покрова на территории Пермского края по данным станционных наблюдений и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.
Fig. 4. Average snow depth on the territory of the Perm Region according to the data of station observations and reanalysis of ERA 5-Land over the 1990–2020 period.

В целом уровень связи между двумя типами данных можно считать очень высоким – коэффициент корреляции изменяется от 0,91 до 0,97. При этом наименьшая величина данной характеристики получена для станций Кын, Оса и Чермоз (0,91), наибольшая – для станции Пермь (0,97). Станция Кын отличается большими значениями средних ошибок

в период с 1990 по 2000 г. – в годовом выражении отклонение составляет минус 17 см. В последующие десятилетия величина ошибки постепенно сокращается. В период 2010–2020 гг. среднегодовая ошибка составляет минус 3 см. Для станции Чермоз также отмечается постепенное уменьшение ошибки в течение 30 лет (данные расчеты актуальны для второго квадрата пространственной сетки). В Перми существенных изменений на протяжении трех десятилетий не наблюдается.

Среди остальных станций можно выделить Осу, для которой величина отклонений тоже постепенно снижается на протяжении трех десятилетий. До 2000 г. среднегодовая ошибка составила минус 12 см, затем ее размер сократился до минус 1 см. Небольшое снижение отмечается для станций Ныроб, Кочево, Ножовка и Октябрьский. В то же время зафиксирован рост величины отклонения в Губахе и Кунгуре. Для последней станции ошибка изменилась от минус 1 до минус 8 см.

Заключение

Сравнение данных наблюдений на метеорологических станциях Пермского края и реанализа ERA 5-Land свидетельствует о повышении качества воспроизведения последним характеристик снежного покрова по сравнению с реанализом ERA-INTERIM. Это связано в первую очередь с увеличением пространственно-временного разрешения представляемой информации в реанализе ERA 5-Land, что привело к уменьшению средней величины ошибки для некоторых пунктов наблюдений. Межгодовая изменчивость снежного покрова в среднем по Пермскому краю также адекватно воспроизводится данным реанализом. Однако при этом необходимо отметить и некоторые особенности, выявленные в настоящем исследовании. В частности, реанализ ERA 5-Land завышает значения высоты снежного покрова по отношению к наблюдениям для большей части метеорологических станций Пермского края. Не выявлено отклонений (в среднем за 30 лет) только на станции Кудымкар. На станциях Оса и Ножовка обнаружено систематическое занижение реанализом показаний инструментальных измерений.

Изменения величины ошибки по территории Пермского края носят в целом меридиональный характер, когда наблюдается прямая зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с запада на восток, за исключением отдельных станций.

Исследование сезонной изменчивости показывает смещение в сторону более раннего наступления максимумов высоты снежного покрова в реанализе ERA 5-Land по отношению к фактическим значениям. Анализ метеорологических наблюдений, в том числе и снегомерных съемок, на станции Чермоз с использованием информации, содержащейся в реанализе ERA 5-Land, требует индивидуального подхода из-за особенностей физико-географического положения указанного пункта наблюдений.

Список литературы

1. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.

2. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Свиязов Е.М.* Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 57-68.

3. *Крючков А.Д.* Верификация характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA-INTERIM и метеорологических станций Пермского края за 1978–2018 гг. // Цифровая география: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 2020. Т. 1. С. 390-393.

4. *Крючков А.Д.*, *Истомина О.В.* Динамика снежного покрова на территории Пермского края за период 1988–2018 гг. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. Вып. 2. С. 243-251.

5. Метеорологические ежемесячники. 1990–2020 гг. Ч. 2. Вып. 9. № 1-5, 10-13.

6. Метеорологическая станция в г. Чермоз. Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс] URL: http://meteo.perm.ru/ meteostantsii-permskogo-kraya/37-meteorologicheskaya-stantsiya-v-g-chermoz (Дата обращения 06.02.2021).

7. *Попова В.В.*, *Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В.*, *Китаев Л.М.* Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 73-86.

8. *Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Раритет-Пермь, 2014. 296 с.

9. *Турков Д.В.*, *Сократов В.С.* Расчет характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56, № 3. С. 369-380.

10. *Хан В.М.* О статистических связях глубин снежного покрова с приземной температурой воздуха над территорией северной Евразии // Труды научного семинара НАН Украины и РФФИ «Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования», 5–7 октября 2011 г., Киев. С. 47-56.

11. *Хан В.М.*, *Рубинштейн К.Г.*, *Шмакин А.Б.* Сравнение сезонной и межгодовой изменчивости снежного покрова в бассейнах рек России по данным наблюдений и реанализов // Известия РАН, ФАО. 2007. Т. 43, № 1. С. 69-80.

12. *Brown R.D.*, *Derksen C.* Is Eurasian October snow cover extent increasing? // Environ. Research Letters. 2013. No. 8. P. 024006.

13. *Brun E.*, *Peings Y,*, *Vionnet V.*, *Boone A.*, *Decharme B.*, *Douville H.*, *Karbou F., Morin S.*. Using reanalyses for studying past Eurasian snow cover and its relationship with circulation variability // ECMWF-WWRP/THORPEX Workshop on Polar Prediction, 24–27 June 2013, 10 p.

14. *Brun E.*, *Vionne V.*, *Boone A.*, *Decharme B.*, *Peings Ya.*, *Valette R.*, *Karbou F.*, *Morin S.* Simulation of Northern Eurasian Local Snow Depth, Mass, and Density Using a Detailed Snowpack Model and Meteorological Reanalyses // Journ. of Hydrometeorology. 2013. No. 14. P. 203-219.

15. *Muñoz Sabater J.* ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (<date of access>). 2019. 10.24381/cds.68d2bb30.

16. *Khan V.*, *Holko L.*, *Rubinstein K.*, *Breiling M.* Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2008. Vol. 47. P. 1819-1833.

References

1. *Isaev A.A.* Statistica v meteorologii i climatologii. Moscow: Moscow State University, 1988. 248 p. [in Russ.].

2. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M.* Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol*. 2015, vol. 40, no. 11, pp. 749-757. DOI: 10.3103/S1068373915110059.

3. *Kryuchkov A.D.* Verification of snow cover characteristics according to data of ERA-INTERIM reanalysis and meteorological stations of Perm region for 1978-2018. Digital geography proceedings of the All-Russian scientific practical conference with international participation in 2 vols. Perm, 2020, vol. 1, pp. 390-393. [in Russ.].

4. *Kryuchkov A.D.*, *Istomina O.V.* Snow cower dynamic on the territory of the Perm region in the 1988–2018 period. *Bulletin of Udmurt University*. Series Biology. Earth Sciences, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 243-251. [in Russ.].

5. Meteorologicheskie ezhemesyachniki. 1990–2020. Vol. 9 (2), no. 1-5, pp. 10–13. [in Russ.].

6. Meteorologicheskaya stanziya v g. Chermoz. Perm Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Available at: http://meteo.perm.ru/ meteostantsii-permskogo-kraya/37-meteorologicheskaya-stantsiya-v-g-chermoz (<date of access 06.02.2021>). [in Russ.].

7. *Popova V.V.*, *Morozova P.A.*, *Titkova T.B.*, *Semenov V.A.*, *Cherenkova E.A.*, *Shiryaeva A.V.*, *Kitaev L.M.* Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led i Sneg* [*Ice and Snow*], 2015, vol. 55, no. 4, pp. 73-86. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86. [in Russ.].

8. *Pyankov S.V., Shikhov A.N.* Opasnye gidrometeorologicheskie yavlenya: rezhim, monitoring, prognoz. Perm, Raritet-Perm, 2014, 296 p. [in Russ.].

9. *Turkov D.V.*, *Sokratov V.S.* Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region). *Led i Sneg* [*Ice and Snow*], 2016, vol. 56, no. 3, pp. 369-380. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380. [in Russ.].

10. *Khan V.M.* Statistical links of snow cover depths with surface air temperature over the territory of northern Eurasia: Tre. Scientific. "Problems and Achievements of Long-Term Meteorological Forecasting" at the NationalGs of Ukraine and RFFI, October 5–7, 2011, pp. 47-56. [in Russ.].

11. *Khan V.M.*, *Rubinshtein K.G.*, *Shmakin A.B.* Comparison of seasonal and interannual variability of snow cover in Russian watersheds according to observations and reanalyses. *Izv., Atmos. Oceanic Phys*., 2007, vol. 43, no. 1, pp. 59-69. DOI: 10.1134/S0001433807010070.

12. *Brown R.D.*, *Derksen C.* Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environ. Research Letters*., 2013, no. 8, pp. 024006. DOI: 10.1088/17489326/8/2/024006.

13. *Brun Eric*, *Peings Yannick*, *Vionnet Vincent*, *Boone Aaron*, *Decharme Bertrand*, *Douville Herv´e*, *Karbou Fatima* and *Morin Samuel.* Using reanalyses for studying past Eurasian snow cover and its relationship with circulation variability. ECMWF-WWRP/THORPEX Workshop on Polar Prediction, 24–27 June 2013, 10 p.

14. *Brun E.*, *Vionne V.*, *Boone A.*, *Decharme B.*, *Peings Ya.*, *Valette R.*, *Karbou F.*, *Morin S.* Simulation of Northern Eurasian Local Snow Depth, Mass, and Density Using a Detailed Snowpack Model and Meteorological Reanalyses. *Journ. of Hydrometeorology*, 2013, no. 14, pp. 203–219.

15. *Muñoz Sabater J.* ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019. DOI: 10.24381/cds.68d2bb30.

16. *Khan V.*, *Holko L.*, *Rubinstein K.*, *Breiling M.* Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data. *J. Appl. Meteorol. Climatol*, 2008, vol. 47, pp. 1819–1833.

Поступила 03.03.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 03.03.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-111-137
УДК 632.112:633.1+551.85

Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа

А.И. Страшная, О.В. Береза, П.С. Кланг

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

Приведены результаты исследований влияния агрометеорологических условий на урожайность зерновых и зернобобовых культур. Показана роль культуры земледелия в повышении урожайности и значение метеорологических факторов в изменчивости и колебаниях урожайности. Рассчитана повторяемость засух различной интенсивности в субъектах округа в 2001–2020 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. Установлена тесная связь вегетационного индекса NDVI с урожайностью зерновых культур. Рассчитана средняя многолетняя динамика NDVI по неделям вегетации, что позволяет оценивать условия формирования урожайности в конкретном году по сравнению со средними многолетними. Определены периоды наиболее эффективного использования NDVI в прогнозах урожайности. Представлены разработанные регрессионные модели для прогнозирования урожайности на основе совместного использования наземных и спутниковых данных.

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

Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District

A.I. Strashnaya, O.V. Bereza, P.S. Klang

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

The results of research on the effect of agrometeorological conditions on the yield of grain and leguminous crops are presented. The role of farming culture in increasing productivity and the importance of meteorological factors in the yield variability are demonstrated. The frequency of droughts of various intensities in the subjects of the Southern Federal District in 2001–2020 is calculated as compared to 1981–2000. The NDVI vegetation index highly correlates with the grain crop yield. The average long-term dynamics of NDVI for the vegetation weeks is calculated, which allows assessing conditions for the yield formation in a particular year in comparison with the average long-term ones. The periods of the most effective use of NDVI in yield forecasts are determined. The developed regression models for yield forecasting based on the joint use of ground-based and satellite data are presented.

Keywords: agrometeorological conditions, drought, grain crops, yield, satellite information, forecast

Производство зерна в Российской Федерации в настоящее время является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей сельского хозяйства. Об этом свидетельствуют данные Росстата о росте фактической урожайности и валовых сборов зерна на преобладающей территории регионов страны. В полной мере это относится и к Южному федеральному округу, выделившемуся в 2000 году из Северо-Кавказского федерального округа в составе: Краснодарский край, Астраханская, Волгоградская, Ростовская области и две республики – Калмыкия и Адыгея. В 2014 году в состав округа вошла Республика Крым. Территория округа является одним из наиболее благоприятных в почвенно-климатическом отношении регионов для производства зерна. Однако колебания урожайности и валовых сборов зерна характерны и для субъектов этого округа, особенно для востока территории, где нередки засухи, которые являются основной причиной снижения урожайности [3, 4, 9, 13, 16, 23, 26, 27]. Различия условий увлажнения наблюдаются не только в целом по региону, оно проявляется и внутри субъектов. В то же время обилие тепла и света на всей территории округа позволяет возделывать широкий набор зерновых и зернобобовых культур (далее зерновых) – от ранних яровых зерновых культур и зимующих озимых до поздних теплолюбивых.

Зерновые культуры в округе занимают площадь около 9,0 млн га (в 2020 году – 9,2 млн. га). На больших площадях в регионе возделываются озимые культуры – пшеница, ячмень, рожь, тритикале (около 7,0 млн га), остальные площади занимают ранние яровые зерновые культуры – яровой ячмень и яровая пшеница, овес, горох, а также поздние яровые – кукуруза, рис, просо, гречиха, соя, из которых на площади около 0,8 млн га возделывается кукуруза. Главной зерновой культурой является озимая пшеница, которая дает до 70–75 % валового сбора зерна, собираемого в округе.

Южный федеральный округ (далее ЮФО) играет важнейшую роль в обеспечении продовольственной безопасности Российской Федерации, так как в этом регионе выращивается до 26–27% общероссийского валового сбора зерновых культур [24]. Весьма существенна роль округа в объеме экспорта зерна. Для намечаемого увеличения экспорта зерна необходимо обеспечить дальнейший рост урожайности и стабильность производства зерна [24]. Агрометеорологические прогнозы урожайности зерновых культур, составляемые с большой заблаговременностью, способствуют более точному планированию ожидаемых объемов зерна как для внутреннего потребления, так и для возможных объемов экспорта. Составляемые в настоящее время прогнозы урожайности преимущественно базируются на методах, основой которых являются наземные данные наблюдений гидрометстанций [5, 11]. В связи с недостаточностью

этих данных по ряду культур, входящих в группу зерновых, а также в связи с внедрением в производство новых более продуктивных сортов интенсивного типа, оправдываемость прогнозов в отдельные годы бывает низкой. В связи с развитием методов и технологий спутникового мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур и возможностью получения данных спутниковых измерений в оперативном режиме (или в режиме реального времени), а также архива данных в среде созданного в ИКИ РАН специализированного веб-сервиса «ВЕГА» [1, 6, 12] в последнее десятилетие появилась возможность разработки новых методов количественной оценки состояния посевов и методов прогнозирования урожайности с использованием спутниковых данных [2, 5, 6, 10, 15, 21].

В данной работе в рамках выполнения темы 1.1.7 «Разработка и усовершенствование методов агрометеорологических прогнозов для субъектов федеральных округов Российской Федерации» Направления 1 «Методы, модели и технологии гидрометеорологических расчетов и прогнозов» Плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета на 2021 год была поставлена задача разработать метод прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах ЮФО с использованием наземных наблюдений гидрометстанций Росгидромета и спутниковых данных. Для ее решения была сформирована база метеорологических данных: рассчитанные по субъектам средняя температура воздуха по месяцам вегетационного периода – апрель, май, июнь, июль, количество осадков и гидротермические коэффициенты увлажнения за эти же месяцы, а также средние гидротермические коэффициенты увлажнения за май–июнь и май–июль за период 2001–2020 гг. По отдельным субъектам использовались запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в декаду начала активной вегетации. Для характеристики состояния растений по данным спутниковых измерений использовался наиболее распространенный спутниковый индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по неделям вегетации, который доступен на сервисе ВЕГА-PRO [18]. Использовалась также средняя по субъектам урожайность зерновых культур (с убранной площади) по данным Росстата за тот же период.

Как показал проведенный нами анализ урожайности зерновых культур, во всех субъектах округа в последние 10–15 лет наблюдалась хорошо выраженная тенденция роста урожайности. Этому способствовало внедрение в производство новых, выведенных отечественными селекционерами более продуктивных и адаптированных к местным условиям сортов, а также применение инновационных технологий возделывания зерновых культур, т. е. рост культуры земледелия [7, 14, 17]. Однако на фоне роста урожайности вследствие повышения культуры земледелия, описываемого обычно линией тренда, колебания ее вследствие погодных условий конкретных лет остаются значительными. Наши исследования и проведенные расчеты тенденций урожайности зерновых культур показали, что темпы

увеличения урожайности в субъектах округа были различными. Наиболее быстрыми темпами в рассматриваемый нами период (2001–2020 гг.) урожайность зерновых культур увеличивалась в Краснодарском крае, где средний погодичный прирост урожайности составлял 0,94 ц/га. Несколько медленнее (со скоростью 0,63 ц/га/год) урожайность росла в Ростовской области. В Волгоградской области и в Республике Калмыкия погодичный прирост урожайности составил 0,30 ц/га и 0,24 ц/га соответственно, а в Республике Крым всего 0,06 ц/га. Колебания урожайности по абсолютной величине в субъектах были различными, однако в благоприятные по погодным условиям годы, особенно по условиям увлажнения, максимальная урожайность в рассмотренный период почти во всех субъектах превышала минимальную в два – два с половиной раза (таблица 1).

Таблица 1. Изменчивость урожайности зерновых культур в субъектах ЮФО (2001–2020 гг.)
Table 1. Variability of grain crop yields in the subjects of the Southern Federal District (2001-2020)

Территория	Урожайность, ц/га							Коэф-т вариации *V*
	максимальная	Год	минимальная	Год	Экстремальные отклонения от тренда		СКО	
					+	–		
Волгоградская область	26,9	2017	12,0	2010	6,19	7,04	3,78	0,22
Ростовская область	40,4	2017	17,8	2003	8,49	7,35	5,82	0,21
Краснодарский край	57,4	2017	31,0	2003	7,33	8,91	7,40	0,16
Республика Калмыкия	25,6	2016	13,2	2003	4,89	5,77	3,63	0,20
Республика Крым	31,9	2011	14,5	2003	9,66	7,66	4,81	0,22

При этом значительные различия в величине урожайности наблюдались даже в смежные годы, когда культура земледелия обычно меняется мало и, следовательно, изменение/снижение урожайности происходит в основном за счет погодных условий. Чаще всего в южных регионах России резкое снижение урожайности зерновых культур происходит вследствие засушливых условий в первую половину вегетационного периода [16, 22, 25, 26]. Так, например, в Волгоградской области в засушливом 2007 году средняя урожайность зерновых культур составила 17,8 ц/га, а в смежном 2008 году, благоприятном по условиям увлажнения – 24,6 ц/га,

в 2015 году – 17,3 ц/га, а в 2016 году – 24,0 ц/га. В Ростовской области в засушливом 2018 году урожайность была 31,9 ц/га, а в 2017 году – 40,4 ц/га, в Республике Крым в засушливом 2018 году – 15,6 ц/га, а в 2019 году – 26,6 ц/га. Это хорошо отражает динамика NDVI в эти годы, приведенная нами для примера по Республике Крым на рис. 1.

Рис. 1. Динамика NDVI (озимые культуры) по Республике Крым в 2018 и 2019 гг.
Fig.1. Dynamics of NDVI (winter crops) in the Republic of Crimea in 2018 and 2019.

Сильная засуха в Республике Крым, начавшаяся в апреле, способствовала ухудшению состояния растений уже в конце этого месяца. Максимальное значение NDVI, характеризующее состояние посевов, в связи с засушливыми условиями составило всего около 0,66 и наблюдалось уже в 16-ю неделю вегетации, тогда как в благоприятный 2019 год максимальное значение NDVI было около 0,74 и наблюдалось позднее – в 19-ю неделю вегетации.

Аналогичные примеры можно приводить и по другим субъектам. Кроме того, следует отметить, что максимальная урожайность в субъектах округа, где сосредоточены основные площади зерновых культур (Краснодарский край, Ростовская и Волгоградская области) была получена в благоприятном по условиям увлажнения 2017 году (табл. 1), а минимальная урожайность во всех субъектах (кроме Волгоградской области) в 2003 году, когда сильная засуха наблюдалась в основной период вегетации зерновых культур (май–июнь) практически на всей территории округа. В Волгоградской области минимальная за рассматриваемый период урожайность получена в 2010 году, когда засуха в этой области на фоне аномально жаркой погоды была очень сильной и наиболее продолжительной, как и на территории всего Поволжья.

В годы засух, которые чаще всего наблюдаются в условиях повышенного температурного режима, развитие растений (темпы прохождения фенологических фаз) ускоряется, что отрицательно сказывается на преобладающих на этой территории озимых культурах (пшеница). Так, например, в 2018 году дефицит осадков наблюдался на всей территории округа и в апреле, и в мае. По данным гидрометстанций, оценки состояния озимой пшеницы на многих полях уже во второй декаде мая понизились до удовлетворительных (рис. 2а); а в ряде юго-восточных районов Ростовской, южных районов Волгоградской областей, западных районов Республики Калмыкия и в северных районах Республики Крым – и до плохих.

а)

б)

в)

Рис. 2. Ухудшение состояния растений при дефиците осадков в 2018 году: фазы развития и оценки состояния озимой пшеницы во 2-й декаде мая 2018 г. (а); отклонение значений NDVI озимых культур в 2018 г. от значений NDVI в 2017 г., достигнутых к 21-й неделе вегетации (б); запасы влаги под озимыми зерновыми культурами в слое почвы 0–100 см за 2-ю декаду мая 2018 г. (в).

Fig. 2. Deterioration of plants with a shortage of precipitation in 2018: phases of winter wheat development and assessment in the 2-nd decade of May 2018. (a); Deviation of the NDVI values of winter crops in 2018 from the NDVI values in 2017, achieved by the 21-st week of vegetation. (б); moisture reserves under winter grain crops in the soil layer of 0-100 cm for the 2nd decade of May 2018 (в).

Ухудшение состояния растений вполне адекватно отражалось и по данным спутниковых измерений (рис. 2б). Во многих этих районах к атмосферной засухе присоединилась почвенная засуха: запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы понизились до 45–50 мм, а на отдельных полях они были менее 40 мм (рис. 2в), что соответствует критерию сильной почвенной засухи.

Количество осадков в апреле в среднем по субъектам составляло в основном от 31 до 51 %, в Республике Крым их почти не было – выпало лишь около 10 % нормы осадков. Почти таким же дефицит осадков (от 30 % до 63% нормы) наблюдался в мае, средняя температура воздуха в этом месяце превышала норму на 2–3 °С. Гидротермический коэффициент увлажнения в апреле ($ГТК_4$) был в основном 0,10–0,50, что соответствует очень сильной и сильной засухе, лишь в Краснодарском крае 0,69 и в Волгоградской области 0,74 (средняя засуха).

Период апрель–май на юге округа, а май–июнь – в северных районах является «критическим» периодом для озимых культур по отношению к условиям увлажнения. В этот период происходит закладка колосков в колосе и формирование колоса. Неблагоприятным было преобладание жаркой погоды, особенно в мае, когда дневная температура воздуха в большинстве дней первой и третьей декад мая и в отдельные дни во второй декаде повышалась до 29…33 ºС, а в третьей декаде на востоке региона почти до 34…39 ºС. Средняя температура воздуха за эти декады на 2–5 ºС превышала норму. Темпы прохождения фаз развития растений ускорялись. Это хорошо заметно на рис. 3, где по данным ИКИ РАН показана динамика вегетационного индекса NDVI (наиболее распространенного показателя, характеризующего состояние посевов), в засушливом 2018 г. по сравнению с умеренно (достаточно) влажным 2017 г. На рис. 3 указаны и даты наступления основных фенологических фаз развития пшеницы в эти годы по данным гидрометстанции Гигант (юг Ростовской области).

Рис. 3. Динамика NDVI по неделям вегетации озимой пшеницы в Ростовской области и фазы развития (гидрометстанция Гигант) в 2017 и 2018 гг.
Fig. 3. Dynamics of NDVI by winter wheat vegetation weeks in the Rostov Region and the development phase (Gigant Hydrometeorological Station) in 2017 and 2018.

Так, фаза «выход в трубку» озимой пшеницы в 2017 г. на наблюдательном участке гидрометстанции Гигант отмечалась 6 апреля, а в засушливом 2018 году – 2 апреля, фаза «колошение», соответственно, 14 мая и 8 мая, «цветение» – 28 мая и 18 мая, т. е. «критический» период

для развития растений «выход в трубку – цветение» из-за ускоренного развития в условиях засухи и повышенной температуры воздуха в 2018 г. был существенно (на шесть дней) короче, чем в 2017 г. Оценки состояния пшеницы в конце второй декады мая понизились до удовлетворительных как в районе деятельности гидрометстанции Гигант, так и в ряде других районов, особенно на востоке Южного федерального округа (рис. 2 а,б). Значение индекса NDVI в Ростовской области в 2018 г., достигнув максимума 0,795 в 19-ю неделю вегетации, уже в 21-ю неделю начало резко уменьшаться, тогда как при достаточном увлажнении в 2017 г. максимальное значение NDVI наблюдалось на две недели позже (рис. 3), и его величина почти на 0,50 была больше (0,843).

Жаркая и засушливая погода наблюдалась в 2018 г. на большей части территории ЮФО и в июне ($ГТК_6$ составлял в основном 0,33–0,42, в Волгоградской области, где осадков в основном практически не было, он был 0,04, лишь в Краснодарском крае – 0,63). Положительная аномалия температуры воздуха наблюдалась в большинстве дней июня и в среднем за месяц составила 2–4 °С. Поэтому существенное различие значений NDVI сохранялось и в последующей период, когда наблюдался налив зерна. Средний ГТК за май–июнь ($ГТК_{5–6}$) в Ростовской области составил 0,42. Период налива зерна резко сократился, ускорилось и созревание зерна. Молочная спелость в 2018 г., по данным ГМС Гигант, наблюдалась 2 июня (рис. 3), а восковая спелость уже 18 июня, тогда как в 2017 г. эти фазы отмечались значительно позднее – 12 и 28 июня. Абсолютный вес зерна (масса 1000 зерен в 2018 г.) был значительно меньше обычного около 35 г). В таких условиях урожайность зерновых культур в Ростовской области в 2018 г. составила 79 % от величины урожайности в 2017 г., в Волгоградской области она была на 28 % меньше, чем в 2017 г., в Республике Крым – на 47 %. Лишь в Краснодарском крае различие в величине урожайности в эти годы было существенно меньше – около 10 %.

На рис. 4 показана динамика урожайности зерновых культур и динамика гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь ($ГТК_{5-6}$) за период 2001–2020 гг. в Краснодарском крае (рис. 4а) и Волгоградской области (рис. 4б), где уровень урожайности и условия увлажнения значительно различаются, но хорошая согласованность отклонений урожайности от трендов и $ГТК_{5-6}$ наблюдается в обоих субъектах, особенно в Волгоградской области (коэффициент корреляции между урожайностью и $ГТК_{5-6}$ составил 0,82).

В Краснодарском крае, где самая высокая в округе средняя урожайность этих культур, а также наибольшая изменчивость урожайности (СКО = 7,40), хорошо выражен положительный тренд урожайности ($R^2 = 0,63$) вследствие культуры роста земледелия (линия тренда 1). В среднем за период в крае наблюдалось и существенное улучшение условий увлажнения: $ГТК_{5-6}$ от значений 1,04 в начале периода увеличил-

ся к концу его до 1,47 (линия 2). Из этого следует, что значительному росту урожайности в крае за период 2001–2020 гг. (на 18,85 ц/га) способствовало два фактора: рост культуры земледелия и улучшение условий увлажнения. В Волгоградской области рост урожайности (линия тренда 1) был выражен слабее ($R^2 = 0,26$), урожайность увеличилась за период лишь на 6,02 ц/га, а условия увлажнения не улучшались (линия тренда 2), а напротив, отмечалось даже некоторое уменьшение $ГТК_{5-6}$: от 0,66 в начале периода до 0,62 в конце его.

Рис. 4. Динамика урожайности зерновых и зернобобовых культур и динамика гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь ($ГТК_{5-6}$ за период 2001–2020 гг. в Краснодарском крае (а) и Волгоградской области (б).

Fig. 4. Dynamics of grain and leguminous crops yield and dynamics of hydrothermal humidification coefficient for May-June (GTK_{5-6} for the period 2001-2020 in the Krasnodar Region (a) and in the Volgograd Region (б).

Аналогичные графики за период 2001–2020 гг. были построены и для других субъектов округа. Результаты анализа изменений урожайности по всем субъектам округа приведены в табл. 2.

Для сравнительной характеристики динамики урожайности за более ранний период (1981–2000 гг.) и условий увлажнения аналогичные графики строились также по всем субъектам округа. Результаты анализа также приведены в табл. 2. Оказалось, что если в период 2001–2020 гг. во всех субъектах округа урожайность увеличивалась, то в период 1981–2000 гг. в большинстве субъектов она уменьшалась в разной степени, и лишь в Республике Калмыкия и Ростовской области наблюдаюсь некоторое увеличение урожайности в среднем от начала к концу периода. Условия увлажнения за период 2001–2020 гг. при наблюдавшемся росте урожайности в среднем несколько улучшились ($ГТК_{5-6}$ увеличился от начала к концу периода на 0,09–0,29, в Краснодарском крае на 0,43), в 1981–

2000 гг. условия увлажнения также в среднем несколько улучшились ($ГТК_{5-6}$ увеличился от 0,07 в Республике Крым до 0,14 в Волгоградской области), хотя урожайность в основном снижалась (табл. 2, 3). Основной причиной снижения урожайности в этот период являлось снижение культуры земледелия, обусловленное ухудшением материально-технического обеспечения хозяйств в условиях структурной перестройки в сельскохозяйственной отрасли в 1991–1999 годах.

Таблица 2. Изменение урожайности зерновых культур в субъектах ЮФО в периоды 1981–2000 и 2001–2020 гг.
Table 2. Change in the yield of grain crops in the subjects of the Southern Federal District in the periods of 1981-2000 and 2001-2020.

Территория	**Урожайность (ц/га) по тренду: 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.**					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	14,32	12,38	-1,94	16,19	22,21	6,02
Ростовская область	19,67	20,48	0,81	21,25	33,91	12,66
Краснодарский край	36,01	33,75	-2,26	37,92	56,77	18,85
Республика Калмыкия	11,25	13,82	2,57	15,03	22,22	7,19
Республика Крым	32,91	22,18	-10,73	21,65	22,78	1,13

Таблица 3. Изменение условий увлажнения ($ГТК_{5-6}$) в субъектах ЮФО в периоды 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.
Table 3. Change in humidification conditions (GTK_{5-6}) in the subjects of the Southern Federal District during the periods of 1981-2000 and 2001-2020.

Территория	**Значения $ГТК_{5-6}$ по тренду: 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.**					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	0,67	0,81	0,14	0,66	0,62	-0,04
Ростовская область	0,79	0,92	0,13	0,79	0,88	0,09
Краснодарский край	1,26	1,31	0,05	1,04	1,47	0,43
Республика Калмыкия	0,63	0,64	0,01	0,76	0,62	-0,13
Республика Крым	0,74	0,81	0,07	0,77	1,06	0,29

Для более детальной характеристики условий увлажнения в субъектах округа нами были рассчитаны риски (вероятность, %) атмосферных засух различной интенсивности по указанным выше периодам (1981–2000 и 2001–2020 гг.) в основной период вегетации (май–июнь). Использовались при этом средние значения ГТК за эти месяцы ($ГТК_{5-6}$). Согласно критериям, принятым в агрометеорологической практике Росгидромета, очень сильная засуха характеризовалась значением ГТК ≤ 0,30, сильная – 0,31–0,60 и средняя – 0,61–0,80 (табл. 4). Слабые засухи не выделялись, так как их влияние на урожайность зерновых культур сказывалось обычно незначительно.

Таблица 4. Риски (вероятность, %) очень сильных ($ГТК_{5-6}$≤0,30), сильных ($ГТК_{5-6}$=0,31–0,60) и средних ($ГТК_{5-6}$=0,61–0,80) атмосферных засух в субъектах ЮФО за период 1981–2020 гг.
Table 4. Risks (probability,%) of very strong (GTK_{5-6}≤0,30), strong (GTK_{5-6} = 0,31-0,60) and medium (GTK_{5-6} = 0,61-0,80) atmospheric droughts in the subjects of the Southern Federal District for the period 1981-2020.

Территория	1981–2000 гг.						2001–2020 гг.					
	$ГТК_{5-6}$ ≤0,30		$ГТК_{5-6}$ 0,31–0,61		$ГТК_{5-6}$ 0,61–0,80		$ГТК_{5-6}$ ≤0,30		$ГТК_{5-6}$ 0,31–0,61		$ГТК_{5-6}$ 0,61–0,80	
	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%
Волгоградская область	3	15	6	30	2	10	2	10	5	25	8	40
Ростовская область	0	0	4	20	4	20	0	0	6	30	3	15
Краснодарский край	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	3	15
Республика Калмыкия	0	0	12	60	2	10	1	5	3	15	3	15
Республика Крым	0	0	7	35	3	15	2	10	2	10	6	30

Примечание. ч.с. – число случаев

Анализируя таблицу, можно видеть, что в первом периоде в большинстве субъектов (кроме Волгоградской области) очень сильных засух (ГТК ≤ 0,30) не наблюдалось, тогда как во втором периоде одна – две засухи такой интенсивности наблюдались во всех субъектах, за исключением Ростовской области. Сильных засух существенно больше было в первом периоде (по сравнению со вторым периодом) лишь в республиках Крым и Калмыкия. В Волгоградской области вероятность сильных засух в первом периоде была на 5 % больше, чем во втором, и составляла 30 %, в Ростовской области во втором периоде таких засух было больше на 10 %, а в Краснодарском крае засух такой интенсивности не было (табл. 4). При этом нельзя не отметить, что сильные засухи в первом периоде (1981–2000 гг.) были более продолжительными и обширными (1981,1995, 1998, 1999 гг.), чем во втором периоде (2003, 2007, 2009,

2018 гг.), что, на наш взгляд, явилось дополнительным фактором, оказавшим негативное влияние на урожайность зерновых культур в этот период. Исключение составила лишь жестокая засуха 2010 г., однако такая засуха в 2010 г. наблюдалась в основном только в Волгоградской области. Повторяемость засух средней интенсивности в большинстве субъектов округа во втором периоде была больше на 5–15 % (в Волгоградской области на 30 %), чем в первом периоде, лишь в Ростовской области она была меньше. Таким образом, можно констатировать, что изменение условий увлажнения и влияние засух на урожайность зерновых культур в субъектах ЮФО в разные периоды проявлялось по-разному, в значительной степени – в зависимости от культуры земледелия в том или ином временном интервале, меняющихся агроклиматических условий, а также рисков засух, что необходимо учитывать в земледелии [28].

При анализе теплообеспеченности зерновых культур в основной период вегетации выявилось существенное различие и этого фактора по периодам (1981–2000 и 2001–2020 гг.). Так, во всех субъектах округа наиболее значительный рост средней температуры воздуха за май–июнь (T_{5-6}) наблюдался во втором периоде (2001–2020 гг.), когда значение T_{5-6} от начала к концу периода увеличилось в большинстве субъектов на 2,43–2,61 °С (табл. 5) и лишь в Республике Крым на 1,9 °С.

Таблица 5. Изменение средней за май-июнь температуры воздуха (T_{5-6}) в субъектах ЮФО в 1981-2020 гг.
Table 5. Change in the average May-June air temperature (T_{5-6}) in the Southern Federal District in 1981-2020

Территория	Температура воздуха, °С					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	18,31	18,30	-0,01	17,61	20,04	2,43
Ростовская область	18,49	18,32	-0,18	18,03	20,57	2,54
Краснодарский край	17,96	18,36	0,40	18,12	20,73	2,61
Республика Калмыкия	19,94	18,85	-1,09	18,35	21,73	3,38
Республика Крым	17,09	17,96	0,88	17,94	19,84	1,90

В период 1981–2000 гг. небольшой рост T_{5-6} наблюдался лишь в Краснодарском крае (на 0,40 °С за период) и в Республике Крым (на 0,88 °С). В остальных субъектах отмечалось даже некоторое снижение температуры от начала к концу периода (на 0,01–1,09 °С). В целом за весь период (1981–2020 гг.) тренд средней температуры воздуха за май–июнь

(T_{5-6}) был положительным во всех субъектах: от начала к концу этого периода T_{5-6} увеличилась на 1,35–1,92 °С, в Республике Крым и Краснодарском крае – на 2,71 и 2,60 °С соответственно.

Сопоставляя полученные данные о температурном режиме и условиях увлажнения в основной период вегетации (май–июнь), можно сделать следующий вывод: в период 1981–2000 гг. при слабо выраженном улучшении условий увлажнения (слабом росте $ГТК_{5-6}$ от начала к концу периода) роста T_{5-6} в среднем не наблюдалось, за исключением юго-западных районов округа (Республика Крым и Краснодарский край), где в среднем за период наблюдалось некоторое увеличение T_{5-6} на 0,88 и 0,40 °С соответственно. В 2001–2020 гг. лишь в Республике Крым и Краснодарском крае, как отмечалось выше (табл. 3), наблюдалось некоторое улучшение условий увлажнения (рост значений $ГТК_{5-6}$ в среднем за период на 0,29 и 0,43). На остальной территории существенных изменений $ГТК_{5-6}$ в среднем не выявлено, однако во всех субъектах округа наблюдался значительный рост температуры: значения T_{5-6} увеличились в основном на 2,43–2,61 °С, т. е. при слабо выраженных (в среднем) изменениях условий увлажнения в обоих периодах значительные различия наблюдались в динамике температуры в мае–июне, а именно только период 2001–2020 гг. характеризовался значительным ростом средней за эти месяцы температуры воздуха. Сложившуюся тенденцию в хозяйствах необходимо учитывать при выборе сортов, а также сроков сева, особенно яровых зерновых культур.

Выше нами было показано (на примере озимой пшеницы в Ростовской области, гидрометстанция Гигант), что динамика NDVI в разные по условиям увлажнения годы, значительно отличалась. Ускорение в развитии в жаркий и засушливый 2018 г. отрицательно сказывалось на продуктивности растений, так как сокращался период формирования колоса и налива зерна. Засушливые условия в мае–июне не только снижают продуктивность колоса [20, 23, 26, 27], но и приостанавливают увеличение вегетативной массы растений и вызывают щуплость зерна [8]. Для учета особенностей (или аномалий) в развитии растений в ИКИ РАН предложен способ оценки состояния посевов как на качественном уровне (хуже/лучше), так и по алгоритму, позволяющему в автоматизированном режиме рассчитывать величины относительного отклонения текущей динамики вегетационного индекса NDVI от «средней многолетней нормы», которое можно выразить в процентах [25]. Понятно, что для каждого района и типа растительности (культуры) при этом необходимо рассчитывать «свои» средние многолетние значения NDVI по неделям или периодам вегетации.

Нами для этих целей были рассчитаны средние многолетние (за 2001–2020 гг.) значения NDVI (по озимым культурам) по неделям вегетации для каждого субъекта ЮФО. В качестве примера, средняя многолетняя динамика NDVI за период 2001–2020 гг. приведена

по Волгоградской области в сравнении с динамикой NDVI в очень засушливый 2010 год (рис. 5). Можно видеть, что уже с 14-й недели вегетации наблюдается отрицательное отклонение значений NDVI в 2010 г. по сравнению с «нормой», что указывает на существенное ухудшение состояние посевов озимых по сравнению с обычным (нормой) по значениям NDVI. При этом максимальное значение NDVI наблюдалось в 2010 г. уже в 19-ю неделю, тогда как в среднем (по норме) оно приходится на 21-ю неделю. Построенные графики при совместном использовании их с данными наблюдений ГМС позволяют более адекватно оценивать состояние посевов в каждую неделю или декаду вегетации в оперативном режиме.

Рис. 5. Средняя многолетняя динамика NDVI за период 2001–2020 гг. и динамика NDVI в 2010 г. по Волгоградской области.
Fig.5. The average long-term dynamics of NDVI for the period 2001-2020 and the dynamics of NDVI in 2010 in the Volgograd Region.

Проведенный анализ временных рядов урожайности зерновых культур показывает, что рост урожайности, характерный для периода 2001–2020 гг., во всех субъектах округа был наиболее значительным в последние пять лет, когда в хозяйствах наиболее широко использовалась интенсивная технология возделывания этих культур и внедрялись новые более продуктивные сорта, выведенные отечественными селекционерами [7, 17]. В связи с этим, в изменившихся погодно-климатических условиях и культуры земледелия при составлении агрометеорологических прогнозов и особенно при разработке методов прогнозов необходимо тщательно учитывать обе составляющие урожайности: культуру земледелия в определенном временном масштабе и погодные условия, проводя предварительный анализ временных рядов урожайности.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур по субъектам ЮФО в сроки, принятые Росгидрометом (3-я декада июня и 3-я декада июля), нами использовались методы регрессионного и корреляционного анализа, а также графический метод, позволившие установить тесноту и характер связей урожайности с гидрометеорологическими факторами и NDVI с учетом полученных результатов исследований агрометеорологических условий в субъектах ЮФО.

С целью более объективной оценки влияния на урожайность агрометеорологических условий, кроме данных Росстата по урожайности зерновых культур за 2001–2020 гг., были дополнительно за этот же период сформированы новые ряды урожайности с исключением построенных трендов урожайности, которые во всех субъектах округа вполне удовлетворительно аппроксимировались уравнениями прямой. Для Ростовской области, например, уравнение имеет вид: У = 0,666x + 20,584 (R^2=0,469), где У – урожайность в ц/га; x – порядковый номер года (2001 г. = 1). Связи урожайности зерновых культур с гидрометеорологическими факторами исследовались нами на основе построенных корреляционных матриц, которые были выполнены в двух вариантах: I – определялась теснота связей гидрометеорологических факторов в субъектах с урожайностью (У) в субъектах и II – с аномалией урожайности (ΔУ). Использовались рассчитанные по субъектам среднемесячная температура воздуха T по месяцам вегетационного периода апрель–июль (T_4, T_5, T_6, T_7), количество осадков R (R_4, R_5, R_6, R_7) и гидротермические коэффициенты увлажнения ($ГТК_4$, $ГТК_5$, $ГТК_6$, $ГТК_7$) за эти же месяцы, а также средние ГТК за май–июнь ($ГТК_{5-6}$) и май–июль ($ГТК_{5-7}$). По отдельным субъектам (Ростовская область) использовались запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы на начало вегетации озимых культур. Хотя четкого преимущества по всем указанным факторам первого и второго вариантов исследования связей не выявлено, однако на преобладающей территории связь метеорологических факторов с аномалией урожайности (ΔУ) была более тесной, чем непосредственно с урожайностью (У).

На рис. 6а показана зависимость урожайности зерновых культур (r=0,43), а на рис. 6б зависимость аномалии урожайности (r=0,63) от средней за май температуры воздуха (T_5) в Волгоградской области, которая типична и для других субъектов.

Отметим, что во всех субъектах связь (У) с T_5 и (ΔУ) с T_5 обратно пропорциональная: повышение температуры способствует понижению урожайности и увеличению отрицательной аномалии урожайности. В апреле связь урожайности с T_4 практически не проявлялась, а в июне и июле в большинстве субъектов она была менее тесная, чем в мае, при этом в июле связь была в основном практически не значима, так как основные зерновые колосовые культуры в этот период уже созревают и идет их уборка. Для поздних культур июль – важный период для формирования урожая, но их доля (вклад в общую урожайность зерновых

культур) невелика. Во всех субъектах округа хорошо проявляется положительное влияние на урожайность условий увлажнения: увеличения осадков и ГТК по месяцам вегетации. Особенно тесными связи были в мае, а в Республике Крым, Краснодарском крае и в Ростовской области и в апреле: коэффициенты корреляции колеблются от 0,40 до 0,53–0,60. Наиболее четко проявлялась связь аномалии урожайности (ΔУ), а в отдельных субъектах и урожайности (У) со средним ГТК за май–июнь ($ГТК_{5-6}$).

Рис. 6. Зависимость урожайности (У) зерновых культур (а) и зависимость аномалии урожайности (ΔУ) (б) от средней за май температуры воздуха (T_5) в Волгоградской области.
Fig. 6. Dependence of the yield (Y) of grain crops (a) and the dependence of the yield anomaly (DU) (б) on the average air temperature (t_5) for May in the Volgograd region.

На рис. 7а показана связь $ГТК_{5-6}$с урожайностью зерновых культур (r=0,59) по Ростовской области, а на рис. 7б – связь аномалии урожайности (ΔУ) с $ГТК_{5-6}$ (r=0,66), которая типична для большинства субъектов округа. Можно отметить, что наиболее значительные положительные аномалии урожайности наблюдались в основном при $ГТК_{5-6}$, около 0,80–0,90 и более.

Слабее, чем с $ГТК_{5-6}$ проявлялось положительное влияние осадков и ГТК по отдельным месяцам, как и с запасами продуктивной влаги в почве на начало вегетации озимых культур, но в большинстве случаев в июле, а в отдельных субъектах в июне связь (У) и (ΔУ) с этими параметрами (например, в Республике Крым) была ниже значимой на 5%-ном уровне.

В качестве примера временно-корреляционные функции зависимости отклонений урожайности зерновых культур от трендов, или аномалии урожайности (ΔУ), по Краснодарскому краю и Республике Крым от агрометеорологических факторов – температуры воздуха, количества осадков

и ГТК по месяцам вегетационного периода (апрель–июль) приведены на рис. 8 а,б.

Рис. 7. Зависимость урожайности (У) зерновых культур (а) и аномалии урожайности (ΔУ) (б) от среднего за май–июнь ГТК в Ростовской области.
Fig. 7. Dependence of yield (Y) of grain crops (a) and dependence of yield anomaly (ΔY) (б) on the average for May-June GTK in Rostov Region.

Рис. 8. Временно-корреляционные функции зависимости отклонений урожайности зерновых культур от трендов (аномалии урожайности, ΔУ) по Краснодарскому краю (а) и Республике Крым (б) от агрометеорологических факторов: температуры воздуха, количества осадков и ГТК по месяцам вегетационного периода (апрель–июль).
Fig. 8. Temporal-correlation functions of dependence of grain crop yield deviations on trends (yield anomalies, ΔY) in the Krasnodar Kray (a) and the Republic of Crimea (б) on agrometeorological factors - air temperature, rainfall and GTK by months of the growing period (April-July).

Нами также были построены графики связей урожайности зерновых культур с NDVI. На рис. 9 показана связь урожайности (У) и аномалии урожайности (ΔУ) с NDVI по Ростовской (а, б) и Волгоградской (в, г) областям. Отметим, что в этих субъектах, как и во всех остальных субъектах округа, более тесная связь NDVI проявляется с урожайностью (У), чем с аномалией урожайности (ΔУ).

Рис. 9. Связь урожайности (У) и аномалии урожайности (ΔУ) с NDVI по Ростовской (а, б) и Волгоградской (в, г) областям.
Fig.9. The relationship of yield (Y) and yield anomalies (ΔY) with NDVI in the Rostov (а, б) and Volgograd (в, г) Regions.

С целью определения периодов, когда связь урожайности зерновых культур с NDVI является значимой, а следовательно, и возможности использования NDVI в прогностических моделях урожайности в комплексе с метеорологическими параметрами, нами также рассчитывались матрицы парных коэффициентов корреляции между урожайностью этих культур

в субъектах и значениями NDVI по неделям вегетации. Анализ коэффициентов и построенных на их основе временных корреляционных функций позволили выявить периоды значимых, а также наиболее тесных связей урожайности с NDVI. В качестве примера такой функции (динамика коэффициентов корреляции r) по Краснодарскому краю, Ростовской области и Республике Калмыкия приведена на рис. 10.

Рис. 10. Связь урожайности зерновых культур с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) за период 2001–2020 гг. по неделям вегетации в Республике Калмыкия, Краснодарском крае и Ростовской области.
Fig.10. Relationship between grain yield and NDVI (dynamics of correlation coefficients, r) for the period 2001–2020 by growing weeks in the Republic of Kalmykia, Krasnodar Kray and Rostov Region.

Следует отметить, что достаточно тесная корреляция урожайности с NDVI (r=0,60 и более) в Краснодарском крае наблюдается с 14 по 22-ю неделю вегетации, в Ростовской области с 18 по 22-ю неделю, а в Республике Калмыкия – только в 20–21-ю неделю. Максимальная теснота связей в Краснодарском крае (r=0,756) наблюдалась в 19-ю неделю, в Ростовской (r=0,700) – в 21-ю неделю. В большинстве лет наибольшая теснота связей совпадает с периодом колошение – начало цветения, и прогнозирование урожайности в этот период является наиболее точным. На максимальную тесноту связей NDVI с урожайностью озимой пшеницы, главной культуры региона, на долю которой приходится до 70–75 % валового сбора зерна в округе, в период колошения указывается и в работах других авторов [19].

При разработке методов прогноза урожайности зерновых культур в использованном нами подходе урожайность в субъектах рассматривалась как сумма двух составляющих: Упр = Утр + ΔУ, где Утр –

детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия; ΔУ – случайная величина, зависящая главным образом от метеорологических условий и состояния посевов по спутниковым данным в текущем году. В результате проведенных исследований, выявивших значительный вклад в урожайность культуры земледелия, наиболее целесообразным оказался подход, позволяющий прогнозировать урожайность в отклонениях от тренда (ΔУ). При этом все метеорологические параметры для прогностической модели, как указывалось выше, рассчитывались в среднем за месяц, а значения NDVI выбирались с учетом тесноты их установленных связей с урожайностью и срока составления прогноза, т. е. использовались в основном значения NDVI, ближайшие к дате составления прогнозов.

В табл. 6 представлены разработанные регрессионные модели для прогнозов урожайности зерновых культур в отклонениях от трендов (ΔУ) в сроки: третья декада июня и третья декада июля.

Таблица 6. Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности (ΔУ) и множественные коэффициенты корреляции. **Table 6.** Values of regression coefficients in prognostic yield models (ΔY) and multiple correlation coefficients.

	Ростовская область		Волгоградская область		Краснодарский край		Республика Калмыкия		Республика Крым	
	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль
a_1	-1,174	-0,943	-0,66	-0,656*)	-0,793		-0,852	-0,762	-0,369	0,531
a_2	0,038						-0,005		2,061**)	
a_3			0,027		-0,005	0,014				
a_4		0,311		2,621		4,657***		-0,145		0,018
a_5					88,674		11,987		57,163	
a_6	27,994		12,966			52,475		13,097		75,484
a_7		34,178		21,761						
C	-2,544	-9,596	1,017	-2,901	-59,183	-48,572	6,832	4,739	-34,281	-57,814
R	0,835	0,822	0,749	0,818	0,728	0,718	0,729	0,739	0,852	0,885

Примечание. a_1 – коэффициент при T_5; *) – коэффициент при T_6; a_2 – коэффициент при R_4; **) – коэффициент при $ГТК_4$; a_3 – коэффициент при R_5; a_4 – коэффициент при $ГТК_{5-6}$; ***) – коэффициент при $ГТК_6$; a_5 – коэффициент при $NDVI_{20}$; a_6 – коэффициент при $NDVI_{21}$; a_7 – коэффициент при $NDVI_{22}$; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Высокие коэффициенты корреляции моделей и полученные коэффициенты детерминации (R^2) указывают на хорошую связь между фактическими и расчетными отклонениями урожайности от трендов. В Ростовской области, например, в модели для прогнозов в июне R^2 составляет

0,696, что указывает на то, что в 70 % случаев модель достоверно описывает изменение отклонений урожайности от трендов (как положительных, так и отрицательных). При этом нельзя не отметить, что в прогностические модели для второго срока прогноза (июль) входят оказавшиеся наиболее статистически значимыми параметры, характеризующие условия тепло- и влагообеспеченности посевов в апреле, мае и в июне. В июле эти параметры оказались малозначимыми и «отсеивались», так как преобладающие в регионе озимые культуры в июле уже созревают и идет их массовая уборка, начинается уборка и ранних яровых зерновых культур, а вклад поздних культур (у которых критический период приходится на июль) в урожайность зерновых культур в целом небольшой.

Предложенный метод удобен для применения в оперативном режиме. Этому способствует небольшое количество входных параметров в прогностических моделях и автоматизация вычислений. Все метеорологические параметры, входящие в состав модели в автоматизированном режиме рассчитываются (по данным декадных агротелеграмм, поступающих в Гидрометцентр России с сети гидрометстанций Росгидромета) на основе использования прикладных статистических программ, имеющихся на рабочих местах агрометеорологов-прогнозистов в локальной вычислительной сети Гидрометцентра «PROMETEY». Текущие значения NDVI в декаду (неделю), ближайшую к составлению прогноза, берутся с сервиса ВЕГА-PRO.

Авторская проверка оправдываемости разработанных прогностических моделей производилась на зависимых материалах (2001–2019 гг.), а за 2020 г. – на независимых данных, так как данных по окончательной урожайности на момент проверки (январь–февраль 2021 г.) еще не было. Были получены вполне удовлетворительные результаты оправдываемости прогнозов. Относительная ошибка прогнозов составляла преимущественно от 5 до 12 %, в отдельные годы (по Республике Калмыкия и Волгоградской области) она была 14–16 %.

Заключение

Проведенные исследования выявили тенденцию значительного роста урожайности зерновых культур в период 2001–2020 гг. вследствие повышения культуры земледелия. Наибольшим рост урожайности был в Краснодарском крае, где на фоне повышения культуры земледелия в рассмотренный период наблюдалось и некоторое улучшение условий увлажнения: средний гидрометеорологический коэффициент увлажнения в основной период вегетации ($ГТК_{5\text{-}6}$) от начала периода (1,04) увеличился к концу его до 1,47. В остальных субъектах условия увлажнения менялись несущественно, однако значительный рост средней температуры воздуха в эти месяцы был характерен для всех субъектов: увеличение $T_{5\text{-}6}$ за период составило 2,41–3,38 ºС (в Республике Крым 1,90 ºС), что несколько сдерживало рост урожайности. Колебания урожайности

наблюдалось в основном из-за засух, их повторяемость в период 2001–2020 гг. по градациям очень сильная, сильная и средняя рассмотрены в работе по сравнению с периодом 1981–2000 гг.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур на основе построенных корреляционных матриц исследовалась теснота связей метеорологических факторов в апреле–июле в двух вариантах: непосредственно с урожайностью (У) и с аномалией урожайности (в отклонениях от тренда, ΔУ). С целью использования спутниковых данных (NDVI) для учета особенностей динамики этого показателя (нами использовалось NDVI по преобладающим в округе озимым культурам) были рассчитаны средние многолетние значения NDVI за период 2001–2020 гг. и показана их динамика в субъектах по периодам вегетации. Сравнение временного хода «нормы» NDVI со значениями конкретного года позволяет более точно оценивать состояние посевов по сравнению с нормой, особенно в годы засух. В работе показано значительное различие динамики NDVI в годы засух и в годы с достаточным увлажнением. На основе установленной тесноты связей NDVI с урожайностью по неделям вегетации определены периоды наиболее эффективного использования этого показателя для прогнозирования урожайности зерновых культур в комплексе с метеорологическими факторами.

Проведенные исследования позволили разработать метод прогноза урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах ЮФО для сроков, установленных в Росгидромете (третья декада июня и третья декада июля). Проверка оправдываемости метода (на зависимом материале) показала вполне удовлетворительные результаты: относительная ошибка прогнозов составляла в основном от 5 до 12 %, в отдельные годы (Республика Калмыкия и Волгоградская область) – до 14–16 %.

Список литературы

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68-75.

2. *Береза О.В., Лупян Е.А., Страшная А.И.* О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 20-35.

3. *Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Павлова В.Н.* Региональные и отраслевые проблемы опустынивания, деградации земель и засух в Российской Федерации // Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Раздел 4. Т. 2. М.: Из-во МБА, 2019. С. 183-312.

4. *Гордеев А.В., Бутковский В.А.* Россия – зерновая держава. М.: ДеЛи принт, 2009. 470 с.

5. *Грингоф И.Г., Клещенко А.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.

6. *Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Сторчак И.Г., Плотников Д.Е.* Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 99-112.

7. *Иванисов М.М., Марченко Д.М., Некрасов Е.И., Рыбаев И.А., Гречаникова Т.А., Романюкина И.В., Кравченко Н.С.* Результаты изучения сортов озимой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения в условиях юга Ростовской области // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 12-17.

8. *Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобциская И.А.* Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 18-22.

9. *Клещенко А.Д.* Современные проблемы мониторинга засух // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 3-13.

10. *Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Савицкая О.В.* Использование спутниковой информации Modis в оперативной агрометеорологии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. С. 143-154.

11. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.

12. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190-198.

13. *Мещерская А.В.* О показателе засух и урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. 1988. № 2. С. 91-98.

14. *Попов А.С.* Сроки посева твердой озимой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 28-32.

15. *Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Хвостиков С.А.* Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 275-285.

16. *Самохвалова Н.Е., Дубинина О.А., Самохвалов А.П., Иличкина Н.П.* Роль метеофакторов в формировании продуктивности озимой твердой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2019. № 5. С. 18-23.

17. *Самофалова Н.Е., Иличкина В.П., Авраменко М.А., Дубинина О.А., Дерова Т.Г.* Коммерческие сорта твердой озимой пшеницы и особенности их семеноводства // Зерновое хозяйство России. 2016. № 6. С. 42-47.

18. Спутниковый сервис анализа вегетации. http://pro-vega.ru

19. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.

20. *Страшная А.И.* Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур

в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. 1993. Вып. 327. С. 15-22.

21. *Страшная А.И., Барталев С.А., Максименкова Т.А., Чуб О.В., Толпин В.А., Плотников Д.Е., Богомолова Н.А.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 85-107.

22. *Страшная А.И., Коренкова Н.В.* О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // Труды Гидрометцентра России. 2005. Вып. 340. С. 25-34.

23. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 194-214.

24. *Тарасов А.Н., Исаева О.В., Холодова М.А., Удалов А.А., Кабаненко М.Н., Черная А.Е., Удалова З.В.* Аграрный сектор Юга России: современные тенденции и перспективы развития. Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «Азов-Приют», 2020. 112 с.

25. *Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М.* Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана, 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581-586.

26. *Уланова Е.С., Страшная А.И.* Засухи в России и их влияние на производство зерна // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 32. С. 64-83.

27. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли». М.: Триада лтд, 2011. С. 22-31.

28. *Якушев В.П., Жуковский Е.Е.* Анализ последствий изменения климата в земледелии как задача оценки и сравнения рисков // Агрофизика. 2011. № 4. С. 24-39.

References

1. *Bartalev S.A., Loupian E.A., Neyshtadt I.A., Savin I.Yu.* Gropland Area Classification in South Regions of Russia Using MODIS Satellite Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [*Earth Observation and Remote Sensing*], 2006, no. 3, pp. 68-75. [in Russ.].

2. *Bereza O.V., Strashnaya A.I., Loupian E.A.* On the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from Space*], 2015, vol. 12, no. 1, pp. 18-30. [in Russ.].

3. *Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V., Han V.M., Tarasova L.L., Pavlova V.N.* Regional'nye i otraslevye problemy opustynivaniya, degradatsii zemel' i zasuh v Rossiyskoy Federatsii // Natsional'nyy doklad «Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe hozyaystvo). Razdel 4. T. 2. Moscow, Iz-vo MBA, 2019, pp. 183-312. [in Russ.].

4. *Gordeev A.V., Butkovskiy V.A.* Rossiya – zernovaya derzhava. Moscow, DeLi print, 2009, 470 p. [in Russ.].

5. *Gringof I.G., Kleshchenko A.D.* Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. T. 1. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2011, 808 p. [in Russ.].

6. *Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Storchak I.G., Plotnikov D.E.* The possibility of winter wheat yield estimation based on vegetation index of photosynthetic potential derived from remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from Space*], 2016, vol. 13, no. 4, pp. 99-112. [in Russ.].

7. *Ivanisov M.M., Marchenko D.M., Nekrasov E.I., Rybas I.A., Grichanikova T.A., Romanyukina I.V., Kravchenko N.S.* The study results of the winter soft wheat varieties of various ecological and geographical origin in the south of the Rostov region. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [*Grain Economy of Russia*], 2019, no. 6, pp. 12-17. [in Russ.].

8. *Ionova E. V., Likhovidova V. A., Lobunskaya I. A.* Drought and hydrothermal humidity factor as one of the criteria to estimate its intensity degree (literature review). *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [*Grain Economy of Russia*], 2019, no. 6, pp. 18-22. [in Russ.].

9. *Kleshchenko A.D.* Sovremennye problemy monitoringa zasuh. *Trudy VNIISKHM,* 2000, vol. 33, pp. 3-13. [in Russ.].

10. *Kleshchenko A.D., Lebedeva V.M., Naidina T.A., Savitskaya O.V.* MODIS satellite data usage in operational agrometeorology. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from Space*], 2015, vol. 12, no. 2, pp. 143-154. [in Russ.].

11. *Lebedeva V.M., Strashnaya A.I.* Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2012, 216 p. [in Russ.].

12. *Loupian E., Savin I., Bartalev S., Tolpin V., Balashov I., Plotnikov D.* Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from Space*], 2011, vol. 8, no. 1, pp. 190-198. [in Russ.].

13. *Meshcherskaya A.V.* O pokazatele zasuh i urozhaynosti zernovyh kul'tur. *Meteorologiya i Gidrologiya* [*Russ. Meteorol. Hydrol.*], 1988, no. 2, pp. 91-98. [in Russ.].

14. *Popov A. S.* The sowing date of winter durum wheat. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [*Grain Economy of Russia*], 2019, no. 6, pp. 28-32. [in Russ.].

15. *Savin I., Bartalev S., Loupian E., Tolpin V., Khvostikov S.* Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from Space*], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 275-285. [in Russ.].

16. *Samofalova N. E., Dubinina O. A., Samofalov A. P., Ilichkina N. P.* The meteorological factors' part in winter durum wheat productivity formation. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [*Grain Economy of Russia*], 2019, no. 5, pp. 18-23. [in Russ.].

17. *Samofalova N. E., Ilichkina N. P., Avramenko M. A., Dubinina O. A., Derova T. G.* The commercial varieties of winter durum wheat varieties and the features of their seed-growing. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [*Grain Economy of Russia*], 2016, no. 6, pp. 42-47. [in Russ.].

18. Sputnikovyy servis analiza vegetatsii. Available at: http://pro-vega.ru. [in Russ.].

19. *Storchak I.G., Eroshenko A.A.* Using of NDVI for assessing productivity of winter wheat in Stavropol region. *Zemledelie*, 2014, no. 7, pp. 12-15. [in Russ.].

20. *Strashnaya A.I.* Ispol'zovanie pokazateley uvlazhneniya dlya otsenki zasushlivosti i prognoza urozhaynosti zernovyh i zernobobovyh kul'tur v Povolzhskom ekonomicheskom rayone. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 1993, vol. 327, pp. 15-22. [in Russ.].

21. *Strashnaya A.I., Bartalev S.A., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Tolpin V.A., Plotnikov D.E., Bogomolova N.A*. Agrometeorological assessment of winter grain crops condition during the growing season termination using ground and satellite data through the example of the Privolzhskiy Federal District. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2014, vol. 351, pp. 85-105. [in Russ.].

22. *Strashnaya A.I., Korenkova N.V.* O zasushlivosti v Srednem Povolzh'e i ee vliyanii na urozhaynost' yarovoy pshenitsy. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2005, vol. 340, pp. 25-34. [in Russ.].

23. *Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V.* Agrometeorological features of a drought of 2010 in Russia in comparison with droughts of last years. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2011, vol. 345, pp. 194-214. [in Russ.].

24. *Tarasov A.N., Isaeva O.V., Holodova M.A., Udalov A.A., Kabanenko M.N., CHernaya A.E., Udalova Z.V*. Agrarnyy sektor YUga Rossii: sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya. Rostov-na-Donu, Izd-vo OOO «Azov-Priyut», 2020, 112 p. [in Russ.].

25. *Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M.* Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the «Vega» satellite service. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2014, vol. 27, no. 7, pp. 581-586 [in Russ.].

26. *Ulanova E.S., Strashnaya A.I.* Zasuhi v Rossii i ih vliyanie na urozhaynost' zernovyh kul'tur. *Trudy VNIISKHM,* 2000, vol. 33, pp. 64-83. [in Russ.].

27. *Frolov A.V., Strashnaya A.I.* O zasuhe 2010 goda i ee vliyanii na urozhaynost' zernovyh kul'tur. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 goda. Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 22-31. [in Russ.].

28. *Yakushev V.P., Zhukovsky E.E.* Consequence analysis of climate change impact on agriculture as a problem of risk estimation. *Agrofizika* [*Agrophysica*], 2011, no. 4, pp. 24-39. [in Russ.].

Поступила 16.04.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 16.04.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-138-146
УДК 551.582.2

Оценка изменений температуры воздуха и осадков на территории Забайкалья

В.К. Смахтин

Забайкальское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Чита, Россия
cvk89@mail.ru

В работе проанализированы многолетние колебания средней температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков на территории Забайкалья. За период с 1951 по 2020 год температура воздуха возросла на 2,3 °С по данным 40 метеорологических станций. Потепление главным образом проявляется в повышении температуры воздуха в феврале, марте и апреле. В период 1955–2017 гг. уменьшение годовых сумм атмосферных осадков в бассейне Амура составило 56 мм, Енисея – 39 мм. Тренды достоверны при 5%-ном уровне значимости. В бассейне Лены в указанный период произошло увеличение годовых сумм атмосферных осадков на 7 мм, что при 5%-ном уровне значимости нельзя считать подтвержденным.

С 2017 года отмечается начало многоводной фазы. Учитывая, что две предыдущие многоводные фазы длились 16–17 лет, можно предположить, что ближайшие 13–14 лет будет сохраняться угроза выпадения атмосферных осадков выше нормы.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, атмосферные осадки, фазы водности, тренды

Assessment of changes in air temperature and precipitation in Transbaikalia

V.K. Smakhtin

Zabaikalskoe Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Chita, Russia
cvk89@mail.ru

The paper analyzes long-term fluctuations in average air temperature and annual total precipitation in Transbaikalia. Between 1951 and 2020, air temperature increased by 2.3 °C according to 40 weather stations. Warming is mainly manifested in the air temperature rise in February, March and April. From 1955 to 2017, the decrease in annual total precipitation was 56 mm in the Amur basin and 39 mm in the Yenisei basin. The trends are reliable at the 5% significance level. In the Lena basin, annual total precipitation during the mentioned period increased by 7 mm, the trend is not reliable at the 5% significance level.

The high-water phase has been observed since 2017. Taking into account that two previous high-water phases lasted 16–17 years, it may be supposed that a risk of precipitation above the normal will be kept in the next 13–14 years.

Keywords: climate change, air temperature, precipitation, phases of water content, trends

Введение

Ежегодно Росгидромет выпускает доклад об изменениях климата. Один из последних был выпущен в 2020 году и охватывает проанализированные исходные данные до 2019 года. В нем отмечено повышение приземной температуры воздуха и увеличение годовых сумм атмосферных осадков для территории Прибайкалья и Забайкалья [1].

Изменения средней годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков на территории Забайкалья было подробно рассмотрено в диссертации В.А. Обязова в 2014 году [3]. За период с 1975 по 2018 год отмечено увеличение числа дней с температурой выше 10 °С, преимущественно в южных и центральных районах Забайкальского края [2]. Представляется важным рассмотреть более подробно колебания климатических характеристик на территории Забайкалья по состоянию на 2021 год.

Целью работы является оценка современного изменения климата на территории Забайкалья. Для достижения цели сформированы следующие задачи:

– оценить многолетние изменения средней температуры воздуха по месяцам и за год, выявить согласованность этих изменений, определить тренды и их достоверность;

– оценить многолетние изменения годовых сумм атмосферных осадков по всей территории и по бассейнам, определить тренды и их достоверность.

Материалы и методы исследования

В работе задействованы данные о средней месячной температуре воздуха и месячных суммах атмосферных осадков из фонда данных ФГБУ «Забайкальское УГМС» за период с 1951 по 2020 год по 40 метеорологическим станциям (МС) (рис. 1). Пропущенные данные в пунктах Замакта, Тупик, Ксеньевское были восстановлены с помощью уравнения линейной регрессии по наиболее репрезентативным ближайшим метеостанциям Горячинск и Могоча. Карты распределения характеристик построены в программном комплексе «ArcGIS». Согласованность изменений исследуемых характеристик оценивалась с помощью корреляционного анализа. Тренды вычислялись методом наименьших квадратов. Оценка значимости трендов и коэффициентов корреляции выполнялась с использованием t-статистики Стьюдента при 5%-ном уровне значимости [4].

Результаты и обсуждение

Среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах от 0,4 °С (МС Кяхта) на юге, юго-западе до -7,5 °С (МС Троицкий прииск) на севере, северо-востоке.

Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций и бассейнов на территории Забайкалья.
Fig. 1. Layout of meteorological stations and basins on the territory of Transbaikalia.

Изменения среднегодовой температуры воздуха по метеорологическим станциям Забайкалья хорошо согласованы между собой. В 77 % случаев по всем МС коэффициент корреляции превышает значение 0,8. Наименьшая согласованность между другими метеостанциями отмечена по МС Горячинск. Коэффициент корреляции изменяется в пределах от 0,57 до 0,79, что в целом говорит об однородности ряда.

По метеорологическим станциям Санага и Ксеньевская коэффициенты корреляции ниже 0,8 в 63 % случаев. По МС Бичура, Менза, Могоча, Нерчинск, Новоселенгинск, Усть-Баргузин коэффициенты корреляции ниже 0,8 в 38 % случаев. По МС Красный Чикой, Кыра, Тупик, Уакит, Усть-Карск, Хоринск, Чара коэффициенты корреляции ниже 0,8 в 25 % случаев.

Исходя из этого, наименьшей согласованностью в многолетнем ходе температуры характеризуется северо-восточная часть Забайкалья, часть метеостанций, находящихся на юго-западе, а также две МС, находящиеся в непосредственной близости к оз. Байкал. Данное распределение

не согласуется с распределением по бассейнам рек, устойчивые и слабые связи есть в каждом бассейне. Средний коэффициент корреляции между рядами изменения средней годовой температуры воздуха за период с 1951 по 2020 год составил 0,84.

При оценке трендов температуры воздуха по месяцам определено, что за период с 1951 по 2020 год средняя температура февраля по 40 метеорологическим станциям Забайкалья повысилась на 4,5 °С. По сравнению с другими месяцами это повышение является максимальным. Повышение температуры воздуха в марте и апреле составило 4,1 °С и 3,4 °С соответственно. В мае и июле повышение средней температуры воздуха за последние 70 лет составило 2,1 °С, в январе и августе – 1,7 °С, сентябре – 1,6 °С. Тренды изменения средней температуры воздуха за период 1951–2020 гг. в октябре, ноябре и декабре не являются достоверными при 5%-ном уровне значимости.

Анализ трендов изменения средней годовой температуры воздуха по метеорологическим станциям Забайкалья показал, что все тренды являются достоверными при 5%-ном уровне значимости. Наибольший рост средней температуры воздуха за последние 70 лет отмечен по МС Горячинск – 5,3 °С, наименьший по МС Уакит – 1,6 °С (рис. 2).

Рис. 2. Распределение повышения температуры воздуха по территории Забайкалья (1951–2020 гг.).
Fig. 2. Distribution of air temperature raising over the territory of Transbaikalia (1951–2020).

За период с 1955 по 2020 год повышение средней годовой температуры воздуха на территории Забайкалья составило 2,3 °С. Тренд достоверен при 5%-ном уровне значимости. Среднее значение ряда изменения средней температуры воздуха за период 1951–1980 гг. составило -3,5 °С, за период 1991–2020 гг. – -2,1 °С.

Средние годовые суммы атмосферных осадков изменяются в пределах от 221 мм (МС Новоселенгинск) на юго-западе до 504 мм (МС Тупик) на северо-востоке.

Колебания годовых сумм атмосферных осадков менее согласованы между собой по территории Забайкалья. Средний коэффициент корреляции между рядами изменения годовых сумм атмосферных осадков за период с 1951 по 2020 г. равен 0,28. Связь колебаний рядов атмосферных осадков в целом по территории можно считать слабо согласованной. Анализ согласованности по бассейнам показал более тесную связь. Так, в Амурском бассейне средний коэффициент корреляции равен 0,51 и изменяется в пределах от 0,18 до 0,86. Средний коэффициент корреляции в бассейне Енисея составил 0,42 ($-0{,}033 \leq R \leq 0{,}82$), в бассейне Лены 0,37 ($-0{,}007 \leq R \leq 0{,}78$).

При длине ряда в 70 лет значимым коэффициентом корреляции будет считаться коэффициент от 0,20 до 1 и от -1 до -0,20. Практически не имеет согласованности с другими метеостанциями в многолетнем колебании атмосферных осадков МС Чара, в 83 % случаев коэффициент корреляции с другими МС не значим. МС Нижнеангарск, Уоян и Санага имеют незначимые коэффициенты корреляции с другими метеостанциями в 68–73 % случаев. В 45-50 % случаев эти связи не значимы по МС Уакит, Тупик, Троицкий прииск, Соловьевск, Новоселенгинск, Кяхта, Борзя.

Таким образом, можно отметить, что не имеют согласованности либо имеют слабую связь все МС, находящиеся на севере Забайкалья, три метеостанции на юго-западе и две на юге в районе Торейских озер.

Анализ изменения осадков во времени показал, что начиная с 1955 г. по 1971 г. можно выделить период повышенных осадков (условно многоводная фаза) длиной 16 лет, а с 1971г. начался период пониженных осадков (маловодная фаза), длившийся 10 лет. С 1981 по 1998 г. наблюдались повышенные осадки, а с 1998 по 2017 г. − пониженные. В 2017 году начался период повышенных осадков, который длится до настоящего времени (рис. 3).

На основе имеющихся данных можно сделать вывод, что для атмосферных осадков корректным будет вычислять тренды с 1955 по 2017 год, так будут затронуты две маловодные и две многоводные фазы, два полных цикла колебания водности.

Анализ достоверности трендов изменения годовых сумм атмосферных осадков за период с 1955 по 2017 год показал, что только 11 из 40 являются достоверными при 5%-ном уровне значимости. В таблице приведены данные только по достоверным изменениям.

Рис. 3. Интегрально-разностная кривая изменения средних годовых сумм атмосферных осадков на территории Забайкалья.
Fig. 3. Integral-difference curve of changes in average annual amounts of atmospheric precipitation in the territory of Transbaikalia.

Таблица. Уменьшение годовых сумм атмосферных осадков за период 1955–2017 гг.
Table. Decrease in annual amounts of atmospheric precipitation for the period 1955–2017

Метеорологическая станция	Уменьшение, мм	% от среднего многолетнего
Агинское	83	23
Букукун	138	33
Горячинск	88	22
Дарасун	89	23
Замакта	100	22
Кабанск	112	31
Кыра	111	30
Мангут	119	34
Нерчинск	79	24
Новоселенгинск	59	27
Соловьевск	63	21

За период с 1955 по 2017 год уменьшение годовых сумм атмосферных осадков в Амурском бассейне составило 56 мм, Енисейском – 39 мм, тренды достоверны при 5%-ном уровне значимости (рис. 4). В бассейне Лены за период 1955–2017 гг. произошло увеличение годовых сумм атмосферных осадков на 7 мм, однако данный тренд не является достоверным.

Рис. 4. Изменение средних годовых сумм атмосферных осадков по бассейнам.
Fig. 4. Change in average annual precipitation by basin.

Заключение

В завершении анализа можно сделать следующие выводы.

Изменения средней годовой температуры воздуха хорошо согласованы между собой по всей территории Забайкалья, средний коэффициент корреляции 0,84. Наименьшей согласованностью в многолетнем ходе температуры характеризуется северо-восточная часть Забайкалья, часть

метеорологических станций, находящихся на юго-западе, а также две метеостанции, находящиеся в непосредственной близости к оз. Байкал. За последние 70 лет средняя температура воздуха повысилась на 2,3 °С по данным 40 метеорологических станций. Потепление главным образом выражается в повышении температуры воздуха в феврале, марте и апреле.

Колебания годовых сумм атмосферных осадков слабо согласованы в целом по территории. В бассейнах Амура, Енисея и Лены эта связь проявляется более тесно, средние коэффициенты корреляции 0,51, 0,42 и 0,37 соответственно. Практически не имеют согласованности по суммам осадков, либо имеют слабую связь, метеостанции, находящиеся на севере, юго-западе, а также в районе Торейских озер.

За период с 1955 по 2017 год уменьшение годовых сумм атмосферных осадков в Амурском бассейне составило 56 мм, Енисейском – 39 мм, тренды достоверны при 5%-ном уровне значимости. В бассейне Лены за аналогичный период произошло увеличение годовых сумм атмосферных осадков на 7 мм, однако данный тренд не является достоверным.

За период с 1951 по 2020 год прослеживается два цикла колебания сумм осадков. В 2017 году отмечается начало периода повышенных осадков. Учитывая, что два предыдущих таких периода продлились 16–17 лет, можно предположить, что в ближайшие 13–14 лет будет сохраняться тенденция выпадения атмосферных осадков выше нормы.

Список литературы

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97 с.

3. Обязов В.А. Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Казань: Казан. (Приволж.) федер. ун-т, 2014. 39 с.

2. 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.

4. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: Из-во. РГГМУ, 2007. 279 с.

References

1. Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2019 god. [A report on Climate features on the territory of the Russian Federation in 2019] Moscow, Roshydromet, 2020, 97 p. [in Russ.].

2. *Obyazov V.A*. Izmeneniya sovremennogo klimata i otsenka ih posledstviy dlya prirodnyh i prirodno-antropogennyh sistem Zabaykal'ya: Avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. [Extended Abstract of dissertation of the Candidate of Geographical sciences] Kazan', Kazan Federal University, 2014, 39 p. [in Russ.].

3. Noskova E.V., Vakhnina I.L., Rakhmanova N.V. Amounts of active air temperatures (above 10 °C) in the territory of Trans-Baikal territory. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [*Advances in current natural sciences*]. 2019, no. 11, pp. 148-153. [in Russ.].

4. *Sikan A.V.* Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii: uchebnik. Saint Petersburg, RGGMU publ., 2007, 279 p. [in Russ.].

.

Поступила 03.03.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.
Submitted 03.03.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.

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 непереводимых названий собственных имен, приборов и др. объектов;

– в названиях не используется непереводимый 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. Аффилиация в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации:*

– аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),

– содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);

– в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;

– аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

– расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;

– отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;

– выстраиваться от общего к частному;

– включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила российского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются

зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (http://journal.meteoinfo.ru; https://meteoinfo.ru/proceedings).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м^2, Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17−20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («…»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подрисуночной подписи (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

Список литературы оформляют с применением правил, предусмотренных действующими ГОСТ (7.82-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления»; 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»; 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка»). Ссылки на литературные источники в списке располагают в алфавитном порядке по фамилии первого автора, сначала приводятся издания на русском языке, затем – на иностранных. Работы одного автора указываются по возрастанию годов издания. В тексте ссылки на номера источников даются в квадратных скобках.

Примеры:

1) **книги:**

Зуев А.А. Заглавие (обязательно полное). 5-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 2009. 99 с.

Берг Л.С. Очерки по истории русских географических открытий. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 296 с.

Ferguson-Smith V.A. The indications for screening for fetal chromosomal aberration // Prenatal Diagnosis Inserm / Ed. by Boue A. Paris, 1976. P. 81-94.

2) **диссертации и авторефераты:**

Натанов Я.М. Название диссертации: Дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 108 с.

Натанов Я.М. Название диссертации: Автореф. дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 20 с.

3) **статьи:**

Горюнов Н.Л. Название статьи // Название журнала (сокращенное и без кавычек). 1989. Т. 66, № 9. С. 99-102.

Алексеев Г.В., Нагурный А.П. Роль морского льда в формировании годового цикла двуокиси углерода в Арктике // ДАН. 2007. Т. 417, № 4. С. 541-544.

Nicolaides K.N. Screening for fetal chromosomal abnormalities need to change the rules // Ultrasound Obstet. Gynecol. 1994. Vol. 4, no. 3. P. 353-355.

EPICA Community Members. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland andAntarctica // Nature. 2006. Vol. 444. P. 195-198.

4) **электронный ресурс**:

Егорин С.В. Район Тепли–Джимарай–Казбек. 2003. http://www.mountain.ru/world_mounts/caucasia/kasbek/2003/opisanie/

После формирования блока Списка литературы, его представляют на английском языке под заголовком **References,** повторяя список литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются в References. Совершенно недопустимо при этом в References для оформления ссылок использовать российский ГОСТ.

1**) ссылки на иностранные публикации в References**:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of journal.* 2010, vol. 30, no 2, pp. 496-507.

2) **статьи из переводных российских журналов:**

Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Thunderstorm activity forecasting based on the model of cumulonimbus cloud electrification. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2017, vol. 42, no. 2, pp. 77-87. [in Russ.].

3) **статья в электронном журнале:**

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *J. Computer-Mediated Communication*. 1999, vol. 5, no. 2, available at: www. ascusc.org/ jcmc/vol5/ issue2/ [in Russ.].

Общая схема описания источника литературы в References:

– ФИО авторов через запятую (транслитерация) – *курсив*;

– транслитерация заглавия на английский язык;

– перевод заглавия – заключается в квадратные скобки;

– транслитерация название источника – *курсив*;

– название источника на английском языке (если есть) – заключается в квадратные скобки;

– выходные данные (место издания, год, номер выпуска, страницы) с обозначениями на английском языке, название города пишем полностью;

– указание на язык работы.

Kozachun G.U., Lapko N.A. Sovremennaya tipologiya zhilykh zdanii. Chast' II [Modern typology of residential units. Part 2]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2011, no. 2, pp. 14-17. [in Russ.].

4) **материалы конференции**:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"*. Moscow, 2007, pp. 267-272. [in Russ.].

Несколько правил:

•рекомендуем использовать для транслитерации специальные интернет-ресурсы: http://www.translit.ru

•в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается "pp." перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) – указывается как "p." после указания количества страниц;

•необходимо убирать специальные разделители между полями ("//", "–");

•полное место издания пишется на английском языке. Издательство лучше обозначать добавлением слова Publ. Название издательства оставляем транслитерированным.

•если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографическом описании в References, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье;

•нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников;

•в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не следует указывать тип изданий;

• англоязычные названия ВУЗов, журналов и т.д. можно найти на сайте http://elibrary.ru.

5) **книги (монографии, сборники, труды конференций в целом):**

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation]. *Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology*. Moscow, LKI, 2007. [in Russ.].

Nenashev M.F. Poslednee pravitel'stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow: Krom Publ., 1993, 221 p. [in Russ.].

Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002, 140 p. [in Russ.].

Latyshev V.N. Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friktsionnye protsessy pri rezanie metallov [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting]. Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009. [in Russ.].

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 2 (380)

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

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@mecom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 21.06.2021. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 10. Тираж 300 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3