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 (384)

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 2 (384)

Москва
2022

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.

Представлен опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок. Приведен анализ динамики эпизодов низкой облачности и ограниченной видимости на аэродромах Российской Федерации в текущем столетии. Одна из статей посвящена анализу случая возникновения опасного явления погоды: конвективного шторма в летний период 2021 года в центральных районах ЕТР. Две статьи посвящены формированию весеннего стока рек ЕТР. Проведена переоценка факторов формирования весеннего стока с учетом современных климатических условий на примере рек бассейна Дона. В разделе агрометеорологических прогнозов изложены агрометеорологические условия возделывания зерновых и зернобобовых культур в южных районах России и возможности использования спутниковой информации для прогнозирования урожайности. Рассматриваются результаты мониторинга приземного озона в период 2017–2021 гг. в природном заповеднике «Карадагский». В информационном разделе приводятся основные результаты работы 22-й сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22)

Журнал рекомендуется специалистам, интересующимися проблемами гидрометеорологического прогнозирования.

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», 2022

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 experience of spatial verification of radar-based precipitation nowcasting is presented: the determination and statistics of objects, situations, and conditional samples. The analysis of change of the episodes with low clouds and low visibility at aerodromes of the Russian Federation in the current century is given. Study of the convective storm in the summer of 2021 in the European part of Russia is presented. Two papers deal with the formation of spring river runoff in the European part of Russia. The factors of spring runoff formation are reassessed taking into account the current climate conditions on the example of the Don basin. The section of agrometeorological forecasting describes agrometeorological conditions for cultivation of grain and leguminous crops in the southern regions of Russia and a possibility of using satellite information for the yield prediction. The results of surface ozone monitoring in the Karadag Nature Reserve in 2017–2021 are discussed. The main results of the 22th session of the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-22) are presented in the Information section.

The journal is of interest for specialists dealing with problems of hydrometeorological research and forecasting.

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, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Наукастинг

Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок ……..……..... 6
Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.

Авиационная метеорология

Динамика эпизодов низкой облачности и ограниченной видимости на аэродромах Российской Федерации в период 2001–2020 гг. …….. 53
Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н.

Общая циркуляция и характеристики атмосферы

Исследование мезомасштабной конвективной системы в центральных районах ЕТР 7 августа 2021 года 69
Спрыгин А.А., Вязилов А.Е.

Гидрологические прогнозы

Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований …… 92
Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С.

Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона …….. 117
Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С.

Агрометеорологические прогнозы

Агрометеорологические условия возделывания зерновых и зернобобовых культур и возможности использования спутниковой информации для прогнозирования их урожайности в субъектах Северо-Кавказского федерального округа ……...… 147
Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С.

Атмосферные процессы и загрязнение атмосферы

Мониторинг приземного озона в природном заповеднике «Карадагский» в период 2017–2021 гг. …….....… 168
Лапченко В.А., Кузнецова И.Н.

Информационные сообщения

Двадцать вторая сессия Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22) ……..……...… 181
Хан В.М., Вильфанд Р.М., Емелина С.В., Каверина Е.С., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Набокова Е.В., Субботин А.В., Сумерова К.А., Тищенко В.А.

CONTENTS

Nowcasting

Expertise in spatial verification of radar precipitation nowcasting: identification and statistics of objects, situations and conditional samples ……..…….....
Muravev A.V., Bundel A.Yu., Kiktev D.B., Smirnov A.V. 6

Aviation meteorology

Change of episodes with low ceiling and low visibility at aerodromes in the Russian Federation for 2001–2010 ……..……..
Ivanova A.R., Skriptunova E.N. 53

General circulation and characteristics of the atmosphere

A case study of the mesoscale convective system over central regions of European Russia on August 7, 2021 .....
Sprygin A.A., Vyazilov A.E. 69

Hydrological forecasts

Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. I. Review of previous studies ……
Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.И., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. 92

Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. II. Reassessment in modern conditions on the example of the Don basin rivers ……..
Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.И., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. 117

Agrometeorological forecasts

Agrometeorological conditions for cultivation of grain and leguminous crops and a possibility of using satellite information to predict their yield in the subjects of the North Caucasian Federal District …….....……
Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S. 147

Atmospheric processes and air pollution

Monitoring of surface ozone in the Karadag Nature Reserve in 2017–2021 …..……
Lapchenko V.A., Kuznetsova I.N. 168

Informational notes

Twenty-second session of North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-22) ……..…
Khan V.M., Vilfand R.M., Emelina S.V., Kaverina E.S., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Nabokova E.V., Subbotin A.V., Sumerova K.A., Tishchenko V.A. 181

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-6-52
УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок

А.В. Муравьев, А.Ю. Бундель, Д.Б. Киктев, А.В. Смирнов

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

Проведен статистический анализ пространственных объектов и специальных ситуаций, определяемых для объектно-ориентированной верификации прогнозов областей осадков значительной и максимальной площади с привлечением методов теории экстремальных величин. Оценена степень влияния пропусков в точках полей и разных способов формирования пар прогноз-наблюдение на объемы и на статистические свойства выборок для пространственной верификации. С помощью пространственных квантильных функций и географических представлений продемонстрированы особенности композитных полей, построенных на основе данных около трех десятков радиолокаторов на Европейской территории России.

Ключевые слова: пространственная верификация прогнозов, радиолокационный наукастинг осадков, теория экстремальных величин, пропуски данных, условные выборки для верификации, пространственные квантили

Expertise in spatial verification of radar precipitation nowcasting: identification and statistics of objects, situations and conditional samples

A.V. Muravev, A.Yu. Bundel, D.B. Kiktev, A.V. Smirnov

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

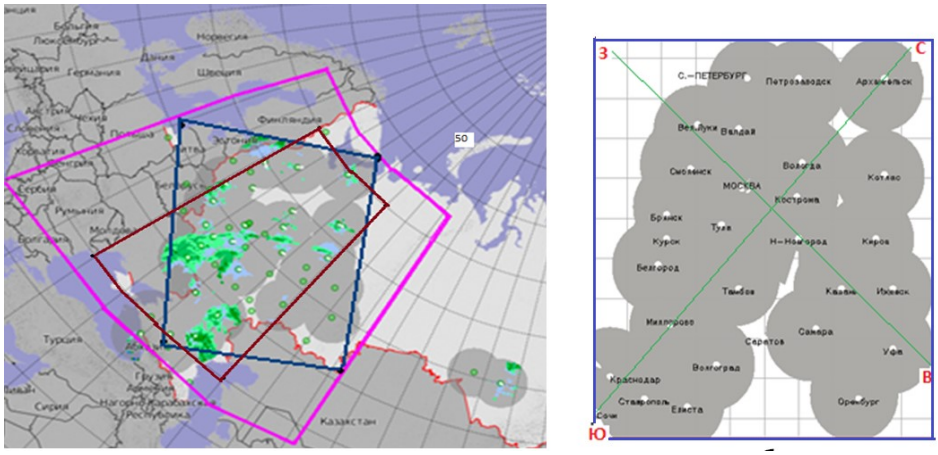
Statistical analysis was performed using methods of the extreme value theory for spatial objects and specified situations identified for object-oriented verification of precipitation regions with substantial and maximal areas. We made an estimation of the effect of missing values at field points and of different observation-forecast pairs construction on volumes and on statistical characteristics of samples retrieved for spatial verification purposes. We used spatial quantile functions and geographical representations in regular coordinates to illustrate particular aspects of composite fields built on about three dozen radars' data over the European territory of Russia.

Keywords: spatial forecast verification, radar precipitation nowcasting, extreme value theory, missing data, conditional verification sampling, spatial quantiles

Введение

На протяжении 2017–2020 гг. в теплый и холодный периоды года в Гидрометцентре России проводились испытания двух версий системы радиолокационного наукастинга осадков, которые обозначим по аналогии прогностическим моделям через STEPS-2014 и ruSTEPS-2019. Особенности указанных моделей, условия и результаты испытаний изложены в нескольких работах авторов [13, 14, 20–23]. К теплому и холодному периодам отнесены по пять последовательных месяцев из интервалов май–сентябрь и ноябрь–март соответственно.

Первая версия модели STEPS-2014 испытывалась по территории Центрального федерального округа (ЦФО) на основе данных наблюдений девяти радиолокаторов ДМРЛ-С (р/л). Вторая версия ruSTEPS-2019, *усовершенствованная*, испытывалась по Европейской территории России на основе данных 28 р/л (рис. 1).



а) **б)**

Рис. 1. Область усовершенствованной системы наукастинга радиолокационных осадков: *оперативная карта ЦАО и контуры характерных областей*; сиреневый – начальная область анимации прогнозов (сайт ГМЦ); синий – объединенное поле круговых обзоров р/л (матрица 2151x1951); коричневый: условная карта для верификации (45°–65° с. ш., 30°–50° з. д.) (а); *расположение ДМРЛ-С в условных координатах* (28 р/л). Прямыми зелеными линиями на панели выделены ориентировочные направления на страны света (б).

Fig. 1. Area of improved radar precipitation nowcasting: operational map of the Central Federal district and the contours of characteristic areas; orange: initial area as in forecast animation (HMC site); blue: unified field of the circle radar area (matrix 2151x1951); brown: verification map in regular coordinates (45°-65°N, 30°-50°W) (a); Radar locations in special regular coordinates (28 radars). Straight green lines indicate the cardinal points (б).

Наблюдения и прогнозы в первом случае представлены в виде квадратных матриц, включающих данные круговых обзоров отдельных локаторов, во втором случае – в виде прямоугольной матрицы, объединяющей данные всех локаторов с учетом их схематического географического расположения. Указанные матрицы будем также называть *полями* и *объединенными полями* соответственно.

Базовые, традиционные *оценки качества* наукастинга строились на временных рядах пар наблюдение-прогноз в узлах полей с последующим обобщением при помощи квантилей пространственного распределения этих оценок. Наряду с традиционными оценками рассчитывались показатели *объектно-ориентированных* и *окрестных* методов верификации [20, 31, 35, 36]. В рамках объектно-ориентированной верификации выделялись области осадков *большой* и *максимальной* площади, полная совокупность которых описывалась моделью "пиков над порогом" (POT, Peaks-over-Threshold) и анализировалась с помощью *обобщенного распределения Парето* из теории экстремальных величин [6–8, 17, 28, 46, 56]. Методы окрестной верификации были представлены *показателем FSS* (Fractions Skill Score) [48], который строится на пространственных долях областей наблюдаемых и прогнозируемых зон осадков.

Усовершенствованная система наукастинга была испытана и внедрена в оперативную практику в течение 2019–2020 гг. [23]. Здесь основное внимание уделено учету *пропусков* в данных наблюдений и разным способам *формирования выборок* пар наблюдение-прогноз. Информация о пропусках важна для оценок значимости характеристик качества, а испытание разных типов выборок позволяет учесть влияние на характеристики качества большого количества нулевых осадков и некоторого нижнего порога наличия осадков, учитывающего точность радиолокатора.

Обобщение оценок качества с помощью квантилей пространственного распределения можно отнести к группе *масштабно-разделительных* методов.

Указанные группы входят в классификацию методов пространственной верификации [38], в которую наряду с перечисленными тремя (объектно-ориентированные, окрестные и масштабно-разделительные) входит группа *деформационных методов* и иногда добавляется группа *мер дальности* [34]. Данная классификация не является строгой и здесь используется исключительно для отсылки на мировой опыт [3, 38, 39].

Уточним понятия *областей*, *объектов* и *ситуаций*. В полях осадков *области* выделяются, как обычно, пороговыми значениями. Ограниченные изолинией 1 мм/ч области будем называть *объектами* в соответствии с терминологией объектно-ориентированной верификации [31]. *Площадь,* или *размер объекта* оцениваются по количеству попадающих в него ячеек (или узлов), при таком определении связная одномерная «линия» всегда имеет ненулевую «площадь». Объекты значительной площади (*значительные*, или *экстремальные объекты*), составляющие выборку

для приложения теории экстремумов, извлекаются из временной последовательности полей, которая отражает некоторую *непрерывно* развивающуюся синоптическую мезомасштабную *ситуацию*, или *дождевую систему* [1, 4, 32, 42]. Под *точной непрерывной* последовательностью полей понимается чередование их временных сроков в исходной 10-минутной дискретности; будем называть просто *непрерывной* такую последовательность, в которой, ввиду возможных аварий или нарушений информационного потока, допускаются один-два пропуска между соседними полями с возможностью интерполяции недостающих значений.

Пороговые значения определяются на основе документированного опыта и по результатам авторских экспериментов с полями осадков, а также с пакетами статистической обработки. Например, интенсивность 1 мм/ч для 10-минутных радиолокационных сумм является в климатологическом смысле достаточно высокой в средних широтах [1, 2, 11, 12], и в наших экспериментах такой порог обеспечивает не только заметные по площади объекты, но и временную непрерывность содержащих их полей в вышеуказанном смысле.

Объекты, *ситуации* и *объемы выборок* в точках полей осадков имеют важные статистические и географические свойства [31]; в частности, фундаментальные соотношения между пространственными и временными масштабами в метеорологических полях лежат в основе использованной модели наукастинга [13, 29, 51–53]. Заметим, что методы анализа пространственных характеристик областей осадков, включая экстремальные, давно применяются в гидрологии и содержатся в соответствующих нормативных документах ВМО [5, 57]. Описанию и анализу этих особенностей полей наблюдений и прогнозов в серии проведенных испытаний посвящена настоящая, *первая статья* предполагаемой серии. Качество прогнозов областей осадков значительной площади на основе обобщенного распределения Парето и качество прогнозов на основе отношения пространственных долей с помощью показателя *FSS* будут проанализированы во *второй* и *третьей статьях* предполагаемой серии соответственно; в этих работах областями испытаний являются круговые обзоры отдельных радиолокаторов. Результаты верификации прогнозов по полю, объединяющему обзоры 28 локаторов на Европейской территории России, планируется привести в *четвертой статье*.

Сделаем несколько частных замечаний. Иллюстративные примеры относятся к конкретным случаям, отдельным локаторам и выделенным срокам наблюдений и прогнозов, но суммарные статистические характеристики рассчитывались для всех локаторов (с небольшими исключениями), для обоих периодов испытаний и различных прогностических сроков. Расчетные и графические операции производились с помощью библиотек и функций в среде языка R, картографические образы создавались с помощью системы сеточного и графического анализа Grads. Большинство расчетов содержало разномасштабные числа, которые было

бы естественно округлять и обобщать, однако для полноты представления мы предпочли сохранять основную их часть в исходном, не обработанном, но максимально точном виде.

1. Построение объединенного поля радиолокационных данных на Европейской территории России

Опишем область ответственности усовершенствованной схемы наукастинга 2020 г. и методы построения объединенного (или *композитного*) поля. На оперативной карте Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) (рис. 1а) эта область выделена синим полигоном, в нерегулярных координатах которого размещена сетка с 1951 точками по юго-восточной и северо-западной сторонам и 2151 точками по юго-западной и северо-восточной сторонам. Внутри этого полигона в настоящее время эксплуатируются двадцать восемь ДМРЛ-С: RUDO (Оренбург), RUDP (Петрозаводск), RUTD (Тамбов), RUDX (Архангельск), RAVO (Воейково), RAKT (Котлас), RUDB (Брянск), RUDV (Вологда), RUDG (Волгоград), RATL (Тула), RAKD (Краснодар), RUDT (Ставрополь), RUWJ (Валдай), RAMI (Миллерово), RAVN (Внуково), RAKU (Курск), RUDI (Ижевск), RAYL (Элиста), RUDL (Смоленск), RASM (Самара), RABG (Белгород), RUDM (Мин. Воды), RUDK (Кострома), RUDZ (Казань), RAVL (Вел. Луки), RUDU (Уфа), RUDN (Ниж. Новгород), RAKW (Киров). В предыдущей схеме наукастинга и в испытаниях 2017-2019 гг. были задействованы девять р/л, покрывающих в основном территорию ЦФО: RAVO, RUDB, RATL, RUWJ, RAVN, RAKU, RUDL, RUDK, RUDN.

Объединенные поля наблюдений и прогнозов, как и поля показателей качества, отображаются на *условную географическую карту* (рис. 1б), на которой сохранена структура расположения локаторов, а географическая сеть задана в регулярных широтно-долготных координатах 45–65° и 30–50° с подходящими инкрементами для вложения матрицы размером 2151×1951.

Применение условной картографии оправдано тем, что в рабочей версии системы Grads существует только два способа географического представления данных – в виде регулярной географической сетки или с помощью точечных координат (в нашем случае в количестве порядка четырех миллионов). Очевидно, в последнем случае и составление координат в текстовом формате, и выведение в графику с помощью внутренних процедур сглаживания превращаются в трудно исполнимое предприятие. К тому же детальная географическая картина на данном этапе анализа не требуется. Названия пунктов на рис. 1б в центрах кругов соответствуют спецификации оперативной карты радиолокационной сети ЦАО, прямыми линиями выделены ориентировочные направления на страны света.

Опишем процедуру формирования композитного поля. Входные композиты размером 2151×1951, заполненные вначале признаками

отсутствия данных (числом -999), замещаются в соответствующих координатах оценками интенсивности осадков, которые формируются в ЦАО в виде квадратных матриц размером 504×504 с вложенными круговыми зонами обзора. В областях перекрытия зон обзора локаторов значение интенсивности рассчитывается с помощью линейной весовой формулы с приоритетом ближайшего локатора.

Полученные композиты подаются на вход модели pySTEPS, и на первом шаге расчетного алгоритма по точкам с ненулевой интенсивностью определяется поле адвекции – направление и скорость движения. Дальнейшие операции перемещения, разложения на каскады и экстраполирование по времени формируют эволюцию процесса, а возмущения движения и эволюции на каждом шаге порождают прогностический ансамбль объединенных полей. Возмущения генерируются датчиком нормально распределенных случайных чисел, параметры которого настроены на стандартные ошибки радиолокационных оценок осадков.

Выходные поля модели не содержат признаков отсутствия данных, кроме тех случаев, когда движение начинается от края видимой зоны. Точки с константами отсутствия в исходных радиолокационных полях переносятся на каждом шаге прогноза в выходное поле модели. Несомненно, полезное свойство усовершенствованной схемы состоит в том, что адвекция точек поля с числовым значением позволяет заполнять осадками некоторые точки, которые исходно были "пустыми" [54].

2. Выборки объектов значительной площади: *ситуации с пиком*

В нашем подходе рассматривается оценка способности модели воспроизводить статистические характеристики тех областей осадков, площадь которых либо максимальна, либо превышает некоторый пороговый уровень. Как известно, распределения экстремальных величин описываются теоремой Фишера – Типпета – Гнеденко (*первая теорема* теории экстремальных величин, ТЭВ), а распределения превышений порогового уровня описываются теоремой Пикандса – Балкема – де Хаана (*вторая теорема* ТЭВ). В рамках каждой из этих моделей существует по три основных *закона притяжения*, т. е. три класса распределений, к которым асимптотически стремятся распределения некоторым образом нормированных экстремумов (см., например, монографии [9, 10, 28, 33, 46, 47]). Так как исходные данные являются временными последовательностями полей, то статистический анализ может рассматриваться в рамках теории выбросов ("максимумов", "пиков", "превышений") случайных процессов (см., например, монографии [6, 7, 15, 17, 18, 26]).

Проблемы моделирования на основе этих двух теорем ТЭВ относятся к "классической теории экстремальных величин", считающейся в некотором смысле завершенной [7]. Однако *статистический анализ* экстремальных величин по конкретному набору данных (*статистический вывод*) оказывается намного более сложным и далеким от завершения,

что отмечается во всех литературных источниках по ТЭВ, затрагивающих проблемы приложений теорем к практике. Эти сложности относятся в первую очередь к проверке условий используемых теорем ТЭВ. Доказать корректность подготовленной выборки (что равносильно проверке соответствия выборки условиям соответствующей теоремы) не только затруднительно, но скорее всего невозможно: "вопрос о проверке выполнения в реальности условий теоремы чаще всего не может быть не только решен, но даже и поставлен" [27]. При моделировании *пиков над порогом* вышеуказанная проверка превращается в корректный выбор порога, а так как для анализа экстремальных значений временных рядов выборка формируется с учетом временной локальности пиков, то приходится дополнительно определять подходящие временные интервалы – носители искомых экстремумов. Для подтверждения условий *второй теоремы* ТЭВ мы учитываем физические и эмпирические представления о характерных пространственно-временных особенностях мезомасштабных осадков [1, 4, 12, 31, 32, 42], а также пуассоновское распределение моментов времени появления экстремумов над выбранными порогами [8, 15, 18, 24, 25, 30, 41, 44, 46, 56].

Конкретизируем некоторые понятия и термины. Будем называть носители искомых пиков *ситуациями с пиком*, или *ситуациями*, со следующим определением – это последовательность полей осадков с интенсивностью не менее 1 мм/ч хотя бы в одной точке в каждом поле и с наличием в этой последовательности хотя бы одного поля с областью сплошных осадков, площадь которой превышает заданное пороговое значение. В данном случае сплошность, или связность области являются характеристиками пространственного осреднения. Порог 1 мм выбран намеренно таким же, как и порог для идентификации *объектов*.

По каждому периоду тестирования из последовательностей около 20 тысяч полей осадков выделялись *непрерывные* (в ранее определенном смысле) последовательности таких полей, в каждом из которых содержатся *объекты* со значениями интенсивности, не меньшими 1 мм/ч. Допускаются пропуски между соседними полями вплоть до 20 минут, которые назовем *интервалами сцепления*. Это отсутствие полей было либо физическое из-за сбоев в информационном потоке, либо алгоритмическое, вызванное занижением интенсивности осадков и "потерей" *объектов* на значениях, чуть меньших 1 мм.

Задача комплектации *значительных объектов* в выборки для верификации с помощью распределения Парето решалась экспериментально на основе анализа гистограмм распределения размеров всех объектов с особым вниманием к правым хвостам этих распределений. Процедуры выделения ситуаций применялись к последовательностям полей наукастинга всех заблаговременностей от 10 до 120 минут. Пороги превышения определялись также экспериментально по набору 625, 900, 1225 и 1600 точек поля и с предпочтением таких значений, которые приводят к наиболее устойчивым оценкам параметров распределения Парето.

3. Особенности определения и выделения объектов

Выделение объектов производится с помощью функции FeatureFinder библиотеки SpatialVx [37] из хранилища языка R на основе следующих параметров:

– порог идентификации – 1 мм/ч;

– параметр свертки (радиус осреднения) – 9 узлов сетки (~18 км);

– минимальные размеры (они же *пороговые значения размера*, или *параметры положения* распределения Парето, или *параметры Парето*) – 625=25×25, 900, 1225, 1600=40×40 узлов сетки (линейный размер одной ячейки равен 2 км).

Подчеркнем еще раз, *объект* выделяется *после* пространственного сглаживания поля.

Рассмотрим пример функционирования модели STEPS и пакета SpatialVx на осадках локатора RAKU (Курск). Обратим внимание только на общую форму объектов без указания значений интенсивности. В качестве начальных данных модели STEPS берутся два последовательных поля отражаемости размером 504×504 км, при этом радиолокационные наблюдения заполняют вписанный круг обзора, вне которого размещаются константы отсутствия. Для использования в модели эти поля интерполировались в сетку 256×256 с разрешением около 2 км, а в процессе преобразования отражаемости в интенсивность осадков константы отсутствия вне круга обзора заменялись небольшими положительными числами порядка 10^{-3}. Указанные манипуляции требовались по условиям функционирования модели STEPS, в которой двумерное преобразование Фурье применялось к полному числовому полю данных, а линейный размер поля должен был выражаться степенью двойки.

Расчет характеристик объектов и графическое представление самих объектов с помощью пакета SpatialVx начинается с прогнозов на первый срок 10 минут (рис. 2а). В этом примере порог равен 1225 точек (эквивалент квадрата со стороной 70 км); хорошо видно, что радиус осреднения в 9 узлов и минимальный порог площади устранили множество мелких несущественных объектов. Построение пар сравниваемых объектов производится по минимальному расстоянию между *центроидами* полей наблюдения и прогноза (т. е. формально рассчитанными "центрами тяжести объектов"); спаренные объекты отмечаются одинаковым цветом.

Как видно по первой строке панелей (рис. 2а), уже на следующем шаге регрессионной схемы происходят несущественные, но заметные изменения выделенного объекта прогнозирования. К сроку 60 мин сам объект (внутри изолинии 1 мм) теряет в площади, но мало изменяет ориентацию, хотя объект в поле наблюдения развернулся примерно на 10–25° против часовой стрелки с усилением полосы интенсивности в южной части, направленной на СВ. К концу прогностического интервала (рис. 2в) объект наблюдения разбивается на два, а прогностический объект, заметно

отставая во вращении, переключается алгоритмом спаривания на "отделившийся аппендикс" – верификация прогноза первоначального объекта теряет смысл. К этому сроку прогноза из атрибутов объектов, по которым еще можно оценивать качество прогноза, осталась, по-видимому, только максимальная площадь объекта в полном поле, а поскольку подобная "потеря пары" встречается довольно часто, то выбор максимальной площади объекта в качестве величины для верификации получает дополнительный кредит.

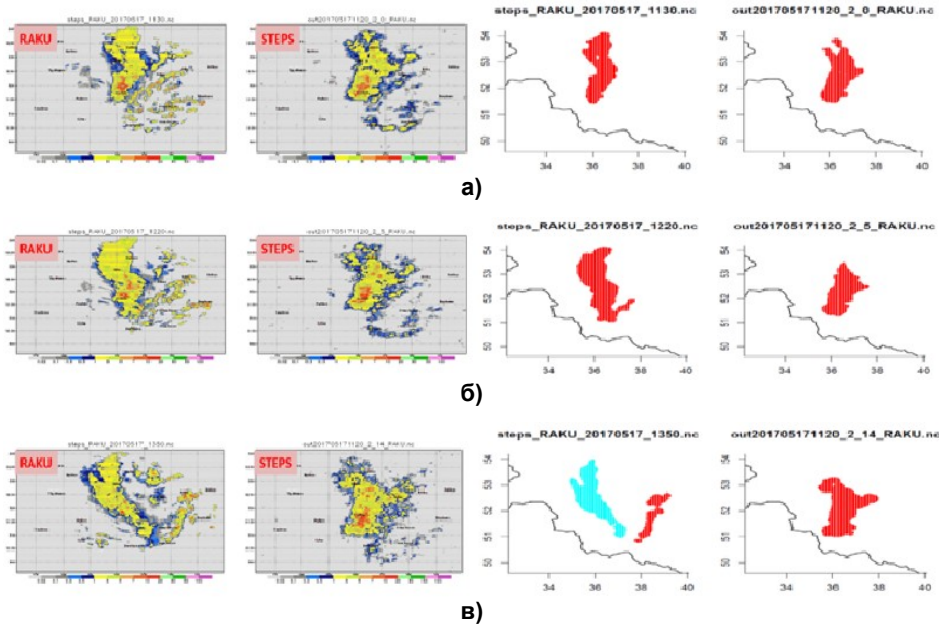


Рис. 2. Эволюция полей и объектов в наблюдении (RAKU, 1-й и 3-й столбцы) и в прогнозе (STEPS, 2-й и 4-й столбцы) через 10 мин (а), 60 мин (б) и 150 мин (в). Затенённые столбцы слева – эволюция полей осадков в исходном разрешении (сторона ячейки около 2 км), светлые столбцы справа – эволюция выделенных объектов с заданными параметрами порога интенсивности осадков (1 мм/ч), радиусом осреднения 9 точек поля (18 км) и минимальным размером 35×35. Красным цветом в двух правых столбцах выделены спаренные объекты, для которых далее рассчитываются характеристики ошибок. Синий объект в наблюдении (в) – объект, оставшийся к концу прогностического интервала "без пары".

Fig. 2. Evolution of fields and objects in the observations (RAKU radar, the 1st and 3rd columns) and in the forecast (STEPS, 2nd and 4th columns) in 10 min (a), 60 min (b), and 150 min (c). Shadowed columns on the left represent the evolution of precipitation fields in the original resolution (grid cell side of about 2 km), the light-colored columns on the right are the evolution of the objects determined with the following parameters: precipitation threshold (1 mm/h), convolution radius of 9 grid points (18 km), and the minimum size of 35×35 (70×70 km square). Red in the columns on the right indicates matched objects, for which the scores are calculated. The blue object in (c) is "unpaired".

3.1. Статистические характеристики ситуаций и объектов

Будем предполагать, что в последовательности полей, организованных в 10-минутной дискретности и обладающих объектами достаточно большого размера, можно возместить отсутствие одного поля или двух соседних полей интерполированием, пользуясь инерцией физического процесса: можно сказать, ситуация сшивается по *интервалу сцепления* в 20 мин. Максимальный размер объекта в каждой *ситуации с пиком* послужит выборочным значением для оценки распределения Парето с *параметром положения* из указанного выше набора 625, 900, 1225 и 1600 точек.

Рассмотрим временной ход площади максимального объекта в последовательных полях обзора локатора Курск в период 5–19 мая 2017 г. (рис. 3); на график наносятся только значения не меньше 625 точек. Сроки с *пиками* отмечены синими линиями; предполагается, что они случайно разбросаны по оси времени в соответствии с простым потоком Пуассона. Отметим несколько особенностей на рис. 3. Как оказалось, в интервале 10.50–12.20 ч ВСВ наблюдения полностью отсутствовали, поэтому пик 0508_1020 следовало бы аннулировать, что, однако, нельзя было исполнить в режиме автоматизированной обработки. Наконец, серия значительных площадей в конце выделенного интервала (до срока 0519_1930) относится к ситуации, выходящей за пределы интервала данного рисунка.

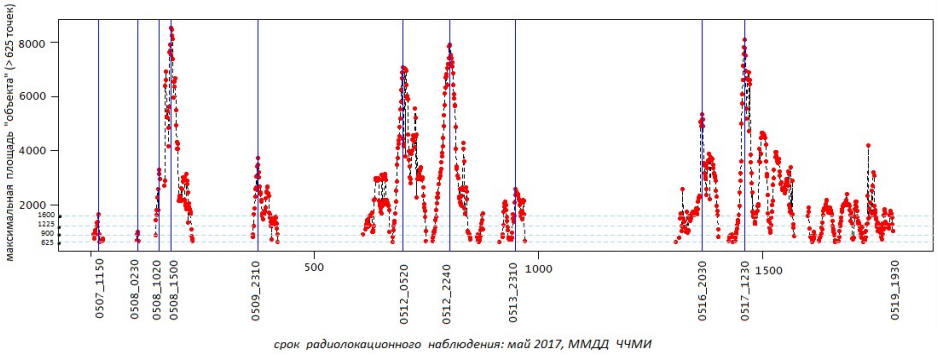


Рис. 3. Площади объектов в последовательных полях наблюдений р/л Курск в период с 5 по 19 мая 2017 г., превышающие порог 625 точек (красные точки). Синие линии соответствуют срокам и максимальным площадям среди объектов, принадлежащих отдельной "ситуации". На оси времени представлены все сроки наблюдений, интервалы с отсутствием точек указывают либо на пропуски, либо на отсутствие объектов, имеющих размер не менее 625 точек.

Fig. 3. Areas of objects not less than the threshold of 625 grid points (red points) in consecutive observation fields of the Kursk radar from 09 May to 19 May 2017. Blue lines correspond to times and the maximum areas among the objects belonging to a situation. The time axis shows all the observation times, intervals without points indicate either missing data or absence of the objects not less than 625 grid points.

Точная информация об *объектах* в нескольких последовательных сроках выделенного интервала показана в табл. 1. В частности, видно наличие полей с набором из нескольких подходящих объектов, включая объекты размером в одну точку.

Таблица 1. Пример ситуации "0507_0910 – 0507_1810" с указанием в полях наблюдения локатора Курск площадей всех выделенных объектов, максимальной площади среди объектов одного поля и "пиковой" площади всей ситуации, используемой в выборке *пиков над порогом*. Отобраны максимальные площади размером не менее 625 точек

Table 1. Example of the situation "0507_0910 – 0507_1810" for the Kursk radar, with the areas of all identified objects, maximum area among the objects of one field, and the "peak" area of the situation used in the *peaks-over-threshold* sample. Maximum areas of not less than 625 grid points are used

Срок	Набор площадей всех объектов поля	Суммарная площадь	Максим. площадь	ПИК "ситуации"
0507_0830		0		
0507_0840		0		
0507_0850		0		
0507_0900		0		
0507_0910	215	215		
0507_0920		0		
0507_0930	257	257		
0507_0940	301	301		
0507_0950	308	308		
0507_1000	422	422		
0507_1010	912	912	912	
0507_1020	769 32 27 89	917	769	
0507_1030	892 127 18 27 72	1136	892	
0507_1040	1086 188 1	1275	1086	
0507_1050	1038 184	1222	1038	
0507_1100	903 235 24	1162	903	
0507_1110	1237 44 1 16	1298	1237	
0507_1120	1350 19 29 66	1464	1350	
0507_1130	1376 568 10 31 18	2003	1376	
0507_1140	1377 749 21 17 8	2172	1377	
0507_1150	**1666 18 12 10**	**1706**	**1666**	**1666**
0507_1200	1637 6	1643	1637	
0507_1210	452 929	1381	929	
0507_1220	421 188 55 20 653	1337	653	
...		...		
0507_1710	491	491		
0507_1720	470	470		
0507_1730	505	505		
0507_1740	556	556		
0507_1750	569	569		
0507_1800	105	105		
0507_1810	99	99		
0507_1820		0		
0507_1830		0		

Соберем в один рисунок несколько характерных полей наблюдений, содержащих *пики*, и соответствующие прогнозы на эти сроки со стартом на час раньше (рис. 4).

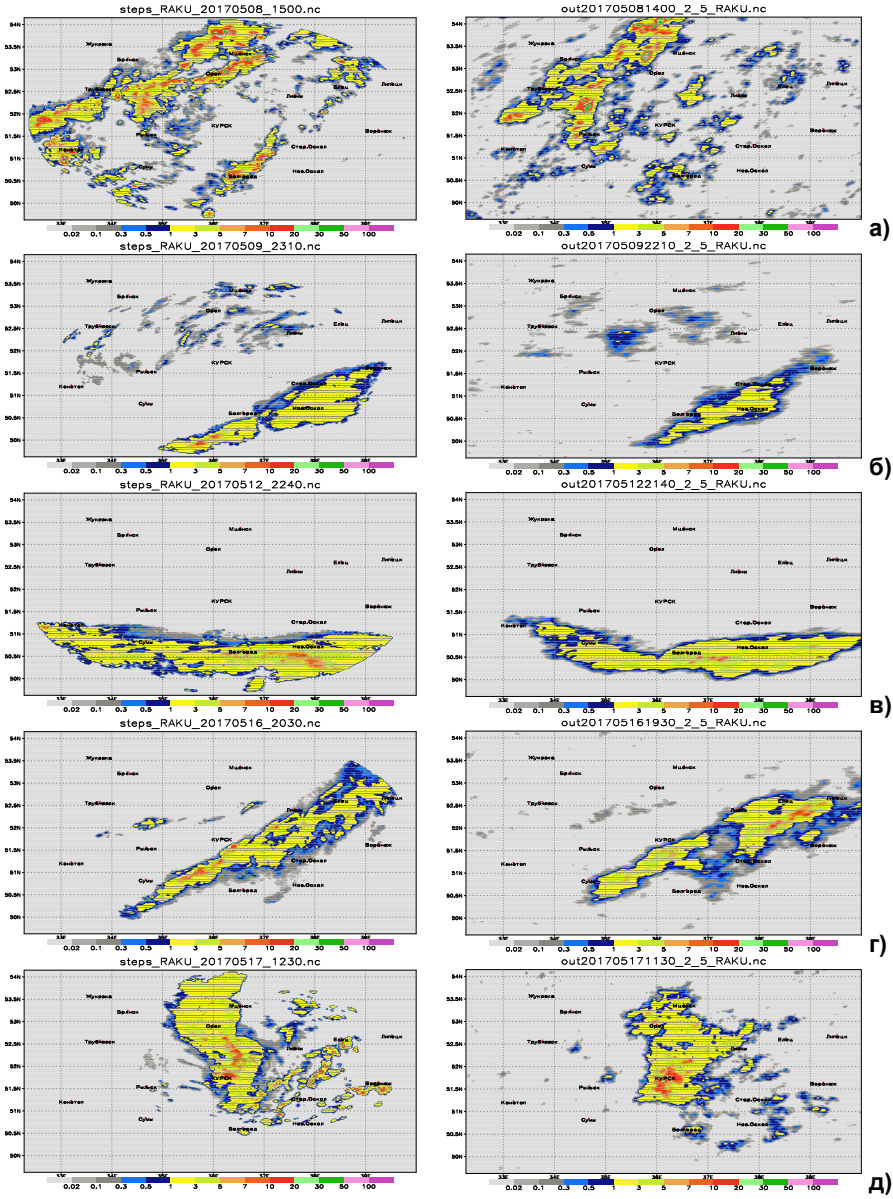


Рис. 4. Левый столбец панелей: поля радиолокационных осадков, полученных по данным наблюдений локатора Курск и содержащих объекты *пиковой* площади, выделенные на рис. 3. синими линиями. Площади объектов (в количестве точек): 8516 (а); 3747 (б); 7895 (в); 5337 (г); 8098 (д). Правый столбец панелей: прогноз на эти сроки наблюдений, выпущенный часом раньше.

Fig. 4. Left column: the Kursk radar precipitation fields containing the objects with *peak* areas indicated with the blue lines in fig. 3. Areas of objects in grid points: 8516 (а); 3747 (б); 7895 (в); 5337 (г); 8098 (д). Right column: forecast for this time issued one hour earlier.

Необходимо иметь в виду, что поле наблюдения состоит из фактических значений интенсивности осадков только внутри вписанного круга, границы которого заметно проявляются при наличии осадков (например, левые панели а, б, в, г); в то же время "пустоты" в полях прогноза могут заполняться прогностическими данными (правые панели а, г). Добавим, что на рис. 3 фактические поля наблюдений представлены в разрешении 1 км, а поля соответствующих прогнозов – в разрешении 2 км.

В табл. 2 и 3 собраны суммарные характеристики всех выделенных ситуаций с учетом количества и размеров объектов в полях обзора локатора RAKU (Курск) и в соответствующих прогностических полях за пять месяцев теплого периода 2017 г. Табл. 2 и 3 отличаются лишь минимальным размером идентифицируемых объектов – не менее 625 и не менее 1600 точек поля, соответственно. *Пики* ситуаций – это значения площади объектов в столбце max.

Сделаем несколько замечаний. *Первое замечание* относится к методу выделения ситуаций при разных порогах. Сравним первые строчки первых частей обеих таблиц, относящихся к радарным наблюдениям: ситуация длительностью 550 минут (9 часов 10 минут) содержит 19 объектов размером не менее 625 точек и всего 2 объекта размером не менее 1600 точек. Так как несколько объектов могут «населять» одно поле, то их формально просуммированное по каждому полю количество (в столбце objs) может существенно превышать количество полей в ситуации. Однако количество синоптических объектов мезомасштабных размеров, изменяющихся в пространстве и во времени на протяжении одной *ситуации*, как правило, на порядки меньше общего количества *ситуаций* (см. по этому поводу обсуждение *эволюции объектов во времени* в статье [32]). А ввиду вложенности ситуаций друг в друга "по образцу матрёшки" (см. табл. 1), объекты размером не меньше 1600 точек находятся в выборке объектов размером не менее 625 точек – в набор *пиковых* значений в обоих случаях попадает одно и то же значение 1666. Дополнительно отметим, что во втором случае – при двух выделенных объектах – все квартили оказываются различными из-за линейной интерполяции, автоматически проводимой на не менее двух значениях.

Второе замечание касается количества выделенных ситуаций в прогнозах в сравнении с наблюдениями. Автоматическое выделение ситуаций нуждается иногда в корректировке из-за сбоев в технологии прогнозирования. Так, в период первого испытания технологии наукастинга в 2017 г. потери в прогнозах составляли до 10–12 % от максимально возможного количества в 22032 10-минутных интервалов [21, табл. 1]. Такие потери означают пробелы в непрерывной последовательности полей, приводящие иногда к короткоживущим ситуациям длительности от 10 до 30 мин. С учетом таких потерей можно сделать вывод о примерно 20%-м росте количества выделенных ситуаций в прогностических полях при прогнозе на 60 мин для обоих порогов 625 и 1600 точек.

Таблица 2. Характеристики выделенных «ситуаций» в ряду наблюдений и наукастинга по данным радиолокатора Курск в теплый период года (май-сентябрь 2017 г.). Размер идентифицируемого объекта – не менее **625 точек поля**
Table 2. Characteristics of indentified situations in observations and nowcasting data series from the Kursk radar during the warm period (May-September 2017). Object size not less than **625 grid points**

sit	min	q25	med	q75	max	objs	drt	d_time_start	d_time_stop
Радиолокатор КУРСК									
1	653	754	912	1294	1666	19	550	2017-05-07 09:10	2017-05-07 18:10
2	666	714	907	924	1022	5	150	2017-05-08 00:50	2017-05-08 03:10
3	893	1529	1828	2770	3292	11	140	2017-05-08 08:30	2017-05-08 10:40
4	678	2112	2895	5790	8516	67	750	2017-05-08 12:30	2017-05-09 00:50
5	647	1412	1720	2460	3747	56	720	2017-05-09 20:50	2017-05-10 08:40
6	645	1694	2910	3886	7087	141	1470	2017-05-11 14:00	2017-05-12 14:20
7	634	1202	2444	4677	7895	111	1400	2017-05-12 15:10	2017-05-13 14:20
8	628	1184	1676	2110	2600	49	720	2017-05-13 16:10	2017-05-14 04:00
9	629	1210	1753	3032	5337	108	1130	2017-05-16 08:20	2017-05-17 03:00
10	628	954	1584	2328	8098	386	3970	2017-05-17 04:40	2017-05-19 22:40
. . . . .									
83	638	768	899	985	1071	3	300	2017-09-18 10:20	2017-09-18 15:10
84	629	676	704	747	1040	10	270	2017-09-18 17:20	2017-09-18 21:40
85	684	1396	2974	5066	7720	140	1670	2017-09-20 00:00	2017-09-21 03:40
86	627	855	1090	1188	1339	15	420	2017-09-24 05:40	2017-09-24 12:30

sit	min	q25	med	q75	max	objs	drt	d_time_start	d_time_stop
Прогностическая система STEPS									
1	680	1146	1426	1757	2296	30	760	2017-05-07 09:20	2017-05-07 21:50
2	685	753	821	900	978	3	300	2017-05-07 22:30	2017-05-08 03:20
3	634	1142	1914	2284	3187	8	130	2017-05-08 08:40	2017-05-08 10:40
4	655	2056	4079	6048	9031	67	750	2017-05-08 13:00	2017-05-09 01:20
5	646	662	672	705	794	4	340	2017-05-09 14:50	2017-05-09 20:20
6	1113	1732	2468	3153	4380	14	180	2017-05-09 21:10	2017-05-10 00:00
7	684	1536	1964	2556	3580	42	620	2017-05-10 00:30	2017-05-10 10:40
8	708	722	767	911	918	5	200	2017-05-10 15:00	2017-05-10 18:10
9	628	1418	2560	3814	7514	140	1480	2017-05-11 14:20	2017-05-12 14:50
10	659	2407	3780	6488	8523	45	490	2017-05-12 15:50	2017-05-12 23:50
. . . . .									
115	628	1341	2537	4740	6824	119	1550	2017-09-19 22:10	2017-09-20 23:50
116	654	1399	1635	2763	3667	17	290	2017-09-21 00:20	2017-09-21 05:00
117	637	638	640	664	688	3	210	2017-09-23 03:20	2017-09-23 06:40
118	756	913	977	1131	1598	14	420	2017-09-24 06:00	2017-09-24 12:50

Примечание. Интервал сцепления равен 20 мин. Минимальный размер связного объекта составляет 625 точек поля. Экстремумы и оценки квартилей размеров всех объектов ситуации (в количестве внутренних точек) размещены в столбах min, q25 (25%-й квартиль), med (медиана), q75(75%-й квартиль) и max. В столбцах objs и drt находятся количество пиков (объектов размера не меньше 625 точек в данной ситуации) и длительность ситуации (в минутах) соответственно. Два последних столбца содержат начальную и конечную дату и время ситуации (включительно).

Таблица 3. Характеристики выделенных «ситуаций» в ряду наблюдений и наукастинга по данным радиолокатора Курск в теплый период года (май-сентябрь 2017 г.). Размер идентифицируемого объекта – не менее **1600 точек поля**
Table 3. Characteristics of indentified situations in observations and nowcasting data series from the Kursk radar during the warm period (May-September 2017). Object size not less than **1600 grid points**

sit	min	q25	med	q75	max	objs	drt	d_time_start	d_time_stop
Радиолокатор КУРСК									
1	1637	1644	1652	1659	1666	2	550	2017-05-07 09:10	2017-05-07 18:10
2	1623	1825	2432	2997	3292	8	140	2017-05-08 08:30	2017-05-08 10:40
3	1635	2176	3026	6257	8516	62	750	2017-05-08 12:30	2017-05-09 00:50
4	1651	1886	2415	2656	3747	33	720	2017-05-09 20:50	2017-05-10 08:40
5	1609	2182	2977	4256	7087	111	1470	2017-05-11 14:00	2017-05-12 14:20
6	1644	2316	3336	6098	7895	78	1400	2017-05-12 15:10	2017-05-13 14:20
7	1608	1789	2088	2256	2600	28	720	2017-05-13 16:10	2017-05-14 04:00
8	1600	1805	2325	3535	5337	70	1130	2017-05-16 08:20	2017-05-17 03:00
9	1605	1863	2362	3580	8098	190	3970	2017-05-17 04:40	2017-05-19 22:40
10	1607	1749	2170	2697	3815	71	790	2017-05-21 09:30	2017-05-21 22:30
. . . . .									
42	1621	1801	2056	2324	4489	28	830	2017-09-05 07:50	2017-09-05 21:30
43	1602	1638	1658	1770	1844	8	590	2017-09-10 00:50	2017-09-10 10:30
44	1603	1603	1603	1603	1603	1	300	2017-09-13 11:10	2017-09-13 16:00
45	1602	2648	3572	5756	7720	103	1670	2017-09-20 00:00	2017-09-21 03:40

sit	min	q25	med	q75	max	objs	drt	d_time_start	d_time_stop
Прогностическая система STEPS									
1	1643	1713	1904	1981	2296	12	760	2017-05-07 09:20	2017-05-07 21:50
2	1793	2034	2249	2391	3187	5	130	2017-05-08 08:40	2017-05-08 10:40
3	1601	2396	4501	6270	9031	59	750	2017-05-08 13:00	2017-05-09 01:20
4	1673	2188	2947	3444	4380	11	180	2017-05-09 21:10	2017-05-10 00:00
5	1616	2019	2291	2860	3580	28	620	2017-05-10 00:30	2017-05-10 10:40
6	1629	2448	3222	4135	7514	98	1480	2017-05-11 14:20	2017-05-12 14:50
7	1823	3324	5638	6702	8523	35	490	2017-05-12 15:50	2017-05-12 23:50
8	1620	1952	2492	4519	6871	42	920	2017-05-13 00:20	2017-05-13 15:30
9	1604	1906	2165	2482	3264	26	950	2017-05-13 16:40	2017-05-14 08:20
10	1631	2044	2704	4121	5841	54	930	2017-05-16 08:30	2017-05-16 23:50
. . . . .									
61	1604	1849	2124	2463	3364	30	730	2017-09-05 08:20	2017-09-05 20:20
62	1642	1719	1838	1970	2215	10	600	2017-09-10 01:50	2017-09-10 11:40
63	1605	2684	4066	5366	6824	78	1550	2017-09-19 22:10	2017-09-20 23:50
64	1635	2058	2763	2949	3667	9	290	2017-09-21 00:20	2017-09-21 05:00

Примечание. Интервал сцепления равен 20 мин. Минимальный размер связного объекта составляет 1600 точек поля. Экстремумы и оценки квартилей размеров всех объектов ситуации (в количестве внутренних точек) размещены в столбах min, q25 (25%-й квартиль), med (медиана), q75(75%-й квартиль) и max. В столбцах objs и drt находятся количество пиков (объектов размера не меньше 1600 точек в данной ситуации) и длительность ситуации (в минутах) соответственно. Два последних столбца содержат начальную и конечную дату и время ситуации (включительно).

Увеличение количества ситуаций с ростом заблаговременности в обновляющихся каждые 10 минут прогнозах происходит чаще всего дроблением одной ситуации из-за таких взаимосвязанных эффектов, как статистическое сглаживание, снижение количества точек поля с высокой интенсивностью, расширение областей сплошных осадков. При этом расширение областей может приводить к порождению «новых» ситуаций в последовательностях прогностических полей из-за ригористического исключения точки из объекта по неравенству "строго меньше".

Диапазон характеристик выделенных объектов в наблюдениях и прогнозах в теплый период на основе локатора Курск дает дополнительное представление о свойствах прогностической системы. Представим некоторые характеристики ситуаций, немного отредактировав числа ввиду возможных сбоев или ошибок, для порога размеров 625 точек в ситуациях в полях наблюдений и в ситуациях при прогнозах на 30 и 60 минут (табл. 4).

Основной рост количества ситуаций происходит на шаге прогноза до 30 минут (скачок примерно на треть), с ростом заблаговременности рост сохраняется, но не столь сильный, и можно предположить, что сериальная корреляция внутри ситуаций не нарушает независимости пиков соседних ситуаций.

Таблица 4. Диапазоны изменений минимальных (min) и максимальных (max) размеров объектов в выделенных ситуациях. Минимальный размер связного объекта – 625 точек поля

Table 4. Range of minimal (min) and maximal (max) object sizes in the identified situations, Minimal object size is 625 grid points

Поля	Колич. ситуаций	Характеристики выделенных ситуаций и диапазоны их изменений							
		min		max		objs		drt	
		мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
RAKU	86	625	893	625	17989	1	386	90	3970
STEPS-30	117	625	1242	637	18282	1	183	10	1930
STEPS-60	118	625	1113	629	17601	1	185	10	2350

Примечание. objs – количество объектов в полях; drt – продолжительность ситуации в минутах. Интервал сцепления равен 20 мин.

В табл. 5 и табл. 6 представлено количество выделенных ситуаций с параметром сцепления 20 мин по областям обзора всех локаторов (кроме р/л Внуково) для заблаговременностей 30, 60, 90 и 120 минут и для двух пороговых площадей объектов – 625 и 1600 точек.

Таблица 5. Количество выделенных ситуаций в последовательностях полей наблюдений радиолокаторов и прогнозов разной заблаговременности с помощью системы STEPS в теплый период 2017 г. (май-сентябрь). Минимальный размер выделяемого связного «объекта» в поле равен 625 точкам. Параметр сцепления – 20 минут
Table 5. Number of the situations in consecutive fields of radar observations and STEPS nowcasts for different lead times in the warm period (May-September). The minimal object size is 625 grid points. Tie interval is 20 min – two consecutive fields missing in a sequence are allowed

Идентификатор р/л	Наблюдения р/л	**Прогностические поля: заблаговременность (мин)**			
		30	60	90	120
RAKU	86	117	118	121	123
RATL	79	117	117	128	132
RAVO	89	133	141	145	157
RUDB	76	90	96	99	99
RUDK	96	130	142	145	155
RUDL	92	119	123	131	130
RUDN	84	122	129	141	147
RUWJ	85	119	128	138	152

Таблица 6. То же, что и в табл. 5, кроме минимального размера выделяемого связного «объекта» в поле: здесь он равен 1600 точкам
Table 6. As in Table 5, but for the minimal object size of 1600 grid points

Идентификатор р/л	Наблюдения р/л	**Прогностические поля: заблаговременность (мин)**			
		30	60	90	120
RAKU	45	65	64	64	67
RATL	56	71	73	76	76
RAVO	64	81	83	85	95
RUDB	51	57	57	59	60
RUDK	65	79	88	94	96
RUDL	60	79	83	85	92
RUDN	60	87	89	93	95
RUWJ	85	119	128	138	152

Сопоставим основные характеристики ситуаций и объектов с гистограммами распределения всех размеров объектов, выделенных порогом 1 мм/ч. Ограничимся гистограммами для данных локатора Курск (рис. 5), ввиду того, что для остальных локаторов картина сходная.

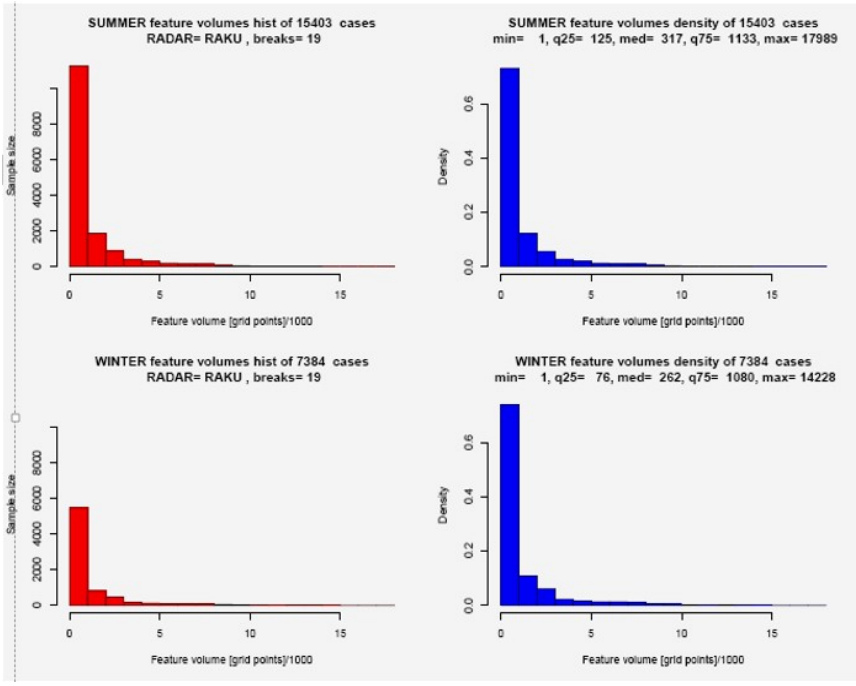


Рис. 5. Гистограммы распределения размеров всех объектов, выделенных порогом 1 мм/ч в полях интенсивности осадков радиолокатора Курск. Верхний ряд панелей – данные по теплому периоду, нижний – по холодному. Красный цвет – количество, синий – частоты. В названии панелей указаны количество связных объектов (cases), количество градаций гистограммы (breaks +1, в левом столбце) и основные характеристики распределения размеров (квартили и экстремальные значения). Для удобства графического представления размер объекта на оси абсцисс поделен на 1000.
Fig. 5. Histograms of the distribution of sizes of all objects identified using the threshold of 1 mm/h in the Kursk radar fields. The upper row is for the warm period, the lower row is for the cold period. Red indicates the number, blue, the frequencies. The number of contiguous objects (cases), histograms categories (breaks + 1, left column), and the basic distribution characteristics (quartiles and extremes) are given above the panels. The object size in abscissa axis is divided by 1000 for convenience.

Количество всех выделенных порогом 1 мм/ч объектов в теплый период примерно вдвое превышает аналогичное количество в зимний период (15403 против 7384, рис. 5, левый столбец), однако характер плотности распределения в основном одинаков (рис. 5, правый столбец). Сопоставим общие статистические характеристики распределения размеров объектов по данным теплого и холодного периода: медиана 317 против 262, 75%-й квартиль 1133 против 1080 и максимальное значение 17989 против 14228. Переход к линейным масштабам объектов (извлечением квадратного корня) позволяет сопоставить полученные результаты с данными [31].

Распределение указанных *пиковых* площадей моделируется в дальнейшем обобщенным распределением Парето с помощью пакета extRemes языка R [40].

3.2. Пуассоновость распределения пиков на временной шкале

Известно, что обобщенное распределение Парето возникает как предельное распределение "пиков над порогом", но не всегда указывается, что выборка *пиков* предполагается взятой из обобщенного распределения экстремальных величин. Более того, если пики расположены на временной оси, как на примере рис. 3, то для выполнения условий первой теоремы об экстремумах *достаточно* соблюдения пуассоновости их распределения. Это предполагает, что отсчеты времени с пиками распределены как *точечный* (или *простейший*) *пуассоновский поток событий* [15, 17, 18, 44, 55], определяемый тремя условиями:

1) *стационарность* – вероятность появления k событий в любом промежутке времени длины s зависит только от k и s и не зависит от начала отсчета данного промежутка;

2) *отсутствие последействия* – появление k событий в промежутке времени не зависит от того, появлялись ли эти события ранее;

3) *ординарность* – появление не менее двух событий за малый промежуток времени "практически" невозможно.

Всем этим требованиям удовлетворяет следующее аналитическое определение потока Пуассона. Обозначим через λ среднее число событий в единицу времени (*интенсивность потока*). Если вероятность появления k событий за время t описывается формулой

$$P_t(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \ ,$$

то условия 1 – 3 автоматически выполняются.

Пуассоновское распределение нетрудно смоделировать с помощью серий независимых псевдослучайных чисел, воспользовавшись обратной функцией показательного распределения для сумм случайных величин (например, [16, стр. 60]). С помощью пакета poisson (из архива R) соответствие потоку Пуассона указанных на рис. 3 сроков было проверено на ансамбле 100 реализаций с последующими оценками средних, медианных, наилучших и наихудших последовательностей точек на оси времени. Интенсивность потока рассчитывается по всему периоду верификации, состоящему округленно из 22000 случаев. Нумерацию сроков увеличим примерно на 200 (предыдущие сутки не имели пиков) и положим длину интервала рис. 3 округленно равной 2000. В архиве наблюдений локатора Курск в теплый период 2017 г. выделено 86 пиков (или *ситуаций*), т. е. интенсивность потока равна $\lambda = 0.0039$, а значение $\lambda t = 7.802$ для интервала рис. 3 дает ожидаемые около восьми пиков. Рис. 6 содержит все реализации точечного процесса Пуассона с параметрами от 1 до 10 для целых

значений распределения Пуассона. На веер построенного ансамбля нанесены штриховой линией квантили 2.5 % и 97.5 % и желтой линией – ожидаемое среднее значение.

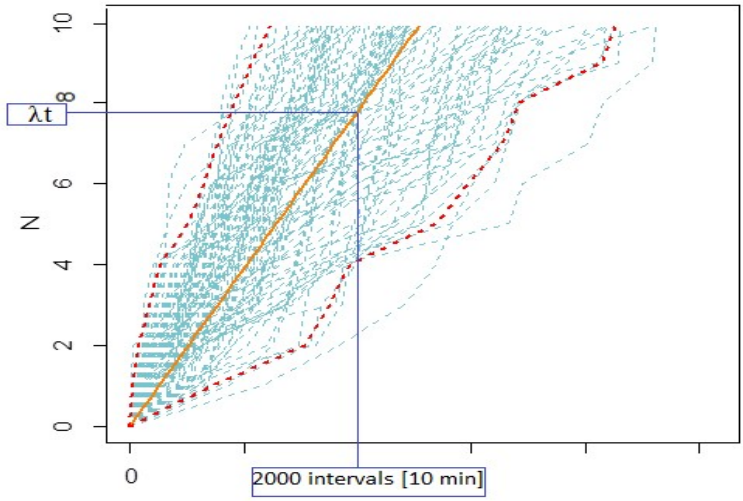


Рис. 6. Ансамбль 100 реализаций потока Пуассона для моментов времени, в которые наблюдались пиковые площади выделенных объектов. Синими линиями отмечены: на оси времени условная длина интервала рис. 3 (2000 сроков), на оси количества пиков – параметр распределения Пуассона, соответствующий ожидаемому количеству пиков на данном интервале. Желтая диагональ соответствует ожидаемому количеству пиков в зависимости от длины интервала. Красные штриховые линии выделяют квантили 2.5 % и 97.5 % номеров соответствующих отсчетов времени; например, верхняя линия квантилей располагает до 8 пиков в первой тысяче сроков, в то время как нижняя линия располагает во всем интервале рис. 3 не более 4 пиков.

Fig. 6. Ensemble of 100 Poisson flow realizations for the time moments of peak object areas. Blue lines on X-axis indicate conditional interval duration of Fig. 3 (2000 times), the axis of peak numbers shows the Poisson distribution parameter corresponding to the expected peak number on this interval. The yellow diagonal corresponds to the expected peak number depending on the interval length. The red dotted lines indicate quantiles 2.5% and 97.5% of the numbers of corresponding time counts; e.g., the upper line of quantiles places up to 8 peaks in the first thousand of times, while the lower line places not more than 4 peaks in the whole interval of fig. 3.

Простейшие характеристики данного ансамбля расположены в табл. 7. Видно, что номера сроков пиковых площадей по рис. 6. входят во внутреннюю часть веера реализаций; наименьшее среднее абсолютное расстояние от номеров отсчетов 100 реализаций указывает на ближайшую реализацию под номером 40. Однако и наблюдаемые сроки, и сроки ближайшей модельной реализации занижены по отношению к медианной и средней реализациям, что, возможно, объясняется наличием мнимых и не устраненных пиков на рис. 3, а также случайным характеров самого

процесса генерирования пуассоновского потока. Приведенный пример проверки пуссоновости процесса может быть легко обобщен на полные интервалы испытаний.

Таблица 7. Номера сроков наблюдений (xobs) и квантилей распределения ансамбля точек отсчета модельного потока Пуассона на интервале до 2000 начальных сроков. Интенсивность потока Пуассона рассчитана для 86 пиковых площадей, не меньших 625 точек. Статистические характеристики модельного ансамбля - min, med, mean, max; ближайшая к наблюдениям реализация сроков - best

Table 7. Numbers of the times (xobs) and of the quantiles of ensemble distribution of the starting points of the modeled Poisson flow in the interval of up to 2000 initial times. The Poisson flow intensity is computed for 86 peak areas not less than 625 grid points. The statistical characteristics of the model ensemble are min, med, mean, max; best is the member closest to the observations

	Пуассоновская реализация десяти последовательных сроков наблюдений в интервале 1–2000									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
xobs	217	305	352	380	573	898	1002	1149	1565	1661
best	247	281	379	491	708	781	932	1063	1330	1680
min	5	16	116	202	315	340	485	802	918	1071
med	180	412	656	871	1108	1292	1577	1942	2184	2411
mean	244	476	744	969	1261	1493	1778	2047	2291	2538
max	1161	1825	2419	2691	3328	3454	4024	4148	4597	4680

4. Выделение полей с объектами значительной площади для оценок *FSS*

Построение выборок для показателя *FSS* намного проще аналогичной процедуры для приложения теории экстремумов. Основной принцип состоит в подборе полей с наличием объектов, площадь которых не меньше 1600 точек, что, напомним, эквивалентно квадрату со стороной около 80 км. Выбор наибольшей пороговой площади из протестированных был обусловлен желанием оценить качество модели в прогнозировании синоптических ситуаций, близких к экстремальным.

Для идентификации объектов в обоих периодах испытаний оставлен один порог (1 мм/ч). Локатор Внуково был исключен из-за незначительного количества выделенных ситуаций в холодный период. Количество накопленных полей с объектами площади не менее 1600 точек указано в табл. 8. Так как выборки составлялись из полей, принадлежащих зачастую одной ситуации, то оказался нарушенным принцип статистической независимости элементов выборки. Этот принцип был отчасти соблюден случайными отборами полей в количестве, не превышающем 200, что имеет порядок количества выделенных *ситуаций* в теплый период года.

Таблица 8. Общее количество прогностических полей (сроков) с наличием объектов, выделенных после пространственного сглаживания с радиусом 9 узлов с помощью изолинии 1 мм/ч и имеющих размер не менее 1600 точек. Теплый период май-сентябрь 2017 г., максимальное количество сроков – 22032; холодный период ноябрь 2017 г. – март 2018 г., максимальное количество сроков – 21744

Table 8. Total number of forecast fields (times) with the objects identified after spatial smoothing with convolution radius of 9 grid pints using the isoline of 1 mm/h and with sizes of not less than 1600 grid points. Warm period is May-September 2017, the maximal number of times is 22032; cold period is November 2017 – March 2018, maximal number of times is 21744

ДМРЛ	**Наблюдение**		**Прогноз (мин)**							
			30		60		90		120	
	тепл	холод	тепл	холод	тепл	холод	тепл	холод	тепл	холод
RAKU	2843	1387	2550	1495	2561	1527	2553	1550	2561	1564
RATL	2378	847	2045	881	2045	908	2046	916	2018	931
RAVN	2147	130	*	*	*	*	*	*	*	*
RAVO	2777	506	2688	619	2728	655	2744	666	2748	687
RUDB	2246	721	1950	822	1936	858	1918	885	1932	884
RUDK	3432	379	3287	369	3266	402	3268	428	3237	445
RUDL	3240	691	3036	798	3036	744	3052	750	3088	753
RUDN	3520	626	3431	671	3456	694	3461	732	3427	767
RUWJ	3755	201	3533	235	3544	254	3554	266	3524	277

Из-за сбоев в информационных потоках в теплый период количество прогнозов оказалось примерно на 10 % меньше количества наблюдений [21], поэтому для корректного сопоставления следует вычесть из наблюдений эти 10 %: например, 2843 заменить на 2559 = 2843 – 284 и т.д.

По столбцам "наблюдение" отчетливо видно, насколько разнообразно количество (fc) отбираемых полей для различных локаторов в оба периода: так, для теплого периода минимальное fc равно 2021, а максимальное – 3379; для холодного периода эти числа равны, соответственно, 201 и 1387 (исключая р/л Внуково). Естественно наследование такого различия в прогнозах. Выявленное разнообразие значений fc затрудняет обобщения по всем локаторам. Например, осреднение этих величин дает превышение значений fc в теплый период над аналогичными значениями в холодный период примерно в 4.5 раза, в то время как по локаторам это отношение колеблется от 2.1 до 9.1 в семи случаях и 18.7 – в одном (Валдай, RUWJ). При этом локатор Валдай обеспечивает максимальное значение fc по теплому периоду и минимальное значение в холодный период и в наблюдениях, и во всех прогностических сроках. Точно так же локатор Брянск (RUDB) обеспечивает минимальное значение fc в теплый период,

а локатор Курск (RAKU) обеспечивает максимальное значение fc в холодный период.

При переходе от наблюдений к прогнозу 30 мин значение fc в теплый период меняется примерно на 100–200 полей: возрастает для пяти локаторов, а падает – для трех локаторов; в холодный период меняется примерно на 70–100 полей, при этом возрастая для семи и падая для одного локатора.

5. Учет пропусков в узлах полей и формирование выборок разных типов

В усовершенствованной системе наукастинга осадков, построенной на новом расчетном ядре pySTEPS, используются 1) расширенный набор форматов данных, 2) блок быстрого двумерного преобразования Фурье без ограничений на размер расчетного поля, 3) новая технология генерирования ансамбля и 4) новая методика обработки пропусков. Основные результаты испытаний системы в теплый период 2020 г. представлены в [22, 23]. Архив испытаний состоял из около 22000 ансамблевых прогнозов на 150 минут в 10-минутной дискретности, при этом каждый из 15 прогностических сроков был представлен ансамблем из 10 полей.

В отличие от предыдущих испытаний (2017–2019 гг.), в которых пропуски (*пустые* точки) замещались малыми положительными числами и проблема отсутствующих данных в принципе не возникала, необходимость обработки пропусков в 2020 г. привела к соответствующему изменению и дополнению стратегии верификации прогнозов с учетом сложившейся методологии обработки пропусков [19, 45, 49, 50]. Для оценки временного и пространственного распределения *пустых* точек проведен анализ полного архива наблюдений и полного архива ансамблевых прогнозов для одной заблаговременности (60 мин). Результаты анализа качества наукастинга, проведенного с помощью средств языка R, представлены в таблицах и графиках. Пространственный анализ производился с помощью квантильного анализа и соответствующих пространственных квантильных функций.

5.1. Статистика пропусков в архивах наблюдений и прогнозов

Пропуски в полях радиолокационных наблюдений. Наиболее удобный прием работы с пропусками заключается в формировании матриц (полей) масок, состоящих из нулей (для "пропусков") и единиц (для "допусков"), соответствующих отсутствию и наличию выбранных числовых данных в точках поля. Сумма таких матриц по всем срокам дает количество допусков в каждой точке, а поточечное произведение матриц эквивалентно пересечению всех матриц по единицам в точках поля, в которых количеством выбранных числовых данных за весь период верификации было максимально возможным.

Матрицу, полученную суммированием всех масок и которую назовем *суммарной маской*, проанализируем с помощью квантилей. Функция quantile языка R имеет на входе список порогов вероятностей, а на выходе набор квантилей, рассчитанных с помощью линейной интерполяции эмпирической функции распределения по методу Хайндмана [43]. В частности, последовательность из 11 порогов 0.0, 0.1, ..., 1.0 выводит такое же количество квантилей, или десятков процентов, от минимального значения (порогу 0.0 соответствует 0 %) до максимального (порогу 1.0 соответствует 100 %). Матрица, полученная *произведением* всех масок, состоит из единиц и нулей, при этом, если в точке поля имеется хотя бы одна дата с пропуском, результат будет равен нулю. Сумма единиц в такой матрице эквивалентна оценке площади (или размера) области без пропусков за весь период верификации.

Рассмотрим вначале *суммарную маску*: наибольшее значение в точке равно 22026, минимально возможное значение равно единице (этот факт, сам по себе довольно любопытный, тоже встречается). При наличии в полях в среднем более 70 % точек с числовыми значениями в пропорции к полному размеру, существуют поля с заметно меньшим количеством "непустых" точек (не более 50 %). Наибольшее количество точек поля с ненулевыми значениями равно 3193798, т. е. примерно в 76 % точек объединенного поля хотя бы раз встречается числовое значение.

Выделим следующие особенности. Во-первых, более 95 % значений точек обеспечено не менее 18372 наблюдениями, а это примерно 95 % от 3193798 "непустых" точек. Одновременно с этим среди 5 % точек могут оказаться точки с чрезвычайно скудным обеспечением: менее 1000 числовых значений было обнаружено во временных рядах 2716 точек поля, менее 10 значений – в 1233 точках и ровно одно числовое значение – в 242 точках. Непросто определить, какое количество точек поля с "непустыми" значениями считать несущественным, и это зависит от формы области: связная область в 2500 точек может занимать квадрат со стороной 50 км, а протяженную линию – в 2500 км.

При шаге вероятности 0.05 квантили распределения значений в точках суммарной маски с ненулевыми значениями собраны в табл. 9.

Простая числовая структура произведения всех масок может дать лишь количество "оставшихся" единиц, которое могло быть также рассчитано по суммарной маске как количество точек с максимальным значением 22036, в данном случае оно равно в точности 721083. Пространственное представление обеих масок приводится на рис. 7 и рис. 8.

Для удобства изображения больших чисел данные на обеих панелях рис. 7 приводятся в долях от максимального количества возможных случаев (22026). Видно четкое проявление кругов обзоров одинакового цвета для одного локатора (одинаковое заполнение числами всех точек поля, кроме теневых областей от местников), при этом наличие перекрывающихся кругов обзора приводит к подавлению теневых областей, кроме,

возможно, не устраненных лучей и конусов р/л Внуково, Нижнего Новгорода, Краснодара (рис. 7а). На карте долей в последнем десятичном интервале (0.90, 0.92, ..., 0.98, 1.00) заметно отсутствие кругов р/л Воейково (0.8–0.9), Вологды (0.5–0.6), Белгорода (0.8–0.9).

Таблица 9. Квантили распределения количества числовых значений в 22026 объединенных полях радиолокационных наблюдений
Tabe 9. Distribution quantiles of the numerical values in 22026 merged radar fields

0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	18347	21000	21468	21812	21855	21884	21911	21936	21986	21994
...продолжение...										
55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	
21998	22013	22018	22023	22023	22026	22026	22026	22026	22026	

Примечание. Шаг частоты равен 0.05 (5 %); минимальное значение соответствует квантилю 0 %, что эквивалентно единственному наблюдению в некоторых точках поля; максимальное значение соответствует квантилю 100 %, что эквивалентно наличию в этих точках максимально возможного количества в 22026 наблюдений.

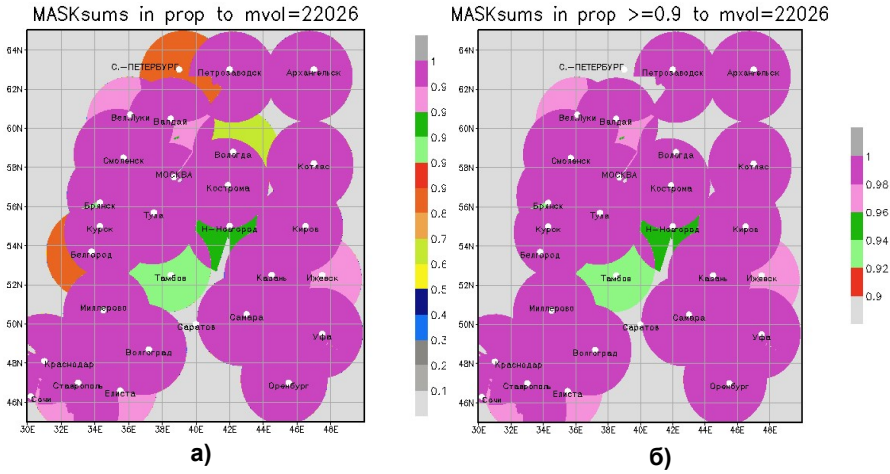


Рис. 7. Карты суммарных масок наличия числовых данных в круговых зонах обзора радиолокаторов усовершенствованной системы наукастинга осадков. Количество представлено в виде долей от максимально возможного значения 22026: весь диапазон значений (от 1 до 22026) (а); значения выше квантиля q(90%) (б).
Fig. 7. The maps of the summary masks of numerical data availability in the radar scanning circle for the improved nowcasting system. The number is represented as the fraction of the maximal possible number of 22026: the whole range from 1 to 22026 (a); values above quantile q(90%) (б).

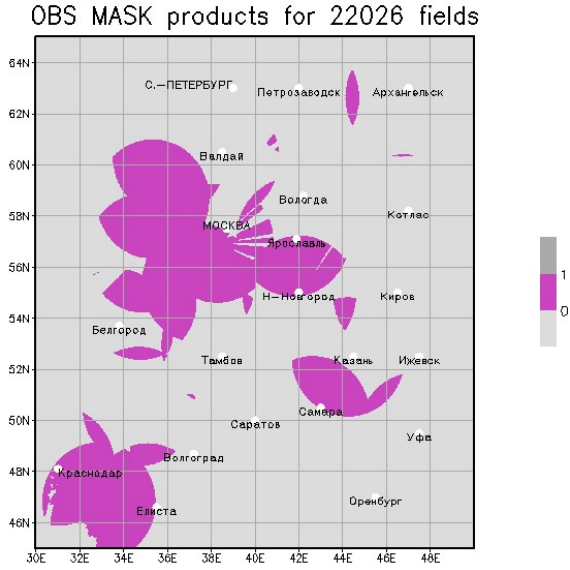


Рис. 8. Поточечное произведение всех масок. В этих точках количество значений максимально (22026). Количество точек с единицами составляет 721083/3193798 = 23 % от количества всех "непустых" точек.
Fig. 8. Grid-by-grid product of all the masks. The number is maximal at these points (22026). The number of points with unity (1) is 721083/3193798 = 23 % of all "not-empty" points.

Можно сделать вывод, что обеспечение данными по всей области наукастинга вполне удовлетворительное, но возникают вопросы частного и общего характера. Например, можно ли считать обеспечение данными области обзора р/л Вологды неудовлетворительным при том, что доли от 0.5 до 0.6 означают суммарно не менее двух месяцев числовых наблюдений (144 срока в сутки)? И каким образом вообще можно оценить влияние асинхронных доступов в точках поля на пространственную согласованность показателей качества?

На карте произведения масок (рис. 8) отчетливо видно, что основная порция максимально обеспеченных точек приходится на области пересечения зон обзора локаторов в центральной части России (область ЦФО) и в районе локаторов Ставрополь и Сочи.

Пропуски в полях прогностических ансамблей. Имеющиеся в полях наблюдений пропуски естественно наследуются полями прогноза, при этом в основном размножаясь с ростом заблаговременности. Рассмотрим маски в ансамблях наукастов. В табл. 10 показаны сопоставленные ("спаренные") в прогнозе на 60 мин объединенные и нумерованные (от 1 до 21995) пары *полей наблюдений* (префиксы nc-файлов – "PRCP-ETR") и *прогностических ансамблей* (префиксы tiff-файлов – "steps_mvp")

с указанием количества пропусков (первое значение в строке с номером и вторая строка ниже) и количества числовых значений (второе значение в нумерованной строке и третья строка ниже).

Таблица 10. Количество пропусков и числовых значений в сопоставленных в прогнозе на 60 мин парах полей наблюдения (префиксы nc-файлов – PRCP-ETR) и прогностических ансамблей (префиксы tiff-файлов – steps_mvp)
Table 10. Number of missing data and numerical values in the observation fields (prefix PRCP_ETR) and forecast ensembles (prefixes of tiff-files step_mvp) pairs for the lead time of 60 min

```
   1: PRCP-ETR_20200501_0100.nc <== steps_mvp_202005010000_060.tif  1005711   3190890
 1018623 1026828 1024980 1028748 1020824 1019132 1017239 1022161 1027674 1031277  1023748.6   18037.6
 3177978 3169773 3171621 3167853 3175777 3177469 3179362 3174440 3168927 3165324  3172852.4  -18037.6

   2: PRCP-ETR_20200501_0110.nc <== steps_mvp_202005010010_060.tif  1005664   3190937
 1020516 1031215 1027429 1033035 1022993 1021168 1018878 1025485 1029435 1036083  1026623.7   20959.7
 3176085 3165386 3169172 3163566 3173608 3175433 3177723 3171116 3167166 3160518  3169977.3  -20959.7
.....
1086: PRCP-ETR_20200508_1350.nc <== steps_mvp_202005081250_060.tif  1005710   3190891
 1116686 1119302 1128194 1125776 1112011 1113393 1111663 1116089 1136092 1121334  1120054.0  114344.0
 3079915 3077299 3068407 3070825 3084590 3083208 3084938 3080512 3060509 3075267  3076547.0 -114344.0

1087: PRCP-ETR_20200508_1400.nc <== steps_mvp_202005081300_060.tif  1005665   3190936
 1117280 1120215 1129566 1127492 1112724 1113683 1112304 1116829 1137166 1122168  1120942.7  115277.7
 3079321 3076386 3067035 3069109 3083877 3082918 3084297 3079772 3059435 3074433  3076658.3 -115277.7
......
1125: PRCP-ETR_20200508_2020.nc <== steps_mvp_202005081920_060.tif  1036134   3160467
 1034674 1036358 1043463 1044907 1030791 1030797 1029853 1032311 1045163 1037350  1036566.7    432.7
 3161927 3160243 3153138 3151694 3165810 3165804 3166748 3164290 3151438 3159251  3160034.3   -432.7
.....
5384: PRCP-ETR_20200607_1040.nc <== steps_mvp_202006070940_060.tif  1005574   3191027
 1285115 1284070 1290425 1284711 1283689 1283481 1283730 1283807 1299233 1284227  1286248.8  280674.8
 2911486 2912531 2906176 2911890 2912912 2913120 2912871 2912794 2897368 2912374  2910352.2 -280674.8

5385: PRCP-ETR_20200607_1050.nc <== steps_mvp_202006070950_060.tif  1005571   3191030
 1285326 1284066 1290495 1284665 1284220 1283421 1283650 1284193 1299563 1284392  1286399.1  280828.1
 2911275 2912535 2906106 2911936 2912381 2913180 2912951 2912408 2897038 2912209  2910201.9 -280828.1

5386: PRCP-ETR_20200607_1100.nc <== steps_mvp_202006071000_060.tif  1005571   3191030
 1285551 1283838 1291662 1285017 1284242 1283355 1283546 1283892 1300396 1284213  1286571.2  281000.2
 2911050 2912763 2904939 2911584 2912359 2913246 2913055 2912709 2896205 2912388  2910029.8 -281000.2
.....
```

Примечание. Количество пропусков – первое значение в строке с номером (по первой паре: 1005711) и вторая строка ниже (десять значений от 1018623 до 1031277 и среднее по ансамблю – 1023748.6). Количество числовых значений – второе значение в нумерованной строке (3190890) и третья строка ниже (от 3177978 до 3165324 и среднее по ансамблю – 3172852.4). Последний столбец – разности соответствующих значений количества пропусков в прогнозе и в наблюдении: 18037.6 = 1023748.6 – 1005711. Для контроля приводится аналогичная разность для количества числовых значений, которая в сумме с предыдущей разностью ожидаемо равна нулю.

Отметим самые общие особенности: 1) наблюдается большое разнообразие в количестве пропусков как в полях наблюдений, так и в полях ансамблей, включая поля внутри одного ансамбля, 2) как правило, количество пропусков в ансамблях превышает, иногда существенно, количество пропусков в соответственном поле наблюдения. Первая особенность полностью зависит от еще не проясненных условий формирования объединенных полей на основе полей отдельных локаторов. Вторая

особенность представляется еще более интересной из-за значительного разброса разностей от нескольких сотен (например, 432 в табл. 3) до нескольких сотен тысяч (например, 281000 в той же таблице). Имеются случаи, когда количество пропусков в наблюдениях превышает их среднее или даже максимальное по ансамблю количество пропусков.

Так как при расчете показателей качества *пустая* точка любого из 11 полей (наблюдения и десяти полей ансамбля) исключается из результирующего поля показателя, то более содержательной оценкой различия следует считать разность между максимальным (а не средним) количеством пропусков в ансамбле и количеством пропусков в поле наблюдений. При этом, например, по первой паре вместо 18037 получим 1031277 – 1005711 = 25566.

Суммарная характеристика табл. 10 отражена в квартильных оценках в табл. 11. Максимальное количество пропусков в полях наблюдений (2098901) почти совпадает с минимальным количеством числовых значений (2097700), однако в среднем (по mean и median) количество пропусков занимает около четверти, а количество числовых значений – около трех четвертей объединенного поля (4196601). Максимальное количество пропусков в прогностических ансамблях изменяется от 144592, т. е. намного меньше минимального количества пропусков в соответственных полях наблюдений (1005542), до 2120232, т. е. больше максимального количества пропусков в полях наблюдений (209890). В более важных для расчета показателей согласованных разностей (строка mxnas-onas) размах оказывается существенно большим: от -1066062 до +1114475.

Таблица 11. Квартильные характеристики и среднее значение (mean) количества пропусков (nas), числовых значений (vld) в полях наблюдений (obs) и прогнозов на 60 мин (frc), максимальное значение в ансамблях (mx), а также разность между максимальным количеством пропусков в ансамбле и количество пропусков в "спаренном" поле наблюдений (mxnas-onas)
Table 11. Quartile characteristics and the mean of the missing data number (nas), numerical values (vld) in observation fields (obs) and 60 min lead time forecasts (frc), the maximal value in the ensembles (mx), and the difference between the maximum number of missing data in the ensemble and in the merged observation field (mxnas-onas)

	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
obs_nas	1005542	1005783	1053784	1067155	1106053	2098901
obs_vld	2097700	3090548	3142817	3129446	3190818	3191059
mx_frc_nas	144592	1055335	1089212	1100554	1139304	2120232
mxnas-onas	-1066062	22095	32654	33399	45431	1114475

Как говорилось выше, анализ пропусков в согласованных полях прогнозов и наблюдений важен для оценки потерь значимых точек в результирующем поле показателя качества. Не менее интересен вопрос

о "путешествии" в прогнозах тех пустых точек начальных полей, которые сохранились в модели STEPS после двумерной Фурье-фильтрации перед входом в прогностический блок. Для этого потребуется сравнивать количество пропусков в серии прогностических полей одной заблаговременности (например, 1 час) и количество пропусков в паре соответствующих начальных полей модели STEPS. Так как архив прогнозов по срокам не имеет разрывов во времени, то можно воспользоваться табл. 9 и сравнить прогностические поля с отстоящими на час раньше полями наблюдений. Статистика разностей между максимальным количеством пропусков в ансамблях и количеством пропусков в двух соответствующих начальных полях (a1, a2) собрана в табл. 12.

Таблица 12. Разности между максимальным количеством пропусков в ансамбле прогнозов на 60 мин (mxnas) и количеством пропусков в соответствующих начальных полях (a1 и a2)
Table 12. Differences between the maximal number of missing data in the 60 min forecast ensemble (mxnas) and in the corresponding initial fields (a1 and a2)

	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
mxnas-a1nas	-1051771	23611	32508	33414	43320	1114585
mxnas-a2nas	-1051936	24036	32437	33410	42695	1074679

Данные табл.12 подобны данным последней строки табл.11. Отметим редкое исключение: количество *одновременных* отрицательных значений относительно первого и второго поля оказывается равным 103 – только в этих случаях (из порядка 20 тысяч прогнозов) максимальное количество пропусков в прогностических ансамблях оказалось *меньше* пропусков в обоих начальных полях.

5.2. Формирование выборок для верификации и подсчет количества допусков

Так как сведения о количестве числовых значений (*допусков*) важны для оценок статистической значимости рассчитываемых показателей, то необходимо учитывать не только и не столько "естественные" потери из-за особенностей наблюдательных систем и прогностической модели, но и изменение количества "допущенных" значений в зависимости от способов формирования этих выборок. Будем обозначать допуски через vld (valid); использованное в верификации среднее по ансамблю прогностическое поле будем обозначать через AVR; как правило, типы выборок будут помечаться прописными буквами в тексте (E, ET и т. д) и строчными в таблицах и рисунках (e, et и т. д).

Опишем способы формирования выборок для верификации, напомнив, что в предыдущих испытаниях системы наукастинга осадков отбирались только те пары значений, которые удовлетворяли условию нестрогого превышения порога 0.05 мм/ч хотя бы одного из значений интенсивности в согласованной паре прогноз-наблюдение, что эквивалентно, по логическому правилу де Моргана, отбраковке пар с одновременным условием строгого непревышения этого порога.

Верификация прогнозов проводилась на парах чисел прогноз-наблюдение (frc, obs), удовлетворявших условиям отбора допусков при предварительном замещении константы отсутствия NA отрицательным числом -999. Допустимость определяется на конъюнкциях (&) и дизъюнкциях (|) неравенств следующим образом:

1. (frc ≥ 0) & (obs ≥ 0) – тип "E";

2. (frc > 0 & obs ≥ 0) | (frc ≥ 0 & obs > 0) – тип "ET";

3. (frc > 0.05 & obs ≥ 0) | (frc ≥ 0 & obs > 0.05) – тип "TT";

4. (frc > 0) & (obs > 0) – тип "T".

Условие (1) отбирает все числовые пары значений, включая нулевые ("без осадков"); при условии (2) хотя бы одно из чисел должно быть положительно ("осадки или в прогнозах, или в наблюдениях", "или" – не исключительное, т. е. "осадки и там, и там" входит в список "допустимой пары"); при условии (3) отбираются значения, не меньшие порога 0.05 мм/ч; условие (4) требует ненулевые значения в обоих числах ("осадки одновременно в прогнозах и в наблюдениях").

Во всех четырех случаях пропуски исключаются автоматически благодаря замещению числом -999. Количество допустимых пар подсчитывается на каждом шаге цикла и в конце цикла используется в операциях осреднения при расчетах средних оценок качества, а соответствующая матрица сумм сохраняется в виде поля исходного размера (nx, ny), nx×ny=4196601.

Рассмотрим матрицы сумм числовых значений с этими четырьмя условиями в квартильном представлении, включая оценку среднего количества (mean) (табл. 13). Прокомментируем данную таблицу. Во-первых, видно, что среднее количество пропусков равно ~1 млн точек, количество числовых значений ~3 200 000 точек, и эти значения мало зависят от типов отбора. Во-вторых, изменение квартилей и средней в зависимости от заблаговременности можно считать незначительным, но заметно изменение квартилей при смене типов отбора допусков: например, для прогноза на 60 мин 75%-й квартиль меняется последовательно 21992 ("e"), 3943 ("et"), 3014 ("tt") и 1942 ("t").

Таблица 13. Распределение в квартилях числовых значений по количеству "допустимых" точек поля с указанием количества пропусков (NAs) и числовых значений (vld) для различных заблаговременностей (lead в мин). Прогноз по среднему полю ансамбля (AVR)
Table 13. Quartile distribution of numerical values of valid points with the numbers of missing data (NAs) and valid numerical data (vld) for different lead times (lead in min). Ensemble average nowcast (AVR)

	Квартили количества числовых значений в точке поля						Пропуски	Допуски
lead	min	q25	med	mean	q75	max	NAs	vld
тип отбора пар числовых значений "e"								
030	1	21766	21942	21412	21998	22000	1004617	3191984
060	1	21733	21930	21188	21992	21995	1004764	3191837
090	1	21556	21920	20893	21984	21990	1004919	3191682
120	1	21288	21860	20529	21981	21987	1005011	3191590
150	1	20848	21818	20095	21976	21984	1005096	3191505
тип отбора пар числовых значений "et"								
030	1	1897	2631	2605	3226	5016	1004696	3191905
060	1	2362	3275	3200	3943	5944	1004832	3191769
090	1	2722	3760	3655	4504	6608	1004965	3191636
120	1	3025	4155	4031	5022	7353	1005075	3191526
150	1	3290	4500	4355	5534	8043	1005133	3191468
тип отбора пар числовых значений "tt"								
030	1	1510	2115	2082	2589	4065	1004748	3191853
060	1	1749	2475	2414	3014	4574	1004939	3191662
090	1	1940	2760	2680	3346	5008	1005064	3191537
120	1	2108	3008	2910	3663	5597	1005140	3191461
150	1	2255	3210	3116	3990	6078	1005162	3191439
тип отбора пар числовых значений "t"								
030	1	1077	1573	1553	1975	3253	1005864	3190737
060	1	1023	1530	1501	1942	3107	1006492	3190109
090	1	972	1483	1449	1906	3109	1006917	3189684
120	1	921	1436	1399	1870	3134	1008019	3188582
150	1	867	1392	1350	1830	3069	1009905	3186696

Столь сильная изменчивость пространственных квартилей объемов выборок является следствием статистического распределения интенсивности осадков; напомним, на предыдущих испытаниях исключение пар значений осадков, не превышающих порог 0.05 мм, оставляло для оценок качества в теплый период не более 10–15 % от полного временного ряда. Наконец, имеется на первый взгляд странная особенность (выделенная красным цветом) – рост значений квантилей с увеличением заблаговременности в случае ET и TT, хотя пропуски и допуски ведут себя сходно с остальными случаями. Возможно, это происходит из-за регрессионного типа модели, при котором с ростом заблаговременности растет количество нулевых и около-нулевых значений. Кстати говоря, растущее количество около-нулевых значений используется в циклическом суммировании оценок средних ошибок, а значит, счетчик увеличивается (а не

уменьшается, как в остальных случаях), вследствие чего показатели демонстрируют *мнимый* рост качества с ростом заблаговременности. Эффект здесь аналогичен росту оценки дисперсии подвыборки при удалении из выборки нулевых или около нулевых величин: в формуле расчета числитель почти не меняется, а знаменатель уменьшается.

5.3. Количество допусков для верификации в таблицах и графиках

Рассмотрим объемы выборок для верификации прогнозов по (AVR) на сроки 30, 60, 90, 120 и 150 мин. Предварительно для всех отобранных пар наблюдение-прогноз строится поле маски с нулями в тех точках, в которых для каждой пары значений прогноз-наблюдение хотя бы одно значение является константой отсутствия или не удовлетворяется условие формирования выборки, а с единицами в тех точках, в которых условие формирования выборки удовлетворяется. Константы отсутствия в среднем по ансамблю поля устанавливаются в тех точках, в которых хотя бы одно значение из десяти оказывается нечисловым. Таким образом формируются архивы для всех четырех типов выборок для верификации.

В табл. 14 содержатся значения объемов поточечных выборок, расположенные по квантилям пространственного распределения в долях от количества числовых значений в объединенном поле и в зависимости от заблаговременности прогнозов. Фактически это квантильные функции на распределениях пространственных данных.

Были проанализированы разнообразные особенности таблиц и выявлены детали, которые могут оказаться полезными при интерпретации результатов верификации, но здесь мы ограничимся теми характеристиками данных, которые можно представить в графическом виде и которые нетрудно проверить по конкретным табличным значениям.

Для наглядного представления поведения объемов выборок построим графики (рис. 9) этих объемов в относительных величинах с нормировкой на какое-либо максимальное значение, например, соответствующее q100 и заблаговременности 30 мин. Это значит, что на квантиле 100% красная кривая (прогноз на 30 мин) будет всегда оканчиваться на единице. Для удобства будем начинать графики с нулевой координаты и фокусировать внимание на значениях выше пространственного квантиля 10% (q10).

Рассмотрим четыре панели графика на рис. 9, соответствующие табл. 14. Если объемы выборок падают с ростом заблаговременности, то кривая меньшей заблаговременности лежит не ниже кривой большей заблаговременности (например, на графиках E и T, рис. 9). При этом все кривые графика укладываются в координатный прямоугольник. Если же объемы выборок с ростом заблаговременности растут, то порядок противоположный и кривые могут выходить за пределы координатного прямоугольника.

Таблица 14. Пространственные квантили объемов поточечных выборок для верификации в зависимости от типа формирования выборок и от заблаговременности прогноза
Table 14. Spatial quantiles of grid point samples for verification depending on the type of sample formation and on the forecast lead time

E

qnt\frc	030	060	090	120	150
0	1	1	1	1	1
10	20351	20291	18017	17602	14767
20	21694	*21336*	21276	20847	20167
30	21811	21791	21729	21647	21267
40	21865	21847	21829	21766	21722
50	21942	21930	21920	21860	21818
60	21979	21969	21952	21934	21922
70	21994	21989	21983	21977	21967
80	21999	21994	21987	21984	21980
90	22000	21995	21990	21987	21984
100	22000	21995	21990	21987	21984
Nas	1004617	1004764	1004919	1005011	1005096
vld	3191984	3191837	3191682	3191590	3191505

ET

qnt/frc	030	060	090	120	150
0	1	1	1	1	1
10	1533	1899	2148	2208	2143
20	1773	2188	2520	2798	2984
30	2050	2549	2925	3248	3541
40	2371	2945	3369	3697	4003
50	2631	3275	3760	4155	4500
60	2861	3531	4065	4528	4935
70	3092	3788	4341	4865	5346
80	3384	4158	4767	5269	5762
90	3770	4616	5326	5967	6527
100	5016	5944	6608	7353	8043
NAs	1004696	1004832	1004965	1005075	1005133
vld	3191905	3191769	3191636	3191526	3191468

TT

qnt/frc	030	060	090	120	150
0	1	1	1	1	1
10	1183	1358	1499	1525	1463
20	1406	1621	1789	1935	2047
30	1632	1899	2103	2280	2448
40	1897	2216	2460	2650	2829
50	2115	2475	2760	3008	3210
60	2287	2657	2973	3276	3556
70	2475	2879	3205	3520	3838
80	2716	3164	3538	3866	4195
90	3023	3539	3976	4373	4744
100	4065	4574	5008	5597	6078
NAs	1004748	1004939	1005064	1005140	1005162
vld	3191853	3191662	3191537	3191461	3191439

T					
qnt/frc	**030**	**060**	**090**	**120**	**150**
0	1	1	1	1	1
10	823	744	645	536	446
20	995	940	889	831	761
30	1173	1120	1062	1003	951
40	1383	1333	1281	1226	1169
50	1573	1530	1483	1436	1392
60	1729	1685	1643	1607	1569
70	1888	1851	1809	1770	1731
80	2076	2043	2012	1981	1946
90	2346	2313	2280	2246	2211
100	3253	3107	3109	3134	3069
NAs	1005864	1006492	1006917	1008019	1009905
vld	3190737	3190109	3189684	3188582	3186696

Примечания. vld – количество числовых значений в объединенном поле; qnt – префикс квантиля в процентах от vld; NAs – количество пропусков в поле: NAs+vld=4196601=2151×1951. Типы выборок: E – любые значения осадков; ET – хотя бы одно значение ненулевое; TT – хотя бы одно значение не менее 0.05 мм/ч; T – оба значения ненулевые.

Выделим некоторые заметные свойства построенных кривых. Видно сходство графиков для типов ET (хотя бы одно значение ненулевое) и TT (хотя бы одно значение не меньше 0.05) и их отличие от графика для E (все числовые значения, включая нули) и от графика для T (оба значения положительны). Наибольшая обеспеченность данными (до максимума в ~22000 наблюдений в точке поля) заметно выделяет кривые графика для выборок типа E: быстрый рост до q30 и далее значения объемов визуально практически неотличимые. Идеальным графиком является, очевидно, функция скачка, равная единице на всем интервале между q0 и q100. График E нельзя считать "идеальным", хотя он наилучший в том смысле, что количество точек поля, в которых объемы выборок для верификации прогнозов всех сроков не максимально возможны, не превышает площади порядка 30 %.

Так как графики, отличные от "идеального", содержат кривые разных форм, включая прямолинейные интервалы, то правомерно поставить вопрос о роли угла наклона таких интервалов. Очевидно, неидеальным является горизонтальный вид кривой графика, если его значение по вертикали не равно единице: неизменность какого-либо уровня, не равного единице, означает отсутствие пополнения поля точками доступа с увеличением пространственной области.

Попробуем понять, что означает угол наклона. Ясно, что из-за накопления точек доступа с ростом площади угол наклона всегда неотрицательный. Чем больше угол наклона, тем быстрее происходит наполнение точек поля допусками в этом диапазоне площадей, и чем на меньших

квантилях это происходит, тем лучше. Возможная причина обсуждалась выше: наличие диссипирующего эффекта (*размазывания*) в схемах моделей STEPS и pySTEPS по отношению к областям с заметными осадками.

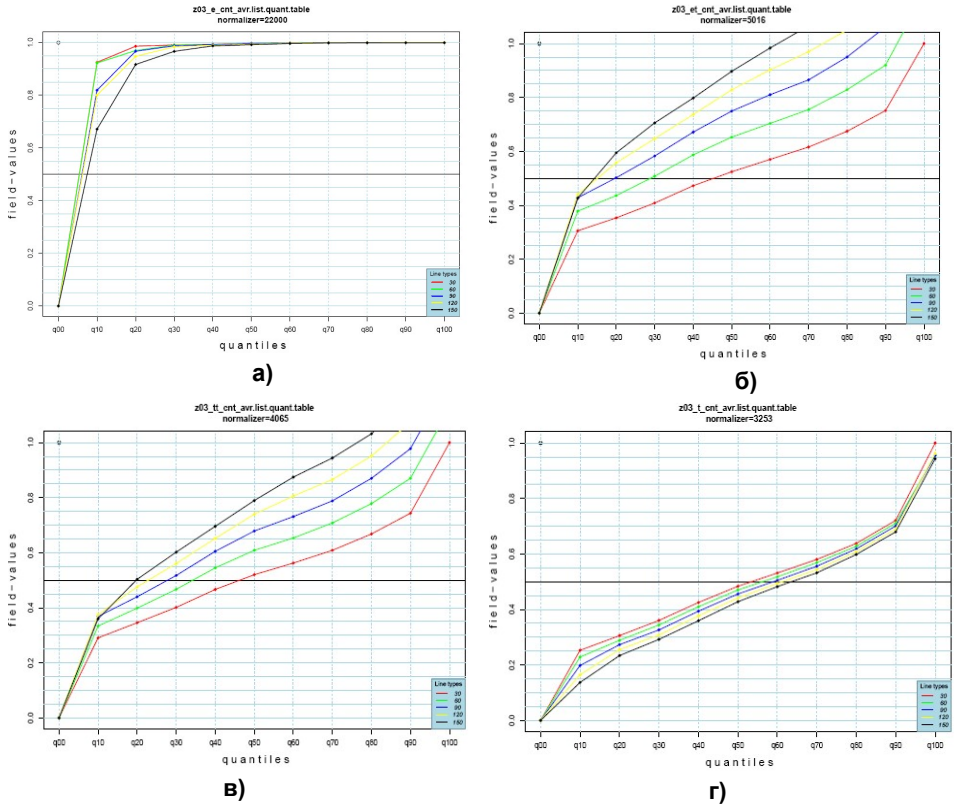


Рис. 9. Графики квантильных функций *относительных объемов выборок* для верификации прогнозов (нормировка на объем в ячейке frc=30, qnt=100, табл. 14) в зависимости от типа формирования выборок и от заблаговременности прогноза. Расположение типов выборок аналогично табл. 14: тип E (все значения) (а); тип ET (пары значений с хотя бы одной ненулевой интенсивностью) (б); тип TT (хотя бы одно значение не менее 0.05 мм/ч) (в); тип T (оба значения ненулевые) (г). Цветами выделены сроки: 30 мин – красный, 60 мин – зеленый, 90 мин – синий, 120 мин – желтый, 150 мин – черный.

Fig. 9. Plots of quantile functions of relative sample volumes for forecast verification (normalized to the grid cell volume frc=30, qnt=100, table 14) depending in the type of sample formation and on the forecast lead time. Sample types are the same as in table 14: E stands for all precipitation values; ET, at least one value is not zero; TT at least one value is not less than 0.05 mm/h; and T, both values are not zero. The colors indicate the times: red for 30 min, green for 60 min, blue for 90 min, yellow for 120 min, and black for 150 min.

Графики для выборок типа ET и TT похожи между собой и расположением цветов и углами наклона. Для разных заблаговременностей углы наклона немного отличаются друг от друга, угол выше – для большей заблаговременности (ср., например, кривые красного и черного цвета). Объяснить более высокое положение кривой для отдаленной заблаговременности можно тем же расширением области доступных данных с ростом прогностического срока: при увеличении пространственного масштаба в масках наличия допусков прежние нулевые значения сменяются единичными значениями, и кривая относительных объемов для отдаленной заблаговременности оказывается выше кривой более ранней заблаговременности. Небольшое отличие в углах наклона кривых разных цветов свидетельствует о более быстром "подселении" допусков с увеличением срока прогноза.

5.4. Количество допусков для верификации в условной географии

Рассмотрим карты исходных объединенных полей в условной географии, содержащие данные об объемах выборок четырех типов. Для удобства графического представления абсолютные объемы для карт переводятся, как и раньше, в относительные объемы делением всех значений на максимальные величины в соответствии с данными табл. 14. Будем сопоставлять карты на 30 и 150 мин, чтобы наиболее отчетливо представить основные географические свойства в зависимости от типов формирования выборок и от сроков прогнозов в предположении, что в промежуточные сроки выделяемые особенности и тенденции в целом сохраняются.

На рис. 10 отчетливо видны различия между картами типов E и картами остальных типов, а также сходство карт трех последних типов между собой на начальных сроках прогноза и заметное отличие на последних сроках только для типов ET и TT. На картах подтверждаются и пространственно уточняются данные таблиц и особенности графиков: 1) изменение объемов видно по изменению цвета в сторону верхней или нижней цветовой палитры; в частности, рост происходит в основном в областях пересечений кругов обзора (ЦФО), что отражает важную роль перекрывающихся зон; 2) все изменения объемов не выходят за зоны обзора р/л.

Тенденции роста или падения объемов выборок проявляются на картах следующим образом. *Рост объема выборок* с прогностическим сроком означает появление *новых* точек с доступными значениями интенсивности (включая нулевую интенсивность). Эти точки расположены *внутри* зон обзора локаторов – области вне этих зон остаются пустыми (белые области между кругами на всех картах рисунка остаются не заполненными). *Падение объема выборок* с ростом заблаговременности для типов E и T – это утрата значащих пар прогноз-наблюдение.

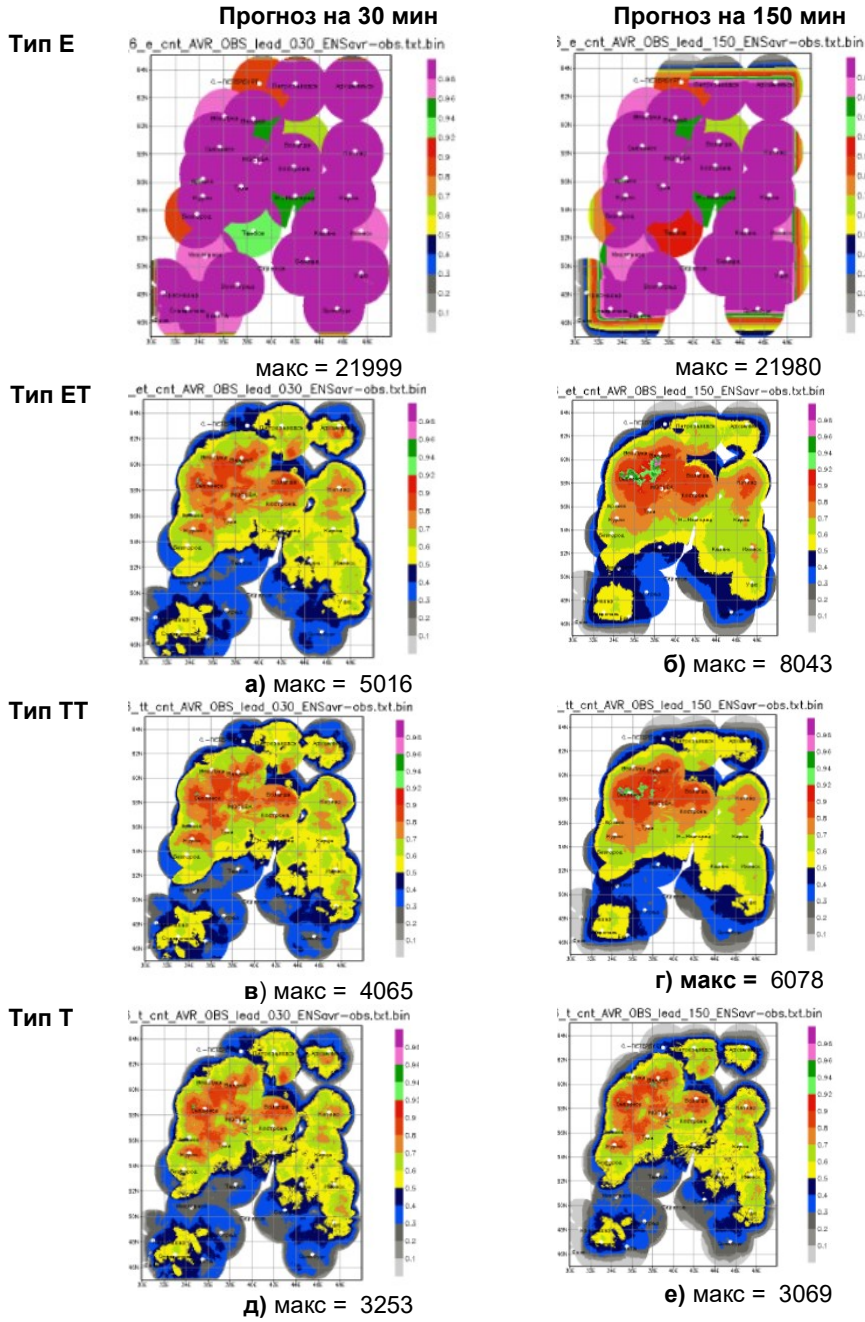


Рис. 10. Карты объемов выборок в долях от максимального объема (табл.16: столбец frc=30, строка qnt=100) для согласованных пар при прогнозах на 30 и 150 мин.

Fig. 10. Maps of sample volumes as fractions of the maximal volume (table 16: column frc=30, row qnt=100) for pairs for 30 and 150 min forecasts.

Для типа E это равносильно отсутствию наблюдений или прогнозов в определенный срок из-за самых разнообразных обстоятельств, таких как аварии на локаторах, сбои в информационном потоке, нарушение работы расчетного сервера. Как правило, при отсутствии данных какого-либо локатора только его круг обзора заполняется константами отсутствия, узлы объединенного поля в остальных зонах обзора продолжают использоваться в прогнозе. Для типа T к вышеперечисленным причинам добавляется потеря пары из-за нарушения условия отбора данных ("оба значения ненулевые"), когда одно из ненулевых значений обнуляется в ходе расчета следующего шага прогноза. В данной статье такое явление уже объяснялось систематическим "размазыванием" очагов осадков в процессе статистического прогнозирования.

При визуальном анализе можно увидеть наиболее странную особенность прогностической системы, не учитываемую таблицами и графиками – наличие выраженного краевого эффекта, заключающегося в появлении и увеличении с заблаговременностью чередующихся полос на картах типа E, напоминающих угловую часть разноцветной рамки. На картах других типов заметный "уголок" серого цвета (когда объемы выборок минимальные) заполняет краевую область обзора Краснодарского локатора в нижнем левом углу условной карты. Возможно, указанные явления вызваны процедурой заполнения константами отсутствия краевых точек поля, оказывающихся в тыловой части адвективного потока, генерируемого моделью STEPS.

Рассмотрим более детально зависимость относительных объемов выборок от заблаговременности. Кривые нормированных квантилей для срока прогноза 30 мин (рис. 9, красные линии) очень похожи на панелях типов ET и TT – они сильно расходятся и растут с ростом заблаговременности, в отличие от аналогичных кривых для типа T, которые ввиду этого выходят за пределы единичной абсциссы на рис. 9. Дадим интерпретацию данному обстоятельству по картам рис. 10. Видно, что на сроке прогноза 30 мин карты трех типов выборок (ET, TT и T) довольно сходны между собой (рис. 10б, в, г), в то же время к концу прогностического срока сходство теряется в картах типов TT и T. Хорошо видно, что заметное географическое сходство в панелях прогноза на 30 мин теряется к прогностическому сроку 150 мин в типах выборок ET и TT в областях обзора практически всех локаторов.

Наибольшие исходные объемы наблюдаются на территории ЦФО, в регионе с наиболее плотным расположением около десятка локаторов, обеспечивающих и наибольшие пересечения зон обзоров. В этом же регионе происходит и наибольший рост объемов с ростом заблаговременности для выборок типа ET и TT.

Очевидно, что увеличение объемов выборок благоприятно для увеличения статистической значимости оценок качества, однако этот рост вызван, как указывалось неоднократно раньше, генерированием малых

чисел в ходе статистического экстраполирования полей осадков. Возникает вопрос о предпочтениях: будет ли оценка качества более надежной, если воспользоваться только типом выборки Т даже при учете того, что в последнем случае объемы выборок намного меньше объемов выборок типов ЕТ и ТТ? Ситуация требует компромиссного выбора между снижением дисперсии и несмещенностью оценки качества; именно поэтому для более полного отражения имеющейся неопределенности рекомендуется проводить расчеты на выборках, сформированных несколькими способами.

Выводы

Сформулируем вначале общие выводы. Процедура оценивания прогнозов предваряется подготовкой таких выборок (назовем их "корректными выборками"), которые соответствуют двум взаимосвязанным целям планируемого испытания: оценить ошибки прогностической системы и указать на причины этих ошибок для усовершенствования эксплуатируемой системы. Суммарная ошибка прогноза может быть разложена по меньшей мере на три компонента – модельный, инструментальный и выборочный, и определение долей этих компонентов представляет собой содержательную задачу верификации в целом. В этом смысле выборка может считаться корректной, если она 1) статистически репрезентативна для оценивания качества прогнозов и 2) отражает существенные особенности прогностической модели и наблюдательного инструмента.

Задача формирования корректной выборки для верификации многократно усложняется при работе с данными большого объема и сложной структуры, которые могут оказаться одновременно неполными, содержащими пропуски, а также обладающими пространственно-временным распределением, далеким от нормального. Большие объемы поставляются современными системами наукастинга, в том числе статистическими моделями радиолокационного прогноза полей осадков. Структурную сложность существенно увеличивают методы и приемы пространственной верификации, в которой используются и точки, и пространственные объекты, отбираемые как для стандартного анализа, так и для приложения теорий со специфическими требованиями к исходным выборкам.

Представленные в данной статье результаты демонстрируют разнообразие формируемых выборок для верификации прогнозов в рамках плановых испытаний системы наукастинга полей осадков в указанные периоды года. Рассчитаны и обсуждены характеристики объектов и ситуаций, выделяемых для пространственно-ориентированной верификации с приложением теории экстремальных величин. Показано, насколько наличие пропусков в точках полей и разные способы формирования пар прогноз-наблюдение влияют на объемы и на статистические свойства выборок для верификации.

Специфицируем конкретные выводы в соответствии с общей схемой выделения основных источников ошибок при пространственной верификации. Во-первых, к ошибкам модели следует отнести трудно устранимую систематическую особенность регрессионной системы прогноза "размазывать" области существенных осадков и одновременно "тормозить" их динамику в пространстве. Это приводит и к утрате реальных и к порождению ложных *объектов* для верификации. Во-вторых, следует особенное внимание обратить на автоматизированные методики определения, выделения и прослеживания объектов в ходе прогноза. В частности, вполне возможно, что потери с ростом заблаговременности *объектов*, идентифицированных нами с помощью пакета SpatialVx, удастся скомпенсировать построением *сопряженных областей*, как это делается в пакете CRA, или переходом к *выпуклым объектам* (методом "обвертывающей резинки") по методу, реализованному в пакете MET-MODE. Наконец, наличие пропусков в исходных полях и их влияние на качество прогностической продукции объясняются техническими особенностями радиолокационной сети, а также системами построения и первичного контроля полей отражаемости. И техническое состояние сети, и первичный контроль радиолокационной продукции обеспечиваются вне структуры Гидрометцентра России.

В следующих статьях предполагаемой серии планируется учесть влияние указанных особенностей выборок на пространственные оценки качества радиолокационного наукастинга осадков.

Авторы благодарят Антониду Александровну Алексееву за полезные советы, улучшившие содержание и стиль статьи.

Представленные работы выполнены в рамках темы НИР Росгидромета 1.1.5, рассчитанной на период 2020–2024 гг.

Список литературы

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: Дис. … докт. геогр. наук. М, 2010. 408 с.

2. *Алибегова Ж.Д.* Пространственно-временная структура полей жидких осадков Л.: Гидрометиздат, 1985. 224 с.

3. *Бундель А.Ю, Муравьев А.В, Ольховая Е.Д.* Обзор методов пространственной вериикации и их применение для ансаблевых прогнозов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 30-49.

4. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 100 с.

5. *ВМО-168.* Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. Изд. 6, 2012 (2009). Глава 5. Анализ экстремальных значений. II-5.1 – II-5.58.

6. *Галамбош Я.* Асимптотическая теория экстремальных порядковых статистик. М.: Наука, 1984. 305 с.

7. *Галамбош Я.* О развитии математической теории экстремумов за последние полвека // Теория вероятностей и ее применения. 1994. Т. 39, № 2. С. 272-293.

8. *Горшенин А.К., Королев В.Ю.* Определение экстремальности объемов осадков на основе модифицированного метода превышения порогового значения // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12, вып. 4. С. 16-24.

9. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.

10. *Гумбель Э.* Статистическая теория экстремальных значений (основные результаты) / Введение в теорию порядковых статистик. М.: Фазис, 1970. С. 61-93.

11. *Исаев А.А*. Атмосферные осадки. Часть 1. Изменчивость характеристик осадков на территории России и сопредельных стран. М: Издательство МГУ, 2002. 192 с.

12. *Исаев А.А*. Атмосферные осадки. Часть II. Мезоструктура полей жидких осадков. М.: Географический факультет МГУ, 2001. 100 с.

13. *Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В.* Прогнозирование осадков с помощью модели мультипликативного каскада: опыт радарного наукастинга // Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова, Москва, 16-18 мая 2018». Тезисы докладов. 2018. С. 27.

14. *Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В.* Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 151-160.

15. *Крамер Г., Лидбеттер М*. Стационарные случайные процессы. Свойства выборочных функций и их приложения. М.: Мир, 1969. 400 с.

16. *Лагутин М.Б*. Наглядная математическая статистика. М.: Бином, 2009. 470 с.

17. *Лебедев А.В*. Основы стохастической теории экстремумов. М.: ЛЕНАНД, 2018. 104 с.

18. *Лидбеттер М., Ротсен Х., Линдгрен Г.* Экстремумы случайных последовательностей и процессов. М.: Мир, 1989. 392 с.

19. *Литтл Р.Д.А., Рубин Д.Б*. Статистический анализ данных с пропусками. М.: Финансы и статистика, 1991. 169 с.

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

21. *Муравьев А.В., Киктёв Д.Б., Смирнов А.В., Зайченко М.Ю*. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радиолокационных данных и сравнительные результаты точечной верификации для теплого и холодного периодов года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 12-40.

22. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В*. Усовершенствованная технология радиолокационного наукастинга осадков и результаты верификации в теплый период года (май - сентябрь 2020 г.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021. Информационный сборник № 48. С. 13-41.

23. *Муравьев А.В., Киктёв Д.Б., Смирнов А.В*. Сравнительная верификация усовершенствованной системы радиолокационного наукастинга осадков с учетом пропусков и при различных методах формирования выборок (по результатам испытаний в теплый период года май-сентябрь 2017 и 2020 гг.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2022. Информационный сборник № 49. С. 3-56.

24. *Родионов И.В*. О параметрическом оценивании хвоста распределения // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488, № 4. С. 356-359.

25. *Родионов И.В.* Вероятностный и статистический анализ экстремумов дискретных стохастических систем: Дис. … докт. физ.-мат. наук. М, 2021. 259 с.

26. *Тихонов В.И*. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. 392 с.

27. *Тутубалин В.Н.* Теория вероятностей. М.: Академия, 2008. 368 с.

28. *Beirlant J., Goegebeur, Y., Segers, J., Teugels, J., Waal, D. D., Ferro, C*. Statistics of Extremes: Theory and Applications. New York: Wiley, 2004. 512 p.

29. *Bowler N., Pierce C., Seed A.* STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2006. Vol. 132. P. 2127-2155.

30. *Cunnane C.* A note on the Poisson assumption in partial duration series models // Water Resour. Res. 1979. Vol. 15, no. 2. P. 489-494.

31. *Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G.* Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas // Mon. Wea. Rev. 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.

32. *Davis C.A., Brown B. G. , Bullock R. G.* Object-based verification of precipitation forecasts, Part II: Application to convective rain systems // Mon. Wea. Rev. 2006. 134. P. 1785–1795.

33. *De Haan L., Ferreira A.* Extreme value theory. An introduction. Springer, 2006. 420 p.

34. *Dorninger M., Mittermaier M. P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J.* MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain // NCAR/TN-505. 2013. 23 p.

35. *Ebert E., McBride J.* Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors // J. Hydrol. 2000. Vol. 239. P. 179-202.

36. *Forecast Verification*. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science // I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.

37. *Gilleland E*. 2020. https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/SpatialVx.pdf

38. *Gilleland E., Ahijevych D., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E.* Intercomparison of spatial forecast verification methods // Wea. Forecast. 2009. Vol. 24. P. 1416-1430.

39. *Gilleland E., Skok G., Brown B., Casati B., Dorninger M., Mittermaier M.P., Roberts N., Wilson L.J.* A Novel Set of Geometric Verification Test Fields with Application to Distance Measures // Mon. Wea. Rev. 2020. Vol. 148. P. 1653-1673.

40. *Gilleland E., Katz R.W.* extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R // Journal of Statistical Software. 2016. Vol. 72, no. 8. P. 1-39.

41. *Hsing T., Hüsler J., Leadbetter M.R.* On the exceedance point process for a stationary sequence // Probab. Theory and Related Fields. 1988. No. 78. P. 97-112.

42. *Houze R.A.Jr.* 100 years of research on mesoscale convective systems // A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial, Meteor. Monogr. 2019. No. 59. https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1

43. *Hyndman R.J., Fan Y*. Sample Quantiles in Statistical Packages // The American Statistician. 1996. Vol. 50, no. 4. P. 361-365.

44. *Leadbetter M.R*. On a basis for "Peaks over Threshold" modeling // Stat. Probabil. Lett. 1991. Vol. 12, no. 4. P. 357-362.

45. *Little R.J.A., Rubin D.B*. Statistical analysis with missing data (2-d Ed.). Wiley & Sons Inc., 1987. 381 p.

46. *Reiss R.D., Thomas M*. Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields: 3d Ed. Berlin: Birkhauser Verlag, 2007. 516 p.

47. *Resnick S*. Extreme Values, Regular Variation, and Point Processes. New York: Springer Verlag, 1987. 320 p.

48. *Roberts N.M., Lean H.W.* Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events // Mon. Wea. Rev. 2008. Vol. 136. P. 78-97.

49. *Rubin D.B.* Inference and Missing Data // Biometrika. 1976. Vol. 63, no. 3. P. 581-592.

50. *Rubin D.B.* Multiple imputation after 18+ years // J. Amer. Statist. Assoc. 1996. Vol. 91, no. 434. P. 473-489.

51. *Seed A.W., Srikanthan R., Menabde M*. A space and time model for design storm rainfall // Jour. Geophys. Research. 1999. Vol. 194. D24. P.31623-31630.

52. *Seed A.W*. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting // J. Appl. Met. 2003. Vol. 42. P. 381-388.

53. *Seed A.W.* Modelling and forecasting rainfall in space and time // Scales in Hydrology and Water management (IAHS Publ. 287). 2004. P. 137-152.

54. *Smirnov A.V., Muravev A.V., Kiktev D.B*. Combining precipitation fields on the basis of radar data and mesoscale model output products in nowcasting systems of Hydrometcenter of Russia. // Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 50. WCRP Report No.12. Geneva, WMO. 2020. P. 2-19.

55. *Suveges M., Davidson A.C.* Model misspecifications in Peaks Over Threshold analysis // Annals Appl. Statistics. 2010. Vol. 4, no. 1. P. 203-221.

56. *Wilks D.S.* Statistical methods in the atmospheric sciences: 4th Ed. Elsevier, 2019. 816 p.

57. *WMO-No.237*.TP129. Manual for depth – area – duration analysis of storm precipitation. 1969. 131 p.

References

1. *Abdullaev S.M.* Zhiznennyj cikl mezomasshtabnyh konvektivnyh sistem: koncepciya, klimatologiya i prognoz: dissertacia doktora geograficheskih nauk. Moscow, 2010, p. 408. [in Russ.].

2. *Alibegova J.D.* Prostranstvenno-vremennaya structura poley jidkihk osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 224 p. [in Russ.].

3. *Bundel A.Yu., Muravyev A.V., Olkhovaya E.D.* Overview of spatial verification methods and their application to ensemble forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2021, vol. 382, no. 4, pp. 30-49. [in Russ.].

4. *Veltishev N.F., Stepanenko V.M.* Mezometeorologicheskie prozessy. Moscow, MGU, Geograficheskiy fakultet, 2006, 100 p. [in Russ.].

5. *WMO-168.* Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. Tom II. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primemeneniya gidrologicheskih metodov. Izd. 6, 2012 (2009). Glava 5. Analiz extremalnyh znacheniy. II-5.1 - II-5.58. [in Russ.].

6. *Galambos J.* The Asymptotic Theory of Extreme Order Statistics. 1978, Wiley.

7. *Galambos J.* The development of the mathematical theory of extremes in the past half century. Theory of Probability and its Applications. 1994, 39:2, pp.234–248.

8. *Gorshenin A.K., Korolev V.Yu.* Opredeleniye ekstremalnosty obyemov osadkov na osnove modificirovannogo metoda prevysheniya porogovogo znacheniya. Informatike i ee primeneiya, 2018, vol.12, no.4, pp. 16-24. [in Russ.].

9. *Gumbel E.* Statistics of extremes. N. Y., Columbia Univ. Press, 1958.

10. *Gumbel E.* Statistical theory of extreme values (main results). (In: Contributions to order statistics. Ed. Sarhan A., Greenberg B. John Wiley & Sons, New York, London. 1962), pp. 56-94.

11. *Isayev A.A.* Atmosfernye osadki. Chast I. Izmenchivost harakterostik osadkov na territorii Rossii i sopredelnyh stran. Moscow, MGU publ, 2002, 192 p. [in Russ.].

12. *Isayev A.A.* Atmosfernye osadki. Chast II. Mezostruktura poley jidkih osadkov. Moscow, MGU publ., 2001, 100 p. [in Russ.].

13. *Kiktev D. B., Murav'ev A. V., Smirnov A. V.* Precipitation forecasting based on multiplicative cascade model: radar nowcasting experience. Proceedings of the Int. Conference "Turbulence, atmosphere and climate dynamics", dedicated to centenary of acad. A. M. Obukhov, Moscow, May 16-18, 2018, p. 27. [in Russ.].

14. *Kiktev D. B., Murav'ev A. V., Smirnov A. V.* Nowcasting of meteorological parameters and hazards: implementation experience and development prospects. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 7, pp. 151-160. [in Russ.].

15. *Kramer H., Leadbetter M.R.* Stationary and related stochastic processes. Sample function properties and their applications. John Wiley, New York, London, 1967.

16. *Lagutin M.B.* Naglyadnayia matematiceskaya statistika. Moscow, Binom, 2009, 470 p. [in Russ.].

17. *Lebedev A.V.* Osnovy stohasticeskoi teorii ekstremumov. Moscow, Lenenad Publ., 2018, 104 p. [in Russ.].

18. *Leadbetter M.R., Lindzen G., Rootzen H.* Extremes and related properties of random sequences and processes. Springer-Verlag, New York, Berlin, 1986.

19. *Little R.J.A., Rubin D.B.* Statistical analysis with missing data (2-d Ed.). Wiley & Sons Inc., 1987.

20. *Murav'ev 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.].

21. *Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V., Zaichenko M.Yu.* Operational precipitation nowcasting system based on radar data and comparative pointwise verification results for the warm and cold seasons. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 372, no. 2, pp. 12-40 [in Russ.].

22. *Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V.* Usovershenstvovannaya tehnologiya radiolokazionnogo naukastinga osadkov i rezultaty verifikacii v teplyi period goda (mai - sentyabr 2020). *Rezultaty ispytaniya novih i usivershenstvovannyh tehnologiy, modeley i metodov gidromemeorologicheskih prognozov*, 2021, *Informacionnyi sbornik*, no.48, pp. 13-41. [in Russ.].

23. *Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V.* Sravnitelnaya verifikaciya usovershenstvovannoy sistemy radiolokacionnogo naukastinga osadkov s uchetom propuskov i pri razlichnyh metodah formirovaniya vyborok (po rezultatam ispytanii v teplyi period goda mai - sentyabr 2017 i 2020 gg). *Rezultaty ispytaniya novih i usivershenstvovannyh tehnologiy, modeley i metodov gidromemeorologicheskih prognozov*, 2022, *Informacionnyi sbornik*, no. 49, pp. 3-56. [in Russ.].

24. *Rodionov I.V.* O parametricheskom ocenivanii hvosta raspredeleniya. Doklady AN, 2019, vol. 488, no.4, pp. 356-359. [in Russ.].

25. *Rodionov I.V.* Veroyatnostnyi i statisticheskii analiz ekstremumov diskretnyh stochasticheskih sistem: dissertacia doktora geograficheskih nauk. Moscow, 2021, 259 p. [in Russ.].

26. *Tikhonov V.I.* Vybrosy sluchainyh processov. Moscow, Nauka Publ., 1970, 392 p. [in Russ.].

27. *Tutubalin V.N.* Teoriya veroyatnostei. Moscow, Akademia, 2008, 368 p. [in Russ.].

28. *Beirlant J., Goegebeur, Y., Segers, J., Teugels, J., Waal, D. D., Ferro, C*. Statistics of Extremes: Theory and Applications. Wiley, New York, 2004. 512 p.

29. *Bowler N., Pierce C., Seed A.* STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Q. J. R. Meteorol. Soc*., 2006, Vol. 132, P. 2127-2155.

30. *Cunnane C*. A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resour. Res*., 1979, vol. 15, no. 2, pp. 489-494.

31. *Davis C.A., Brown B. G. , Bullock R. G.* Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1772-1784.

32. *Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G.* Object-based verification of precipitation forecasts, Part II: Application to convective rain systems. *Mon. Wea. Rev*., 2006, vol. 134, pp. 1785-1795.

33. *De Haan L., Ferreira A.* Extreme value theory. An introduction. Springer, 2006, 420 p.

34. *Dorninger M., Mittermaier M. P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J.* MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain. NCAR/TN-505, 2013, 23 p.

35. *Ebert E., McBride J.* Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrol*., 2000, vol. 239, pp. 179-202.

36. *Forecast Verification*. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). John Wiley & Sons Ltd, 2012, 274, 37 p.

37. *Gilleland E*. 2020. Available at: https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/SpatialVx.pdf.

38. *Gilleland E., Ahijevych D., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E.* Intercomparison of spatial forecast verification methods. *Wea. Forecast*., 2009, vol. 24, pp. 1416-1430.

39. *Gilleland E., Skok G., Brown B., Casati B., Dorninger M., Mittermaier M.P., Roberts N., Wilson L.J.* A Novel Set of Geometric Verification Test Fields with Application to Distance Measures. *Mon. Wea. Rev*., 2020, vol. 148, pp. 1653-1673.

40. *Gilleland E., R.W. Katz*. extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software*, 2016, vol. 72, no. 8, pp. 1-39.

41. *Hsing T., Hüsler J., Leadbetter M.R.* On the exceedance point process for a stationary sequence. *Probab. Theory and Related Fields*, 1988, no.78, pp. 97-112.

42. Houze R. A. Jr. 100 Years of Research on Mesoscale Convective Systems, Meteorological Monographs, vol. 59, pp. 17.1-17.54. DOI: https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1.

43. *Hyndman R.J., Fan Y*. Sample Quantiles in Statistical Packages. *The American Statistician*, 1996, vol. 50, no. 4, pp. 361-365.

44. *Leadbetter M.R*. On a basis for “Peaks over Threshold” modeling. *Stat. Probabil. Lett.,* 1991, vol. 12, no. 4, pp. 357-362.

45. *Little R.J.A., Rubin D.B*. Statistical analysis with missing data (2-d Ed.). *Wiley & Sons Inc*., 1987, 381 p.

46. *Reiss R.D., Thomas M*. Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields. 3d Ed. Berlin, Birkhauser Verlag, 2007, 516 p.

47. *Resnick S*. Extreme Values, Regular Variation, and Point Processes. *Springer Verlag*, 1987, New York, 320 p.

48. *Roberts N.M., Lean H.W.* Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev*., 2008, vol. 136, pp. 78-97.

49. *Rubin D.B.* Inference and Missing Data. Biometrika, 1976, Vol. 63, No. 3, pp. 581-592.

50. *Rubin D.B.* Multiple imputation after 18+ years. *J. Amer. Statist. Assoc*., 1996, vol. 91, no. 434, pp. 473-489.

51. *Seed A.W., Srikanthan R., Menabde M*. A space and time model for design storm rainfall. *Jour. Geophys. Research*, 1999, Vol.194, D24, pp. 31623-31630.

52. *Seed, A. W*. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *J. Appl. Met*., 2003, vol. 42, pp. 381-388.

53. *Seed A.W.* Modelling and forecasting rainfall in space and time. Scales in Hydrology and Water management (IAHS Publ. 287), 2004, pp.137-152.

54. *Smirnov A.V., Muravev A.V., Kiktev D.B*. Combining precipitation fields on the basis of radar data and mesoscale model output products in nowcasting systems of Hydrometcenter of Russia. *Research activities in Earth system modelling.* Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 50. WCRP Report No.12. WMO, Geneva, 2020, pp. 2-19.

55. *Suveges M., A. C. Davidson*. Model misspecifications in Peaks Over Threshold analysis. *Annals Appl. Statistics*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 203-221.

56. *Wilks D.S*. Statistical methods in the atmospheric sciences. 4th Ed. Elsevier, 2019, 816 p.

57. *WMO-No.237*. TP129. Manual for depth - area - duration analysis of storm precipitation. 1969, 131 p.

Поступила 03.08.2021; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 03.08.2021; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-53-68
УДК 551.582.2:656.71

Динамика эпизодов низкой облачности и ограниченной видимости на аэродромах Российской Федерации в период 2001–2020 гг.

А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова

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

Кратко представлены результаты опроса пользователей авиационной метеорологической информации о значимости влияния климатических изменений на авиацию. Установлено, что наибольшую озабоченность пилотов, диспетчеров воздушного движения, операторов авиалиний и т.д. вызывают климатические изменения режима низкой облачности и видимости на аэродромах. На основе данных аэродромных наблюдений METAP за 2001–2020 гг. исследуется изменение количества и продолжительности эпизодов с ограниченной видимостью (≤350 и ≤800 м) и высотой нижней границы облачности ≤60 м на 49 международных аэродромах Российской Федерации. Установлено, что примерно на 20 % аэродромов в указанный период отмечалось увеличение количества эпизодов с низкой облачностью, почти столько же аэродромов продемонстрировало улучшение ситуации с ограниченной видимостью. Анализируется изменение средней и максимальной продолжительности подобных эпизодов для каждого аэродрома.

Ключевые слова: авиация, климатические изменения, туман, низкая облачность, видимость, аэродромные наблюдения

Change of episodes with low ceiling and low visibility at aerodromes in the Russian Federation for 2001-2010

A.R. Ivanova, E.N. Skriptunova

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

The results of a survey of aviation stakeholders on the significance of the impact of climate change on aviation are briefly presented. It has been found that pilots, air traffic controllers, airline operators, etc. are most interested in information related to climatic changes in the regime of low ceiling and visibility at aerodromes. Based on METAR data for 2001–2020, the variations in the number and duration of episodes with low visibility (≤350 and ≤800 m) and low ceiling ≤60 m at 49 international aerodromes of the Russian Federation are investigated. It was found that about 20% of the aerodromes during the period under study showed an increase in the number of episodes with low ceiling, almost the same number of aerodromes showed an improvement in the situation with low visibility. The change in the average and maximum duration of such episodes for each aerodrome is analyzed.

Keywords: aviation, climatic change, fog, ceiling, visibility, aerodrome observations

Введение

Грядущие и наблюдаемые изменения климата способны оказать влияние на все аспекты хозяйственной деятельности человека. Многочисленные исследования подтверждают, что изменения циркуляционных и погодных процессов в различных регионах Земли могут существенно отразиться на развитии авиационного транспорта [9, 14]. По результатам климатического моделирования установлено увеличение в будущем частоты появления зон турбулентности [17]. Ожидается изменение повторяемости глубокой конвекции и конвективных явлений погоды в различных регионах земного шара [1, 7, 12, 15]. Изучается динамика выпадения переохлажденных осадков как фактора обледенения воздушных судов [8, 10, 16]. Описывается негативный эффект от прогнозируемого повышения глобальной температуры, который повлияет на коммерческую загрузку воздушных судов [5, 6, 13, 18].

Согласно результатам опроса, который в 2020 году провела Всемирная метеорологическая организация [11], изменение климата весьма беспокоит представителей авиационной отрасли. Были отмечены сферы деятельности, которые наиболее вероятно будут затронуты, и обозначены погодные факторы, чьи изменения могут оказать воздействие на развитие и функционирование авиационного транспорта. Краткие результаты опроса описаны в разделе 1. Раздел 2 посвящен наблюдающимся с начала века изменениям режима низкой облачности и видимости на аэродромах Российской Федерации.

1. Оценка влияния изменений климата авиационными пользователями

В октябре 2020 года ВМО опубликовала результаты опроса респондентов из числа возможных потребителей авиационной метеорологической информации на тему «Влияние изменения и изменчивости климата на авиацию» [11]. На главный вопрос – считают ли пилоты, диспетчеры, операторы аэропортов и авиалиний, представители авиационной промышленности, авиационная администрация и пр. это влияние значимым – положительный ответ дали 93 % опрашиваемых. 49 % оценили это влияние как существенное («significant»), еще 44 % – как умеренное («moderate»). Таким образом, авиационная отрасль выразила озабоченность по поводу предстоящих климатических изменений. Самым актуальным в этом отношении временным интервалом почти три четверти (74 %) респондентов назвали период от 2 до 20 лет.

Как показал опрос, климатические изменения могут затронуть самые различные аспекты авиационной деятельности. Так, на *аэродромную инфраструктуру* окажут влияние экстремальные значения температуры, приводящие к термическим повреждениям покрытия взлетно-посадочных полос (ВПП); меняющиеся условия потребуют адаптации рабочих температурных диапазонов оборудования. Усиление экстремальных осадков

может привести к просадке грунтов, необходимости улучшения дренирования ВПП, рулежных дорожек и стоянок ВС. Наибольшее влияние на инфраструктуру аэродромов, по мнению респондентов, окажет повышение вероятности затопления летного поля из-за сильных дождей и штормовых нагонов.

Оперативное функционирование аэропорта в условиях изменения климата может столкнуться со следующими проблемами. Из-за изменения ветрового режима возможен переход к более пологим траекториям взлета, что приведет к усилению «акустического» загрязнения (шума двигателей) прилегающих территорий. Весьма вероятным представляется увеличение времени обслуживания ВС в более жарком климате. Главный же негативный результат связан с удлинением взлетных и посадочных дистанций пробега в более теплом климате и с сокращением пропускной способности ВПП из-за более длительного времени ее занятости.

При выполнении задач *управления воздушным движением* в условиях меняющегося климата придется столкнуться с увеличением проблем в управлении пропускной способностью аэропорта из-за увеличения повторяемости гроз. Пропускная способность секторов управления воздушным движением также усложнится из-за изменения температурного и ветрового режима на высотах, частоты возникновения конвективной облачности. Особую тревогу вызывает потенциальное увеличение операций при низкой видимости, связанное с ростом повторяемости туманов.

Влияние изменения климата на *безопасность полетов* может проявляться в возникновении сильных температурных инверсий в приземном слое, усложняющих выполнение операций взлета/посадки. Однако самыми важными следствиями воздействия климатических изменений на безопасность полетов были названы увеличение интенсивности и повторяемости турбулентности, а также увеличение риска столкновения с птицами из-за меняющихся путей их миграции.

Эффективность работы авиакомпаний в меняющемся климате будет снижаться из-за увеличения расхода топлива. Это может быть связано с более частым использованием вспомогательных силовых установок воздушного судна при его развороте, с более длинными траекториями полета при обходе зон грозовой конвекции и турбулентности, с уменьшением крейсерских скоростей. В более теплом климате следует ожидать сокращение загрузки судов, а при возрастании повторяемости экстремальной погоды (интенсивные штормы, сильные снегопады) – частое нарушение рабочих операций.

Один из важнейших вопросов [11], обращенных к представителям авиационной отрасли, касался метеорологических факторов, чьи климатические изменения в целом наиболее важны для функционирования авиации в будущем. Респондентам предлагалось выбрать по крайней мере три пункта из следующего списка:

– температура (приземная и на высотах),

– частота и интенсивность турбулентности,
– частота и интенсивность обледенения на земле и в полете,
– частота и интенсивность конвекции,
– положение и интенсивность струйных течений,
– высота тропопаузы,
– плохая видимость (включая туманы) и низкая облачность,
– уровень мирового океана.

Анализ ответов обнаружил следующие результаты. Подавляющая часть опрошенных (69 %) была озабочена в первую очередь проблемой, связанной с климатическими изменениями плохой видимости и низкой облачности на аэродромах, хотя динамика этих характеристик, как правило, исследуется на более коротких временных масштабах. Далее почти с равным весом расположились характеристики турбулентности (59 %), конвекции (58 %) и температура (58%). Изменение ветрового режима назвали 37 % респондентов, климатические тенденции частоты и интенсивности обледенения – 27 %.

Следует отметить, что две самые многочисленные группы респондентов – диспетчеры и пилоты – обнаружили неодинаковый подход к оценке климатических изменений одних и тех же факторов. Так, если авиадиспетчеры во главу списка значимых факторов поставили конвекцию (81 %), а высота тропопаузы замыкала этот список (7 %), то пилоты отводили обоим факторам равнозначную роль (по 37 %).

В целом, общее мнение авиационного сообщества было таковым: самую большую проблему для авиации, связанную с изменением климата, представляет увеличение эпизодов с ограниченной видимостью (в том числе из-за туманов) и низкой облачностью. По этой причине было принято решение исследовать тенденции количества и продолжительности подобных эпизодов, наблюдаемых на российских аэродромах в период 2001–2020 гг. Для этого были использованы базы данных аэродромных наблюдений METAP на 49 международных аэродромах Российской Федерации.

2. Тенденции некоторых авиационно-климатических характеристик в период 2001–2020 гг.

Туманы

Одной из причин ухудшения видимости на аэродромах является образование и адвекция туманов. В 2018 году авторы выпустили статью [2], в которой на основании данных аэродромных наблюдений METAP были выявлены тенденции повторяемости и продолжительности туманов на 51 крупном международном российском аэродроме (25 из которых расположены в европейской части Российской Федерации и 26 – в азиатской). Исследования проводились по данным наблюдений за три последовательных пятилетия – с 2001 по 2015 год.

Напомним, что по рекомендации ИКАО при составлении климатического описания аэродрома информация должна основываться на наблюдениях, проводившихся на аэродроме по крайней мере в течение 5 лет [3]. С тех пор временной ряд накопленных наблюдений увеличился, что позволило проследить за сохранением или нарушением ранее обнаруженных тенденций. К сожалению, прежде используемый для исследования список аэродромов России сократился: из-за придания статуса международного новым, недавно построенным аэропортам в Ростове-на-Дону («Платов» вместо «Ростов») и Саратове («Гагарин» вместо «Центральный»), в этих пунктах нарушился ряд наблюдений. В табл. 1 приводится список аэродромов, для которых проводились исследования, и число сводок METAP, выпущенных за двадцатилетний период на каждом из них.

Таблица 1. Список аэродромов, для которых проводились исследования, и число сводок METAP, выпущенных на них, в период 2001-2020 гг.
Table 1. List of aerodromes under consideration with corresponding number of METAR reports for 2001-2020

№	Пункт / аэродром	Код ИКАО	Кол-во сводок
Европейская часть			
1	Анапа / Витязево	URKA	285813
2	Архангельск / Талаги	ULAA	278938
3	Астрахань / Нариманово	URWA	339321
4	Волгоград / Гумрак	URWW	342916
5	Воронеж / Чертовицкое	UUOO	280158
6	Казань	UWKD	336948
7	Краснодар / Пашковский	URKK	341981
8	Мин. Воды	URMM	346434
9	Москва / Шереметьево	UUEE	345433
10	Москва / Внуково	UUWW	346546
11	Москва / Домодедово	UUDD	347238
12	Мурманск	ULMM	331416
13	Н. Новгород / Стригино	UWGG	332232
14	Нижнекамск / Бегишево	UWKE	329489
15	Салехард	USDD	270863
16	Самара / Курумоч	UWWW	345264
17	С.-Петербург / Пулково	ULLI	345650
18	Симферополь	URFF	343911
19	Ставрополь / Шпаковское	URMT	328281
20	Сочи	URSS	341243
21	Сыктывкар	UUYY	284890
22	Ульяновск / Восточный	UWLL	301583
23	Уфа	UWUU	344923

Азиатская часть			
24	Абакан	UNAA	345559
25	Барнаул	UNBB	344394
26	Благовещенск / Игнатьево	UHBB	261268
27	Братск	UIBB	345224
28	Владивосток / Яковичи	UHWW	291490
29	Екатеринбург / Кольцово	USSS	345456
30	Иркутск	UIII	345111
31	Кемерово	UNEE	339842
32	Красноярск / Емельяново	UNKL	343797
33	Магадан / Сокол	UHMM	224824
34	Мирный	UERR	230906
35	Нерюнгри / Чульман	UELL	240915
36	Николаевск-на-Амуре / Николаевск	UHNN	233177
37	Новокузнецк / Спиченково	UNWW	331363
38	Новосибирск / Толмачево	UNNT	346066
39	Норильск / Алыкель	UOOO	219234
40	Омск / Центральный	UNOO	346145
41	Сургут	USRR	265344
42	Тикси	UEST	185232
43	Тюмень / Рощино	USTR	339712
44	Улан-Удэ / Восточный	UIUU	327694
45	Хабаровск / Новый	UHHH	347177
46	Челябинск / Баландино	USCC	312036
47	Чита / Кадала	UIAA	263289
48	Южно-Сахалинск / Хомутово	UHSS	263289
49	Якутск	UEEE	304939

Примечание. Название аэродрома не приводится при совпадении с названием города.

По данным 2001–2015 гг. [2] были обнаружены 19 аэродромов, на которых существовали тенденции к уменьшению (11), либо к увеличению (8) числа эпизодов с туманами. В последующие пять лет эти тенденции сохранились только на пяти из них. Для московского аэродрома Домодедово и аэродрома Якутск число эпизодов с туманами продолжилось сокращаться (табл. 2). Напротив, на аэродромах Салехарда, Кемерово и Благовещенска отмечается последовательное увеличение эпизодов с туманами.

Особый интерес представляет продолжительность эпизодов с туманом, зарегистрированных на аэродромах. Напомним, поскольку в архивах METAP отсутствуют данные о точном времени начала или окончании эпизода, его длительность определялась с точностью до интервала времени между выпуском сводок. Так, если туман на аэродроме отмечался в единственной получасовой сводке, продолжительность эпизода

устанавливалась равной 30 минутам, если в двух сводках подряд – 1 часу и т. д. В табл. 3 включены те аэродромы, на которых: а) сохранялась отмеченная в предыдущие пятилетия тенденция к изменению для максимальной или средней продолжительности эпизодов (они отмечены заливкой) и б) в период 2016–2020 гг., даже при отсутствии тенденции, значения продолжительности оказались больше или меньше тех, что наблюдались ранее. Красный цвет чисел в таблице означает увеличение, синий – уменьшение продолжительности эпизодов.

Таблица 2. Число эпизодов с туманами на аэродромах за 2001-2020 гг. (красным обозначена тенденция к увеличению, синим – к уменьшению).
Table 2. Number of fog episodes at Russian aerodromes for 2001-2020 (positive and negative trends are in red and blue, respectively)

Пункт (аэродром)	Код ИКАО	**Число эпизодов**			
		2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
Москва, Домодедово	UUDD	581	564	351	300
Салехард	USDD	164	242	255	356
Якутск	UEEE	517	479	429	394
Кемерово	UNEE	155	170	229	263
Благовещенск	UHBB	122	143	168	241

Сохранение тенденции для максимальной продолжительности эпизодов с туманами отмечается только на аэродромах Анапы, Мурманска, Тикси, Казани (увеличение), а также Иркутска и Братска (уменьшение). При этом данные последнего пятилетия (2016–2020 гг.) демонстрируют следующие особенности. Для аэродромов в азиатской части страны – в Кемерово, Барнауле, Новокузнецке, Норильске, Абакане, Улан-Удэ и Хабаровске – по сравнению с предыдущими тремя пятилетиями сократилась средняя продолжительность эпизодов с туманом; для Екатеринбурга, Тикси, Тюмени, Красноярска и Николаевска-на-Амуре она увеличилась. Рост максимальной продолжительности эпизодов в последнее пятилетие отмечался в аэропортах Екатеринбурга и Николаевска-на-Амуре, сокращение максимальной продолжительности – в Омске, Барнауле, Новокузнецке, Улан-Удэ, Хабаровске, Владивостоке, Чите.

В европейской части России в Волгограде, Шереметьево, Минводах и Сочи в последнее пятилетие (2016–2020 гг.) отмечалось уменьшение как средней, так и максимальной продолжительности эпизодов с туманами. Значения максимальной продолжительности туманов, превышающие ранее регистрированные, отмечались на аэродромах Анапа, Казань, Мурманск, Салехард; для средней продолжительности – в Архангельске, Домодедово, Санкт-Петербурге. В среднем эпизоды с туманом стали короче в Краснодаре, Нижнем Новгороде и Ставрополе.

Таблица 3. Продолжительность (в часах) эпизодов с туманами на аэродромах за 2001-2020 гг. (заливкой выделены аэродромы с сохраняющейся тенденцией к увеличению или уменьшению длительности эпизодов)
Table 3. Duration of fog episodes (hours) at Russian aerodromes for 2001-2020 (aerodromes with positive or negative trends of fog duration are highlighted)

Пункт (аэродром)	Код ИКАО	Максимальная / средняя продолжительность (ч)			
		2001–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2020
Анапа	URKA	**7.5**/1.6	**7.5**/1.4	**10.5**/2.2	**11.5**/1.8
Архангельск	ULAA	7.0/**1.6**	11.5/**1.7**	16.0/**1.7**	9.0/**1.8**
Волгоград	URWW	62.5/3.8	42.5/4.4	56.0/4.9	**33.0/3.2**
Казань	UWKD	**19.0**/2.9	**23.0**/2.7	**26.0**/2.4	**33.5**/2.6
Краснодар	URKK	42.5/**3.3**	86.5/**3.1**	28.5/**3.0**	26.5/**2.6**
Мин. Воды	URMM	27.0/3.1	18.5/3.6	19.5/3.4	**17.0/2.8**
Москва, Шереметьево	UUEE	15.0/2.0	19.5/2.2	18.5/2.2	**10.5/1.8**
Москва, Домодедово	UUDD	38.0/1.7	17.0/1.4	18.0/1.8	17.5/**1.9**
Мурманск	ULMM	**9.0**/1.7	**9.5**/2.0	**9.5**/1.7	**17.0**/1.9
Н. Новгород	UWGG	21.0/**2.4**	21.0/**2.4**	12.0/**1.7**	12.5/**1.4**
Нижнекамск	UWKE	31.0/2.2	37.5/2.7	30.5/2.7	**18.5**/2.4
Салехард	USDD	17.5/2.4	18.5/2.4	16.5/2.8	**20.5**/2.5
С. -Петербург	ULLI	10.5/**1.7**	12.5/**1.7**	17.0/**1.9**	13.0/**2.0**
Ставрополь	URMT	34.0/3.4	30.0/3.5	49.5/4.0	33.5/**3.3**
Сочи	URSS	25.5/4.0	10.0/2.0	14.5/3.7	**8.0/1.9**
Абакан	UNAA	47.0/4.1	59.5/5.2	36.5/3.4	33.5/**2.1**
Барнаул	UNBB	15.5/2.2	27.0/2.6	16.0/2.2	**12.0/2.0**
Братск	UIBB	**67.0**/2.2	**17.0**/2.5	**15.0**/2.1	**12.5/1.9**
Владивосток	UHWW	17.5/2.3	14.5/2.8	15.0/2.8	**12.5**/2.4
Екатеринбург	USSS	14.0/1.6	11.5/1.5	11.0/1.3	**15.0**/1.9
Иркутск	UIII	**19.5**/1.8	**19.5**/1.9	**12.0**/1.9	**11.0**/1.8
Кемерово	UNEE	14.5/2.6	28.5/2.3	19.0/2.5	15.5/**2.2**
Красноярск	UNKL	49.0/1.4	12.5/1.3	11.5/1.3	14.0/**1.5**
Николаевск-на Амуре	UHNN	8.5/1.8	11.0/2.1	10.5/1.9	**12.5/2.4**
Новокузнецк	UNWW	22.0/**2.8**	30.0/**2.8**	27.5/**2.6**	**13.5/2.5**
Норильск	UOOO	27.5/3.1	18.5/2.8	35.5/2.9	24.0/**2.5**
Омск	UNOO	13.5/1.7	17.0/1.8	12.5/1.5	**8.0**/1.7
Тикси	UEST	**8.5**/1.1	**17.0**/2.3	**17.0**/2.3	**20.5/2.7**
Тюмень	USTR	12.5/**1.8**	11.5/**2.0**	15.0/**2.1**	12.0/**2.3**
Улан-Удэ	UIUU	10.5/1.8	11.0/3.2	13.5/2.8	**7.0/1.5**
Хабаровск	UHHH	10.5/2.2	14.0/2.5	11.0/2.2	**9.0/1.8**
Чита	UIAA	16.5/1.8	23.5/2.1	12.5/1.6	**6.5**/1.6

Низкая облачность и видимость

Климатические изменения низкой облачности и видимости на российских аэродромах ранее не рассматривались. В данном случае методология исследования была выбрана такая же, как для туманов. Изучалось количество эпизодов с низкой облачностью и/или видимостью, оцененное по сводкам METAP за 5-летний период, их максимальная и средняя продолжительность.

Рассмотрим вначале отдельно эпизоды с низкой облачностью и видимостью, а затем их комбинацию. Для анализа были выбраны значения высоты нижней границы облачности ВНГО≤60 м и дальность видимости VIS≤350 и ≤800 м. Результаты представлены в табл. 4–6, где красная последовательность цифр для четырех пятилетий означает тенденцию к увеличению характеристик со временем, синяя – к уменьшению.

Таблица 4. Количество эпизодов с ВНГО≤60 м (**NE**), максимальная (MD) и средняя (*SD*) длительность эпизодов в часах на аэродромах РФ
Table 4. Number of episodes with ceiling≤60 m (NE), maximum (MD) and average (*SD*) duration of episodes in hours at Russian aerodromes

Пункт (аэродром)	Код ИКАО	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*
		2001–2005			2006–2010			2011–2015			2016–2020		
Архангельск	ULAA	**184**	8.5	*1.6*	**200**	15.0	*2.0*	**306**	17.0	*1.7*	**385**	16.0	*1.8*
Воронеж	UUOO	**366**	19.5	*2.0*	**434**	25.5	*2.5*	**325**	31.0	*2.7*	**371**	25.5	*2.9*
Москва, Шереметьево	UUEE	**118**	11.0	*2.1*	**166**	17.5	*2.4*	**247**	18.0	*2.1*	**441**	27.5	*2.3*
Москва, Внуково	UUWW	**248**	37.5	*2.1*	**200**	18.5	*2.5*	**362**	26.5	*2.5*	**543**	58.5	*2.8*
Мурманск	ULMM	**344**	10.5	*1.1*	**349**	9.5	*1.4*	**293**	15.5	*2.1*	**569**	30.0	*2.3*
Нижнекамск	UWKE	**310**	15.0	*2.0*	**418**	44.0	*2.4*	**303**	37.0	*2.8*	**415**	23.0	*2.7*
Салехард	USDD	**264**	17.5	*2.3*	**434**	24.0	*2.5*	**604**	28.5	*2.3*	**868**	28.5	*2.5*
Самара	UWWW	**193**	20.0	*2.2*	**241**	23.0	*2.7*	**343**	18.5	*2.2*	**346**	30.5	*2.4*
Сочи	URSS	**50**	5.5	*1.1*	**44**	9.5	*1.1*	**69**	12.0	*1.6*	**23**	7.0	*1.9*
Ульяновск	UWLL	**64**	13.5	*1.9*	**93**	25.5	*2.6*	**122**	15.0	2.3	**145**	29.0	*2.8*
Барнаул	UNBB	**135**	14.0	*1.9*	**251**	23.5	*2.0*	**417**	26.0	*1.5*	**447**	14.5	*1.4*
Благовещенск	UHBB	**120**	7.5	*1.9*	**84**	9.5	*2.1*	**264**	15.0	*2.1*	**188**	11.5	*2.3*
Братск	UIBB	**312**	45.0	*2.6*	**305**	17.5	*2.3*	**204**	16.0	*2.2*	**254**	16.0	*2.5*
Екатеринбург	USSS	**110**	11.0	*1.9*	**164**	11.0	*1.6*	**399**	12.5	*1.5*	**314**	14.5	*1.7*
Красноярск	UNKL	**49**	14.5	*2.2*	**64**	7.5	*1.8*	**288**	12.5	*1.6*	**417**	11.5	*1.1*
Кемерово	UNEE	**147**	14.5	*1.8*	**246**	23.0	*1.6*	**262**	17.5	*1.7*	**468**	15.5	*2.1*
Нерюнгри	UELL	**116**	8.5	*1.5*	**148**	11.0	*1.9*	**116**	9.0	*1.9*	**147**	9.5	*2.0*
Николаевск	UHNN	**116**	8.5	*1.7*	**152**	18.5	*1.8*	**229**	15.0	*2.1*	**181**	12.5	*2.2*
Норильск	UOOO	**626**	55.5	*3.2*	**665**	38.5	*2.7*	**675**	37.0	*2.6*	**765**	25.5	*1.8*
Улан-Удэ	UIUU	**50**	9.0	*1.9*	**51**	11.0	*3.1*	**63**	13.0	*2.6*	**79**	7.0	*1.8*

Таблица 5. Количество эпизодов за 5 лет с видимостью ≤350 м (**NE**), максимальная (MD) и средняя (*SD*) длительность эпизодов в часах на аэродромах РФ
Table 5. Number of episodes with visibility ≤350 m (NE), maximum (MD) and average (SD) duration of episodes in hours at Russian aerodromes

Пункт (аэродром)	Код ИКАО	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*
		2001–2005			2006–2010			2011–2015			2016–2020		
Анапа	URKA	**33**	3.5	*1.1*	**48**	4.5	*1.3*	**74**	10.0	*1.9*	**109**	8.0	*1.6*
Астрахань	URWA	**233**	11.5	*1.9*	**193**	15.0	*2.4*	**187**	16.0	*2.9*	**171**	12.0	*2.8*
Волгоград	URWW	**460**	38.0	*3.1*	**408**	30.0	*3.1*	**348**	55.0	*3.7*	**343**	29.5	*2.6*
Казань	UWKD	**230**	11.0	*1.7*	**187**	22.0	*2.5*	**193**	24.5	*1.9*	**145**	33.0	*2.2*
Москва, Шереметьево	UUEE	**145**	14.0	*1.6*	**94**	14.0	*1.9*	**63**	9.0	*1.9*	**35**	5.5	*1.3*
Москва, Внуково	UUWW	**284**	15.5	*1.4*	**241**	11.0	*1.6*	**124**	8.5	*1.7*	**62**	11.0	*1.8*
Москва, Домодедово	UUDD	**360**	17.5	*1.5*	**313**	18.5	*1.5*	**200**	7.0	*1.5*	**78**	15.5	*1.7*
Мурманск	ULMM	**105**	4.5	*1.1*	**130**	7.0	*1.4*	**134**	7.5	*1.2*	**126**	8.5	*1.4*
Самара	UWWW	**250**	18.0	*2.0*	**227**	16.5	*2.0*	**223**	13.5	*1.7*	**141**	15.5	*2.3*
С. Петербург	ULLI	**241**	9.0	*1.3*	**211**	7.5	*1.3*	**153**	14.5	*1.5*	**122**	7.5	*1.4*
Екатеринбург	USSS	**358**	13.0	*1.5*	**383**	11.5	*1.2*	**337**	10.5	*1.2*	**195**	9.5	*1.4*
Иркутск	UIII	**481**	11.5	*1.3*	**297**	11.5	*1.7*	**295**	9.5	*1.7*	**200**	9.0	*1.7*
Нерюнгри	UELL	**13**	3.5	*1.4*	**9**	5.5	*2.8*	**5**	6.0	*2.0*	**3**	2.0	*1.2*
Новосибирск	UNNT	**197**	9.5	*1.6*	**188**	7.0	*1.5*	**183**	11.0	*1.3*	**141**	10.5	*1.5*
Новокузнецк	UNWW	**174**	14.5	*2.5*	**207**	29.5	*2.2*	**267**	15.5	*2.2*	**281**	11.5	*2.0*
Нерюнгри	UELL	**13**	3.5	*1.4*	**9**	5.5	*2.8*	**5**	6.0	*2.0*	**3**	2.0	*1.2*
Улан-Удэ	UIUU	**33**	6.0	*1.3*	**36**	8.5	*2.5*	**39**	12.0	*2.3*	**55**	4.5	*1.3*
Хабаровск	UHHH	**98**	16.0	*2.1*	**74**	9.0	*2.1*	**152**	12.5	*1.6*	**86**	7.0	*1.4*
Чита	UIAA	**108**	13.5	*1.3*	**111**	9.5	*1.1*	**93**	5.5	*1.2*	**33**	3.0	*1.2*
Якутск	UEEE	**370**	27.5	*3.6*	**558**	38.0	*3.6*	**637**	51.5	*3.4*	**522**	39.0	*2.8*

Негативная климатическая тенденция, проявляющаяся в увеличении количества эпизодов с ВНГО≤60 м, зафиксирована на 20 % исследуемых аэродромов (10 из 49). При этом уменьшение подобных эпизодов нигде не наблюдается. В европейской части России увеличение эпизодов с низкой облачностью на протяжении всего периода отмечается в Архангельске, Шереметьево, Салехарде, Самаре, Ульяновске; в азиатской – в Норильске, Красноярске, Кемерово, Барнауле, Улан-Удэ. Максимальный прирост эпизодов по сравнению с первым пятилетием отмечен в Красноярске – в 8.5 раз. В Шереметьево и Салехарде, кроме увеличения числа эпизодов с ВНГО≤60 м, отмечен рост их максимальной продолжительности.

Отметим, что на некоторых аэродромах азиатской части страны длительность эпизодов с низкой облачностью сокращается: в Братске отмечается тенденция к уменьшению максимальной продолжительности эпизодов, в Красноярске – средней, в Норильске – как средней, так и максимальной.

Анализ динамики случаев ограниченной видимости проводился для двух пороговых значений: ≤350 м и ≤800 м. В отличие от динамики низкой облачности, изменение режима видимости за 2001–2020 гг. на российских аэродромах выглядит довольно позитивным.

Характеристики эпизодов с ограниченной видимостью, согласно табл. 5 и 6, гораздо чаще обнаруживают тенденцию к уменьшению, чем к увеличению. Количество аэродромов, на которых сократилось число эпизодов с ограниченной видимостью, составляет примерно 20 %. Максимальное сокращение случаев (в 4.6 раза) с ограниченной видимостью отмечается в аэропортах московского аэроузла – в Домодедово для VIS≤800 м и во Внуково для VIS≤350 м. При этом во Внуково незначительно выросла средняя продолжительность эпизодов (для случаев VIS≤350 м – с 1.4 до 1.7 ч, для VIS≤800 м – с 1.6 до 1.9 ч). В Шереметьево с 14 до 5.5 ч сократилась максимальная продолжительность эпизодов с VIS≤350 м.

Таблица 6. Количество эпизодов с видимостью ≤800 м (**NE**), максимальная (MD) и средняя (*SD*) длительность эпизодов в часах на аэродромах РФ
Table 6. Number of episodes with visibility ≤800 m (NE), maximum (MD) and average (SD) duration of episodes in hours at Russian aerodromes

Пункт (аэродром)	Код ИКАО	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*	**NE**	MD	*SD*
		2001–2005			2006–2010			2011–2015			2016–2020		
Анапа	URKA	**129**	8.0	*1.5*	107	9.5	*1.6*	148	10.5	*1.9*	168	10.5	*1.9*
Волгоград	URWW	**637**	62.5	*3.4*	**491**	40.0	*4.1*	**489**	55.5	*3.9*	**485**	32.0	*2.8*
Воронеж	UUOO	**495**	18.5	*1.6*	502	16.0	*1.9*	328	29.0	*2.3*	338	23.0	*2.3*
Краснодар	URKK	**389**	42.5	*2.8*	**373**	68.0	*2.7*	**279**	26.5	*2.5*	**246**	22.0	*2.5*
Москва Ш.	UUEE	**380**	15.0	*1.4*	**250**	34.5	*1.7*	**183**	17.5	*1.5*	**126**	8.5	*1.4*
Москва В.	UUWW	**510**	40.0	*1.6*	**440**	26.0	*1.8*	**249**	20.0	*1.8*	**166**	24.0	*1.9*
Москва Д.	UUDD	**639**	29.0	*1.6*	**576**	39.5	*1.6*	**380**	17.5	*1.6*	**186**	16.5	*1.7*
Н. Новгород	UWGG	**570**	20.5	*1.9*	633	21.0	*1.9*	477	11.5	*1.4*	163	12.0	*1.2*
С. Петербург	ULLI	**499**	16.0	*1.4*	**364**	10.5	*1.5*	**259**	17.0	*1.5*	**207**	10.5	*1.6*
Саратов	UWSS	**447**	53.0	*4.2*	**440**	58.5	*3.9*	**422**	34.0	*3.3*	**369**	43.5	*3.4*
Симферополь	URFF	**638**	23.0	*2.4*	**572**	19.0	*2.3*	**563**	28.5	*2.4*	**385**	18.0	*2.6*
Сыктывкар	UUYY	**345**	9.5	*1.5*	**333**	11.0	*1.6*	**296**	10.0	*1.3*	**272**	10.0	*1.5*
Благовещенск	UHBB	**154**	7.5	*1.7*	**156**	9.5	*2.0*	**227**	14.0	*2.2*	**278**	8.5	*1.9*
Братск	UIBB	**438**	70.5	*2.0*	454	17.0	*1.7*	330	15.0	*1.7*	342	9.0	*1.4*
Екатеринбург	USSS	**588**	13.5	*1.4*	697	11.5	*1.1*	472	11.0	*1.2*	270	11.0	*1.5*
Иркутск	UIII	**663**	15.0	*1.5*	**477**	13.5	*1.6*	**469**	16.5	*1.6*	**298**	10.5	*1.6*
Новокузнецк	UNWW	**314**	19.0	*2.5*	**384**	30.0	*2.3*	**454**	15.5	*2.2*	**459**	12.0	*1.9*
Новосибирск	UNNT	**336**	9.5	*1.6*	**335**	8.5	*1.5*	**315**	11.5	*1.4*	**221**	10.5	*1.6*
Омск	UNOO	**452**	36.5	*1.7*	290	17.0	*1.5*	389	10.5	*1.3*	180	7.5	*1.5*
Якутск	UEEE	**583**	70.5	*6.3*	**581**	165.0	*6.9*	**552**	77.0	*7.1*	**522**	74.5	*6.2*

Всего на нескольких аэродромах отмечается увеличение количества эпизодов с VIS≤350 м (в Анапе и Улан-Удэ) и с VIS≤800 м (в Благовещенске и Новокузнецке). Наибольшее увеличение максимальной продолжительности эпизодов с ограниченной видимостью имеет место в Казани (с 11 до 33 ч при VIS≤350 м), средней продолжительности – в Воронеже (с 1.6 до 2.3 ч при VIS≤800 м). В то же время сильнее всего сократились по времени эпизоды ограниченной видимости в Братске: максимальная продолжительность случаев с VIS≤800 м уменьшилась с 70.5 до 9.0 ч, средняя – с 2 до 1.4 ч.

Используемые в авиации понятия «минимумов погоды» или «категории» для командира воздушного судна, типа воздушного судна и аэродромов часто подразумевают сочетание пороговых значений видимости и высоты нижней границы облачности [4]. В данном случае в качестве примера приведены данные о тенденции количества эпизодов с ВНГО ≤60 м и VIS≤800 м (рисунок).

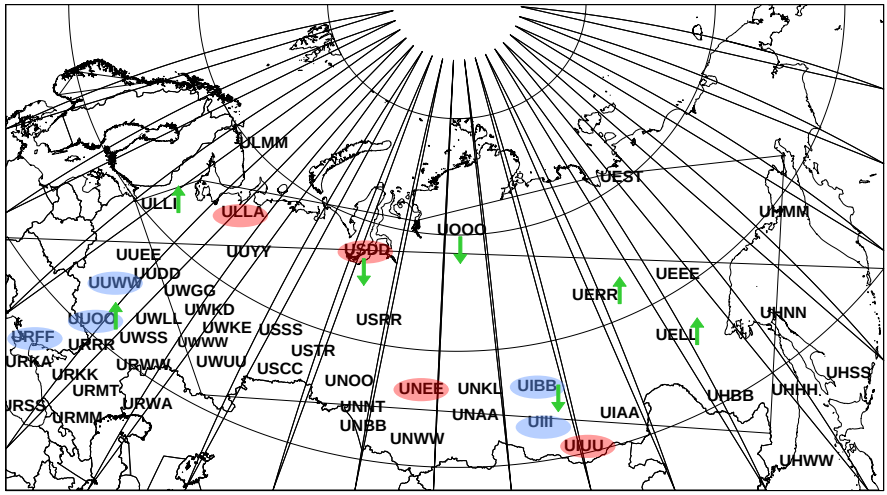


Рис. Аэродромы, на которых в период 2001-2020 гг. отмечалась тенденция к увеличению (красный цвет) или уменьшению (синий цвет) количества эпизодов с сочетанием условий ВНГО ≤60 м и VIS≤800 м. Направление зеленых стрелок указывает на увеличение (вверх) или уменьшение (вниз) средней продолжительности подобных эпизодов за указанный период.
Fig. Aerodromes which demonstrate positive (red) or negative (blue) trend for the number of episodes with a combination of ceiling ≤60 m and visibility≤800 m (2001-2020). The direction of the green arrows indicates an increase (up) or decrease (down) of the average duration of such episodes over the specified period.

Анализ рисунка позволяет установить улучшение «комплексных» условий (учитывающих видимость и ВНГО) во Внуково, Воронеже, Симферополе, Братске и Иркутске с начала века. В то же время отмечается

тенденция к росту эпизодов с низкой облачностью и ограниченной видимостью на аэродромах Архангельска, Салехарда, Новокузнецка и Улан-Удэ. При этом в Салехарде изменение частоты эпизодов компенсируется уменьшением их продолжительности, в Воронеже – увеличением. Для аэродрома Братск подобные эпизоды стали реже и короче. Увеличение средней продолжительности условий с ВНГО≤60 м и VIS≤800 м отмечено также в Мирном, Нерюнгри и Санкт-Петербурге, уменьшение – в Норильске.

Заключение

По мнению авиационного сообщества, грядущие климатические изменения окажут несомненное влияние на все аспекты авиационной деятельности, затронув безопасность полетов, эффективность их выполнения, осуществление организации воздушного движения, существующую инфраструктуру аэропортов и т. д. При этом из всей совокупности негативных погодных факторов особую озабоченность вызывает изменение режима низкой облачности и видимости на аэродромах (в том числе повторяемости туманов).

По данным наблюдений на 49 аэродромах Российской Федерации определены тенденции повторяемости, максимальной и средней продолжительности эпизодов с туманами, низкой облачностью и ограниченной видимостью за период 2001–2020 гг. Отмечено сокращение числа эпизодов с туманами в Домодедово и Якутске и увеличение – на аэродромах Салехарда, Кемерово и Благовещенска. При этом на шести аэродромах отмечалось увеличение максимальной или средней продолжительности подобных эпизодов, а на четырех – уменьшение.

Впервые проведенный анализ изменения повторяемости и продолжительности эпизодов с низкой облачностью и видимостью обнаружил, что на 10 аэродромах с начала века наблюдался устойчивый рост числа эпизодов с ВНГО≤60 м, в равной степени – как в европейской, так и в азиатской части страны; снижения ни на одном аэродроме зафиксировано не было. При этом ситуация с ограниченной видимостью в целом улучшилась. Примерно на 20 % всех аэродромов количество эпизодов с ограниченной видимостью уменьшилось (максимально – в аэропортах Московского аэроузла). Увеличение числа подобных случаев отмечено только на аэродромах Анапы (VIS≤350 м), Благовещенска и Новокузнецка (VIS≤800 м).

Исследование эпизодов с сочетанием ВНГО≤60 м и VIS≤800 м позволило заключить, что такие комплексные условия для взлета и посадки воздушных судов в период 2001–2020 гг. улучшились на аэродромах Внуково, Воронежа, Симферополя, Братска и Иркутска. В то же время ухудшение подобных условий наблюдается на аэродромах Архангельска, Салехарда, Нерюнгри и Улан-Удэ.

Список литературы

1. *Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А.* Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108-117.

2. *Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н.* Об изменении некоторых климатических характеристик на аэродромах Российской Федерации в 2001–2015 гг. // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 39-53.

3. Приложение 3 к Конвенции о Международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации: Издание девятнадцатое. Июль 2016.

4. Федеральные авиационные правила «Правила и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации»: Утвержден приказом Минтранса России от 31 июля 2009 г. № 128.

5. *Coffel E., Horton R.* Climate Change and the Impact of Extreme Temperatures on Aviation // Weather, Climate and Society. 2015. Vol. 7. P. 94–102. DOI:https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00026.1

6. *Coffel E.D., Tpompson T.R., Horton R.M.* The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance // Climatic Change. Vol. 144. P. 381-388. DOI: 10.1007/s10584-017-2018-9

7. *Finney D.L., Marsham J.M., Rowell D.P., Kendon E.J., Tucker S.O., Stratton R.A., Jackson L.S.* Effects of Explicit Convection on Future Projections of Mesoscale Circulations, Rainfall, and Rainfall Extremes over Eastern Africa // J. Climate. 2020. Vol. 33, is. 7. P. 2701-2718. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0328.1

8. *Groisman P., Bulygina O., Xungang Y., Vose R.S., Gulev S.K., Hanssen-Bauer I., Forland E.* Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia // Environ. Res. Lett. 2016. Vol. 11, is. 4. P. 1-16. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/045007

9. *Gultepe I., Sharman R., Williams P.D., Ellrod G., Trier S., Griffin S., Seong S., Yum S., Gharabaghi B., Feltz W., Temimi M., Zhaoxia P., Storer L.N., Kneringer P., Weston M.J., Chuang H., Thobois I., Dimri A.R., Dietz S.J., Gutemberg B., Franca A., Almeida M.V., Albquerque Neto F.L.* Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology // Pure Appl. Geophys. 2019. Vol. 176. P. 1869-1921.

10. *Jeong D. Il.J., Cannon A.J., Zhang X.* Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2019. Vol. 19. P. 857-872 DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-19-857-2019

11. Outcomes of the 2020 Survey on the Impacts of Climate Change and Variability on Aviation. Geneva: WMO, AeMSeries No. 6, October 2020.

12. *Pucik T., Groenmejer P., Radler A., Tijssen L., Nikulin G., Prein A.F., van Meijgaard P., Fealy R., Jacob D., Teichmann C.* Future Changes in European Severe Convection Environments in a Regional Climate Model Ensemble // J. Clim. 2017. Vol. 30. P. 6721-6794. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0777.1

13. *Ren D., Dickinson R., Fu R., Bornman J., Guo W., Yang S., Lerslie L.* Impacts of climate warming on maximum aviation payloads // Climate Dynamics. 2019. Vol. 52. P. 1711-1721. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4399-5

14. *Ryley T., Baumeister S., Coulter S.* Climate changes influences on aviation: A literature review // Transport Policy. 2020. Vol. 92. P. 52-64. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.010

15. *Taszarec M., Allen J.T., Marchio M., Brooks H.* Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data // npj Climate and Atmospheric Science. 2021. Vol. 35. P. 1-11. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00190-x

16. *Tropea B., Stewart R.* Assessing past and future hazardous freezing rain and wet snow events in Manitoba, Canada using a pseudo-global warming approach // Atmospheric Research. 2021. Vol. 259. P. 1-16. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105656

17. *Williams P.* Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change // Advances and Atmospheric Sciences. 2017. Vol. 34. P. 576-586. DOI: 10.1007/s00376-017-6268-2.

18. *Zhou T., Ren L., Liu H., Lu J.* Impact of 1.5 ºC and 2.0 ºC global warming on aircraft takeoff performance in China // Science Bulletin. 2018. Vol. 63. P. 700-707. https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.03.018

References

1. *Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov, K.N.* et al. Assessment of Atmospheric Convective Potential Variability in Western Siberia in Changing Climate. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 360-367. DOI: 10.3103/S1068373920050076.

2. *Ivanova, A.R., Skriptunova, E.N.* Variations in Some Climatological Characteristics at the Aerodromes of the Russian Federation in 2001–2015. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018, vol. 43, no. 5, pp. 302-312. DOI: 10.3103/S1068373918050047.

3. Prilozhenie 3 k Konvencii o Mezhdunarodnoy grazhdanskoy aviacii. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoy aeronavigacii: Izdanie devyatnadcatoe. Iyul' 2016. [in Russ.]

4. Federal'nye aviacionnye pravila «Pravila i vypolnenie poletov v grazhdanskoy aviacii Rossiyskoy Federacii»: Utverzhden prikazom Mintransa Rossii ot 31 iyulya 2009 g. № 128. [in Russ.]

5. *Coffel E., Horton R.* Climate Change and the Impact of Extreme Temperatures on Aviation. *Weather, Climate and Society.* 2015, vol. 7, pp. 94-102. DOI:https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00026.1.

6. *Coffel E.D., Tpompson T.R., Horton R.M.* The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. *Climatic Change,* 2018, vol. 144, pp. 381-388. DOI:10.1007/s10584-017-2018-9

7. *Finney D.L., Marsham J.M., Rowell D.P., Kendon E.J., Tucker S.O., Stratton R.A., Jackson L.S.* Effects of Explicit Convection on Future Projections of Mesoscale Circulations, Rainfall, and Rainfall Extremes over Eastern Africa. *J. Climate*., 2020, vol. 33, no. 7, pp. 2701-2718. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0328.1.

8. *Groisman P., Bulygina O., Xungang Y., Vose R.S., Gulev S.K., Hanssen-Bauer I., Forland E.* Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environ. Res. Lett*., 2016, vol. 11, no. 4, pp. 1-16. DOI:10.1088/1748-9326/11/4/045007.

9. *Gultepe I., Sharman R., Williams P.D., Ellrod G., Trier S., Griffin S., Seong S., Yum S., Gharabaghi B., Feltz W., Temimi M., Zhaoxia P., Storer L.N., Kneringer P., Weston M.J., Chuang H., Thobois I., Dimri A.R., Dietz S.J., Gutemberg B., Franca A., Almeida M.V., Albquerque Neto F.L.* Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys*., 2019, vol. 176, pp. 1869-1921.

10. *Jeong D. Il.J., Cannon A.J., Zhang X*. Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 2019, vol. 19, pp. 857-872. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-19-857-2019.

11. Outcomes of the 2020 Survey on the Impacts of Climate Change and Variability on Aviation. Geneva: WMO, AeMSeries No. 6, October 2020.

12. *Pucik T., Groenmejer P., Radler A., Tijssen L., Nikulin G., Prein A.F., van Meijgaard P., Fealy R., Jacob D., Teichmann C.* Future Changes in European Severe Convection Environments in a Regional Climate Model Ensemble. *J. Clim.*, 2017, vol. 30, pp. 6721-6794. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0777.1.

13. *Ren D., Dickinson R., Fu R., Bornman J., Guo W., Yang S., Lerslie L.* Impacts of climate warming on maximum aviation payloads. *Climate Dynamics*. 2019, vol. 52, pp. 1711-1721. DOI: 10.1007/s00382-018-4399-5/

14. *Ryley T., Baumeister S., Coulter S.* Climate changes influences on aviation: A literature review. *Transport Policy*, 2020, vol. 92, pp. 52-64. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.010.

15. *Taszarec M., Allen J.T., Marchio M., Brooks H.* Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2021, vol. 35, pp. 1-11. DOI: 10.1038/s41612-021-00190-x

16. *Tropea B., Stewart R.* Assessing past and future hazardous freezing rain and wet snow events in Manitoba, Canada using a pseudo-global warming approach. *Atmospheric Research*, 2021, vol. 259, pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105656

17. *Williams P.* Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change. Advances and Atmospheric Sciences, 2017, vol. 34, pp. 576-586. DOI: 10.1007/s00376-017-6268-2.

18. *Zhou T., Ren L., Liu H., Lu J.* Impact of 1.5 ºC and 2.0 ºC global warming on aircraft takeoff performance in China. *Science Bulletin*. 2018, vol. 63, pp. 700-707. DOI: 10.1016/j.scib.2018.03.018.

Поступила 27.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 27.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-69-91
УДК 551.501.8+551.594.9

Исследование мезомасштабной конвективной системы в центральных районах ЕТР 7 августа 2021 года

А.А. Спрыгин, А.Е. Вязилов

Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, Калужская область, Россия
sprygin@rpatyphoon.ru

Приведен анализ случая формирования конвективного шторма в составе квазилинейной мезомасштабной конвективной системы 7 августа 2021 года, перемещавшейся по территории областей центральной части ЕТР. Анализируются спрогнозированные поля метеорологических элементов и данные дистанционного зондирования атмосферы: радарные, спутниковые, грозопеленгационные, а также мониторинга электрического поля атмосферы. Выявлен ряд особенностей в распределении метеорологических параметров, полезных для наукастинга опасных явлений, связанных с формированием устойчивых мощных конвективных структур.

Ключевые слова: мезомасштабная конвективная система, мощный конвективный шторм, сигнатуры спутниковых и грозопеленгационных данных, индексы неустойчивости, опасные конвективные явления, наукастинг, электрическое поле атмосферы

A case study of the mesoscale convective system over central regions of European Russia on August 7, 2021

A.A. Sprygin, A.E. Vyazilov

Research and Production Association «Typhoon», Obninsk, Russia;
sprygin@rpatyphoon.ru

The article provides a case study of the formation of a severe convective storm as part of a quasilinear mesoscale convective system on August 7, 2021 that moved over the territory of the central part of European Russia. The predicted fields of meteorological characteristics and the following data of remote sensing of the atmosphere were analyzed: radar, satellite, lightning detection and atmospheric electric field data. A number of features were revealed in the distribution of meteorological parameters, which are useful for nowcasting of hazards associated with the formation of stable severe convective structures.

Keywords: mesoscale convective system, severe convective storm, satellite and lightning detection signatures, instability indices, convective hazards, nowcasting, atmospheric electric field

Введение

Процессы мощной организованной конвекции в атмосфере, возникающие при определенных синоптических и термодинамических условиях, чаще всего приводят к формированию опасных конвективных явлений и поэтому требуют тщательного изучения. Безусловно важным представляется комплексный анализ данных (синоптического и мезомасштабов) для оценки роли тех или иных факторов в развитии глубокой конвекции. Особенности таких процессов проявляются в диагностических данных: спутниковых, радарных, грозопеленгационных и др. Данной тематике посвящен ряд работ [3–5, 7–9, 13]. Необходимо отметить объектно-ориентированный подход в подобных работах: объектами исследования выступают не сами опасные конвективные явления, а генерирующие их облачные системы, например мезомасштабные конвективные комплексы и суперъячейковые кучево-дождевые облака, т. е. изучаются конвективные штормы различного масштаба. Под термином «мощный конвективный шторм» в данной работе понимается шторм (конвективный очаг) устойчивой формы, получивший существенное развитие по диагностическим данным (достигший критерия «градового» / «шквалового» по данным МРЛ либо имеющий минимальную температуру верхней границы облачности менее -60 ºС по спутниковым данным и др.), т. е. который имеет высокий потенциал для генерации опасных явлений / комплекса явлений (не всегда регистрируемых у земли).

В таких работах анализируются условия формирования систем глубокой конвекции на различных стадиях жизненного цикла и распада [7, 12, 13, 16], что важно для понимания их генезиса и динамики, а также возможности генерации (на определенных стадиях развития) опасных явлений. Здесь часто представляется возможным отбор наиболее важных признаков конвективных процессов, что может быть полезным в синоптической практике: в краткосрочном прогнозе и наукастинге опасных конвективных явлений. Данный аспект является наиболее важной целью представленной работы.

1. Материалы и методы

Целью данного исследования является анализ случая формирования мощного конвективного шторма, образовавшегося в составе квазилинейной мезомасштабной конвективной системы 7 августа 2021 года над центральными областями ЕТР. При этом применялся комплексный подход к исследованию: первоначально производился анализ условий синоптического масштаба (как более общих условий формирования), а далее акцент исследования сместился на мезомасштаб с глубоким анализом диагностических данных. Необходимо заметить, что в качестве реконструкции термодинамических условий (неустойчивости, сдвига

ветра и других параметров) были использованы в т. ч. и модельные данные, в допущении соответствия (в определенной степени) их реальным условиям. На основе выходных данных модели производились расчет специальных индексов и оценка их информативности.

Далее рассмотрим подробнее виды данных, которые использовались в исследовании.

Для анализа на Европейской территории СНГ условий *синоптического масштаба* применялись карты (приземный фронтальный анализ) прогностических центров DWD (Германия), UKMO (Великобритания) и KNMI (Нидерланды). В качестве высотных карт использовались карты реанализа ECMWF ERA5 (в открытом доступе на ресурсе [https://meteologix.com/ru/reanalysis]), также использовались данные аэрологического зондирования в пункте Сухиничи (ближайшего к треку конвективного шторма, находившегося в максимальной стадии развития по диагностическим данным). Для анализа полей неустойчивости применялись данные реанализа GFS [Global Forecast Model data, https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/ gfs/] в виде карт, построенных с помощью ПО OpenGrads.

Мезомасштабный анализ производился с помощью:

1) данных сети доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С, размещенных на ресурсе [http://meteorad.ru/maps] (система отображения радарной информации ОРМ ЦАО – МЕТЕОРАД) с авторизированным доступом. Использовались карты метеоявлений и высоты верхней границы облачности;

2) данных геостационарного спутника Meteosat-10 о радиационной температуре на верхней границе облачности (инфракрасный канал IR10.8, 5-минутное временное разрешение), размещенных в свободном доступе на ресурсе [https://meteologix.com/ru/satellite];

3) данных о положении и полярности разрядов грозопеленгационной системы, развернутой на ЕТР, информация ФГБУ «НИЦ «Планета»;

4) данных мониторинга электрического поля атмосферы в пунктах наблюдения (г. Обнинск, высотная метеорологическая мачта высотой 310 м и станция «Вашутино», в 5 км к северо-западу от Обнинска), информация ФГБУ «НПО «Тайфун»;

5) Восстановленных температурно-влажностных и ветровых вертикальных профилей вблизи локализации шторма по данным реанализа модели GFS (с использованием средства визуализации RAOB).

2. Результаты исследований и их обсуждение

2.1. Анализ условий синоптического масштаба

7 августа 2021 года Европейская территория России находилась в обширном теплом секторе циклона с центром над Прибалтикой (рис. 1). Центр циклонического возмущения медленно смещался на северо-северо-восток, при этом отсутствие существенного продвижения в восточном

направлении обусловливалось наличием выраженного блокирующего гребня малоподвижного антициклона, протянувшегося от арктического побережья Европейской России на юг, вплоть до районов Поволжья. Холодный малоподвижный фронт располагался в районе восточной границы Белоруссии и центральных областей Украины. Температурный контраст на поверхности 850 гПа в зоне холодного фронта достигал 12 ºС/500 км (рис. 2). Теплый фронт располагался на северо-западе ЕТР и медленно смещался в северном направлении.

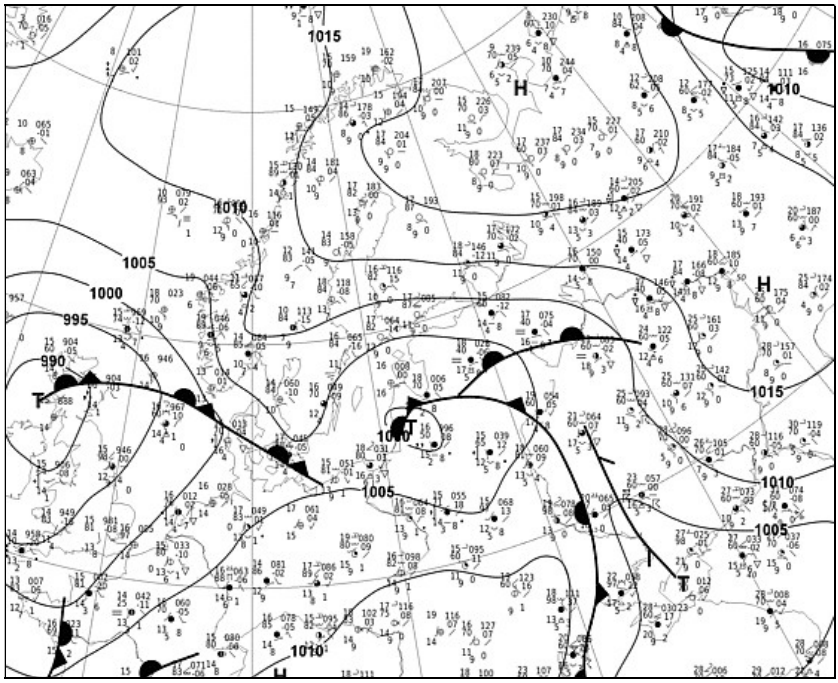


Рис. 1. Приземный анализ DWD (фрагмент) на 07.08.2021 г., 06 ч ВСВ (Т – центры низкого, Н – высокого давления).
Fig. 1. Surface analysis map by DWD (fragment) on 07.08.2021, 06 UTC (T – centers of low, H – high pressure).

На изобарической поверхности 500 гПа запад Европейской территории России находился в переходной зоне между высотными обширным гребнем, направленным от Прикаспия на север ЕТР, и ложбиной над Восточной Европой (рис. 2). В исследуемом регионе на поверхности 500 гПа преобладали потоки южного и юго-западного направления.

Через Правобережную Украину, восток Белоруссии, северо-запад ЕТР проходила ветвь (ориентированная с юга на север) струйного течения верхнего уровня (СТВУ). На поверхности 300 гПа максимальные скорости по оси струи доходили до 125 км/ч (рис. 2). Над территорией

северо-запада ЕТР скорость ветра СТВУ ослаблялась, здесь его ось резко разворачивалась на восток и располагалась далее в широтном направлении над северными районами ЕТР. Таким образом, расположение оси СТВУ фактически повторяло расположение основных фронтальных систем циклона, при этом она находилась немного позади холодного и впереди теплого фронтов.

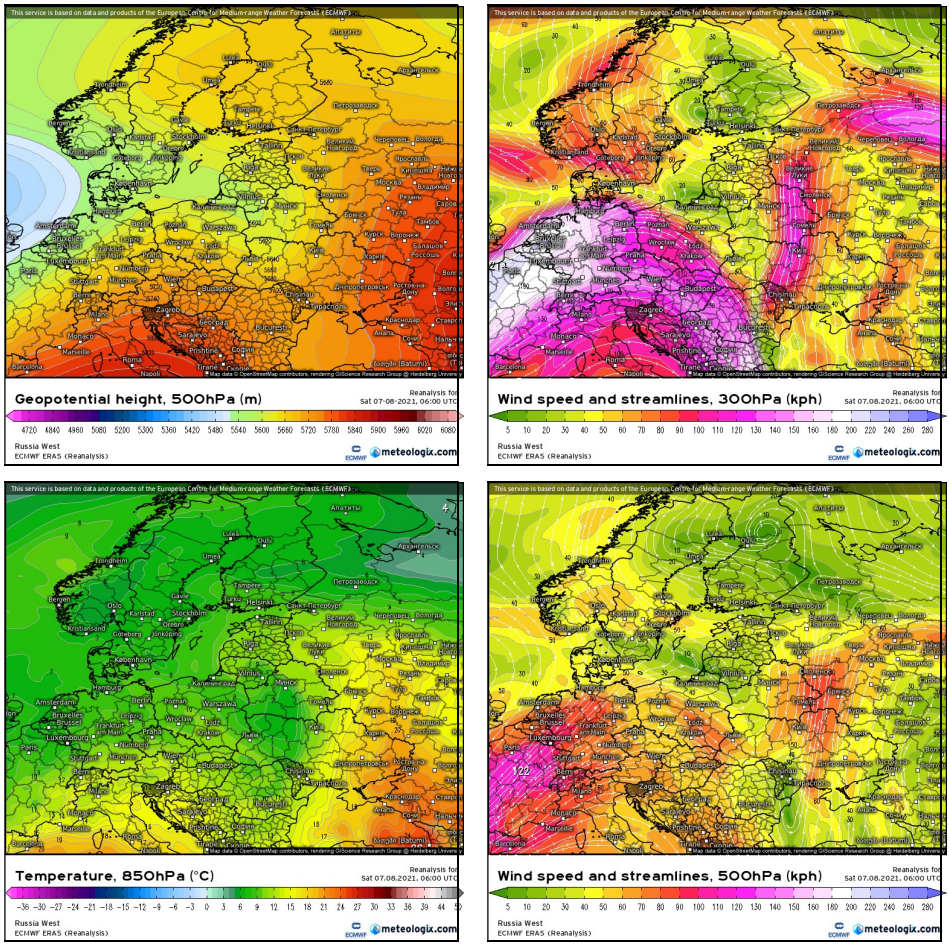


Рис. 2. Геопотенциальная высота 500 гПа (слева вверху); линии тока и скорость ветра (км/ч) на поверхности 300 гПа (справа вверху); температура на поверхности 850 гПа (слева внизу); линии тока и скорость ветра на 500 гПа (справа внизу). Реанализ ECMWF ERA5, 07.08.2021 г., 06 ч ВСВ.
Fig. 2. Geopotential height, 500 hPa (top left); streamlines and wind speed (km/h) at 300 hPa (top right); temperature at 850 hPa (bottom left); streamlines and wind speed at 500 hPa (bottom right). Reanalysis ECMWF ERA5, 07.08.2021, 06 UTC.

В пределах теплого сектора циклона, особенно вблизи зоны холодного фронта и немного к востоку от него, воздушная масса была стратифицирована неустойчиво. Зона умеренной неустойчивости (CAPE = 800–1500 Дж/кг, LI = -2…-3 ºС; критерии указаны на сайтах [http://meteoweb.ru/alter/conv.php, http://www.juergen-grieser.de]) к дневным часам 07.08.2021 г. располагалась на территории восточной Украины, а также Курской, Брянской, Орловской, Калужской и Московской областей России (рис. 3). Отметим, что известны случаи формирования интенсивных конвективных (в т. ч. суперъячейковых) структур и при умеренной неустойчивости, согласно рассчитанным CAPE и LI [9].

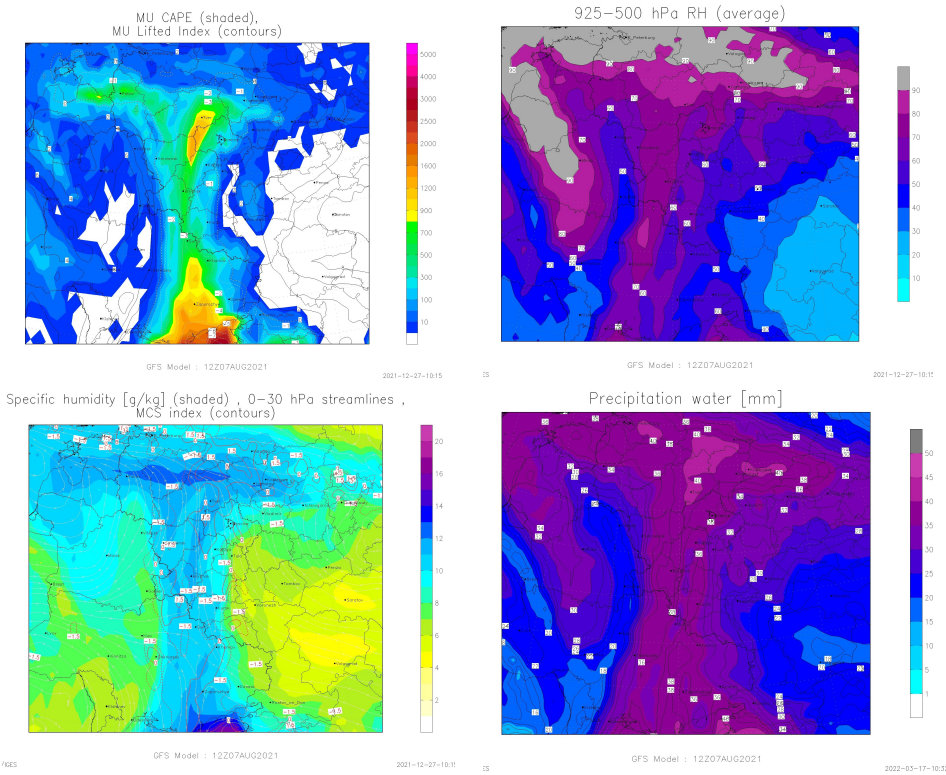


Рис. 3. Энергия неустойчивости CAPE, Дж/кг, и индекс плавучести LI, ºС (слева вверху); средняя влажность (RH) в слое 925-500 гПа, % (справа вверху); удельная влажность (SH) в приземном (0-30 гПа) слое, г/кг (слева внизу); общее влагосодержание по столбу тропосферы, доступное для образования осадков (PW), мм (слева внизу). Реанализ GFS, 07.08.2021 г., 12 ч ВСВ.

Fig. 3. Convective available potential energy CAPE, J/kg and Lifted index LI, ºC (top left); the average relative humidity (RH) on the 925-500 hPa layer, % (top right); Specific humidity (SH) on the surface (0-30 hPa) layer, g/kg (bottom left); Precipitation water (PW), mm (bottom right). Reanalysis GFS, 07.08.2021, 12 UTC.

Вместе с этим здесь же отмечалось (по данным реанализа) и достаточное для образования конвективных облачных систем влагосодержание воздушной массы (рис. 3), причем как в приземном слое и в слое облакообразования, так и во всем столбе тропосферы (SH = 10–13 г/кг, PW = 35–38 мм, RH (925–500 гПа) = 70–90 %; диапазоны значений отмечены на авторских картах, публикуемых на [http://meteoweb.ru/alter/conv.php]).

Необходимо отметить, что в исследуемом регионе наблюдались потенциально благоприятные условия для формирования мощной организованной конвекции исходя из анализа значений (по данным реанализа GFS) рассчитанных специальных комплексных индексов (рис. 4), таких как, например, широко известного индекса суперъячеек SCP (supercell composite parameter, [11]) или индекса мощных конвективных штормов SCS (severe convective storm index, описанного в [7]) с максимумами в западной части Московской области (SCP = 3, SCS = 4; критерии указаны в [7, http://meteoweb.ru/alter/conv.php, http://www.juergen-grieser.de]). Это говорит о возможном присутствии в исследуемом регионе сочетания таких важнейших факторов развития мощной конвекции, как сдвига ветра (по скорости и направлению) на фоне умеренной неустойчивости, завихренности и притока теплой влажной воздушной массы в нижних слоях тропосферы, конвергенции потоков в приземном слое и благоприятного для развития глубокой влажной конвекции температурно-влажностного профиля воздушной массы.

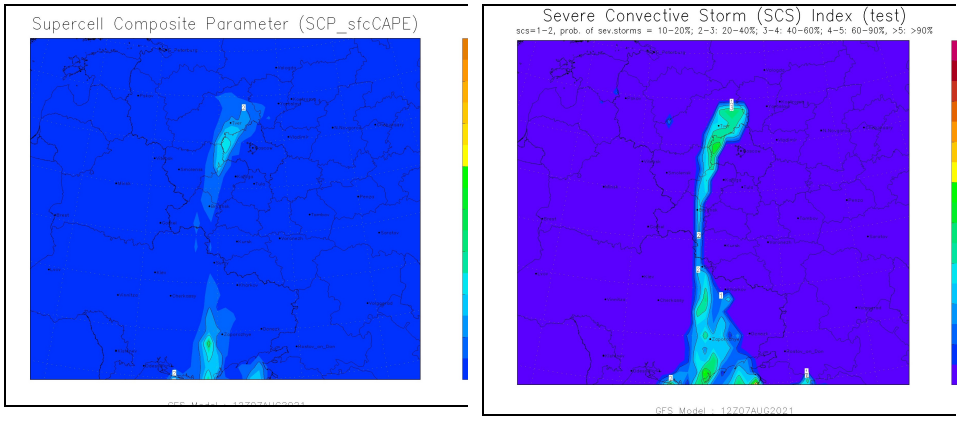


Рис. 4. Индекс суперъячеек SCP (слева) и индекс мощных конвективных штормов SCS (справа), реанализ GFS, 07.08.2021 г., 12 ч ВСВ.
Fig. 4. Supercell composite parameter SCP (left) and severe convective storm index SCS (right). Reanalysis GFS, 07.08.2021, 12 UTC.

По данным зондирования на аэрологической станции Сухиничи Калужской области в 12 ч ВСВ (рис. 5) отмечалась зона неустойчивости

примерно от высоты 1,5 до 7 км (ниже присутствовал задерживающий слой), высота тропопаузы составила 12,2 км, во всей толще тропосферы отмечались ветры южной четверти (с небольшим сдвигом по направлению на 25–35º вправо), при этом в слое от 1,9 до 9 км их средняя скорость составила около 20 м/с (что выше примерно в семь раз относительно скорости ветра у земли). Таким образом, адвекция теплого воздуха была выражена практически на всех уровнях тропосферы. Присутствовал существенный сдвиг ветра по скорости и относительно небольшой – по направлению в средней и верхней тропосфере относительно ветра у земной поверхности.

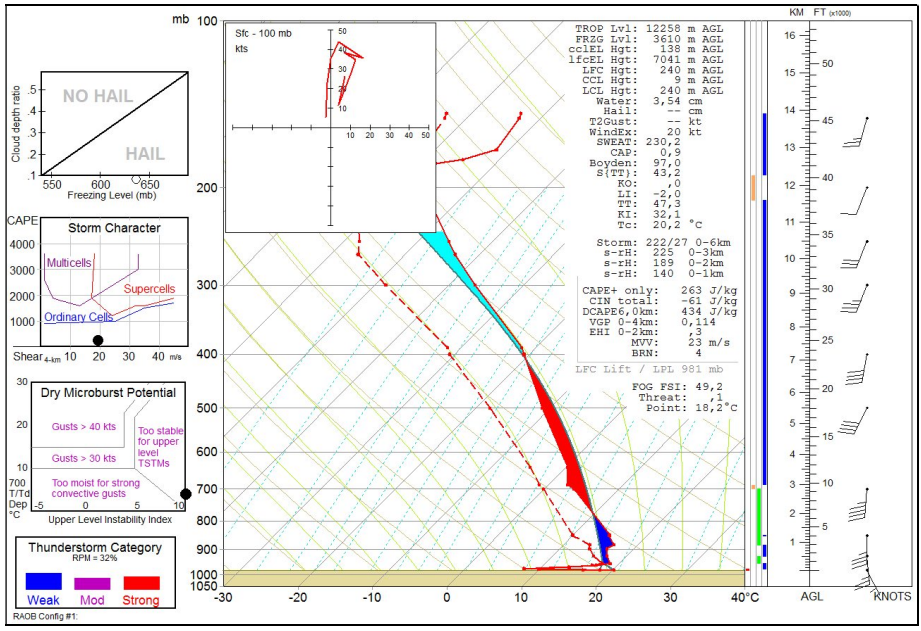


Рис. 5. Аэрологическая диаграмма (обработка – ПО RAOB), данные аэрологического зондирования, станция Сухиничи, 07.08.2021 г., 12 ч ВСВ.
Fig. 5. Skew-T diagram (processing by RAOB program), sounding data, Sukhinichi station, 07.08.2021, 12 UTC.

Наличие обширного теплого сектора с южными потоками (адвекция неустойчиво стратифицированных влажных воздушных масс из Азово-Черноморского региона), близость контрастного и малоподвижного холодного фронта создавали благоприятные условия для развития (к востоку от фронта, в теплом секторе циклона) линий неустойчивости, ориентированных параллельно линии фронта, на которых шло активное развитие конвективных штормов.

2.2. Мезомасштабный анализ

Очаги активной конвекции начали формироваться после 08 ч ВСВ в Курской области. Первоначально это были преимущественно изолированные очаги, местами объединенные в небольшие скопления (кластеры), двигающиеся по ведущему потоку с юга на север. Позже в 09 ч ВСВ северо-западное скопление, уже находившееся над территорией Орловской области, приобрело черты доминирующего в развитии (среди соседних) линейно-ориентированного скопления грозовых очагов (рис. 6).

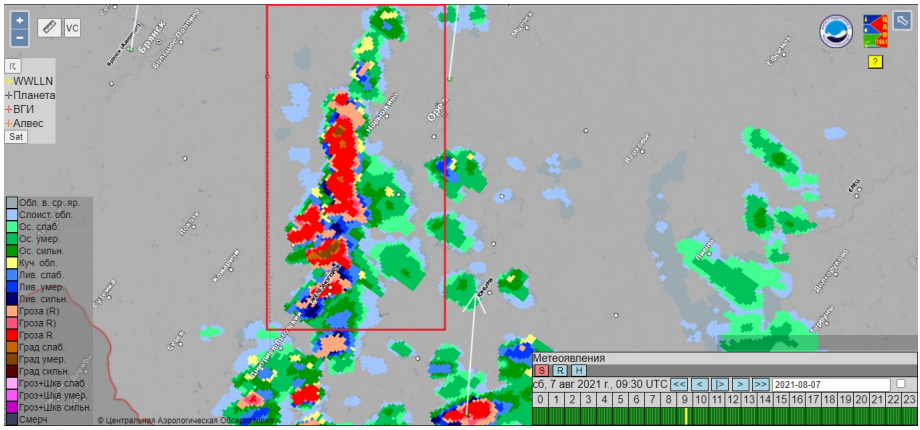


Рис. 6. Данные сети ДМРЛ-С, 07.08.2021 г., 09:30 UTC (режим отображения – метеоявления).
Fig. 6. DMRL-C radar network data, 07.08.2021, 09.30 UTC (Display mode: weather phenomena).

Примерно к 11.30–11.45 ч ВСВ по спутниковым данным (Meteosat-10, канал IR 10.8) над севером Калужской области сформировалась область выраженного конвективного шторма квазиэллиптической формы с низкой радиационной температурой (рис. 7), в пределах которой отчетливо выявлялась так называемая сигнатура *cold-U/cold-ring* [15, 17]: наличие U-образной / кольцеобразной области с относительно более холодной радиационной температурой на периферии шторма, опоясывающая область с относительно более высокой температурой во внутренней области (так называемого «внутреннего теплого пятна» – Central Warm Spot (CWS)). Данные сигнатуры исследованы для различных случаев мощных конвективных штормов (например, в [7, 9]), они указывают на вероятное присутствие мощных восходящих движений в пределах шторма и имеют достаточно уверенную корреляцию со случаями опасных конвективных явлений [7, 15]. Отметим, что сигнатура *cold-ring/cold-U* прослеживалась у шторма до 14.25 ч ВСВ, при этом его общая (квазиэллиптическая) форма мало менялась по спутниковым

изображениям в течение периода существования сигнатуры, что является косвенным признаком возможного *суперъячейкового* типа конвективного шторма.

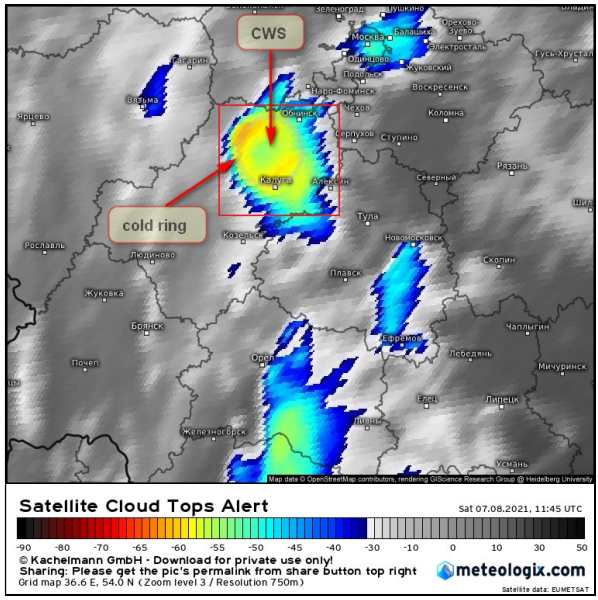


Рис. 7. Мощный конвективный шторм (выделен красным квадратом) с сигнатурами *cold-ring* и CWS по спутниковым данным Meteosat-10, IR 10.8, 07.08.2021 г., 11.45 ч ВСВ.
Fig. 7. Severe convective storm (highlighted by a red square) with *cold-ring* and CWS signatures on Meteosat-10 satellite data, 07.08.2021, 11:45 UTC.

По данным сети радиолокаторов ДМРЛ-С в это время в пределах области конвективного шторма, отмечаемого по спутниковым данным (рис. 7), прослеживалось развитие очага *сильного шквала* (по алгоритму распознавания метеоявлений, рис. 8) в пределах квазилинейной мезомасштабной конвективной системы. Высота верхней границы облачности в очаге превышала 15 км.

По анализу температурно-влажностного и ветрового профиля, построенного на основе данных реанализа GFS, для точки с координатами вблизи центра мощного конвективного шторма по данным ДМРЛ-С в 12.00 ч ВСВ (рис. 9) отмечалась выраженная неустойчиво-стратифицированная область (от высоты уровня конденсации до уровня тропопаузы: от 1,5 до 12 км), а также сдвиг ветра по скорости и направлению, по характеристикам примерно аналогичный описанному выше, по «реальным» аэрологическим данным станции Сухиничи (рис. 5), которая была расположена примерно на 85 км к юго-юго-западу от центра конвективного шторма.

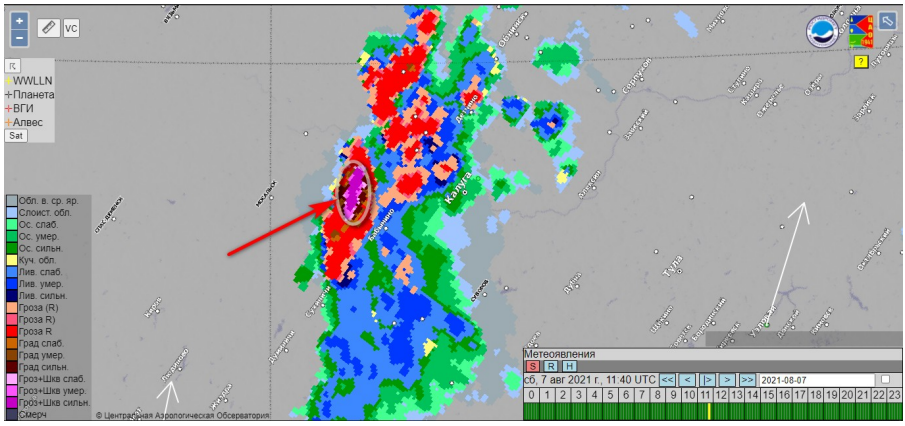


Рис. 8. Мощный конвективный шторм в пределах квазилинейной мезомасштабной конвективной системы по радарным данным. Зона наиболее активной конвекции (очаг «сильного шквала» по градации метеоявлений) показана красной стрелкой. Данные сети ДМРЛ-С, 07.08.2021 г., 11.40 ч ВСВ.
Fig. 8. Severe convective storm as a part of quasilinear mesoscale convective system on radar data. The zone of the most active convection (the "strong squall" cell by gradation of weather phenomena) is shown by the red arrow. DMRL-C radar network data, 07.08.2021, 11.40 UTC.

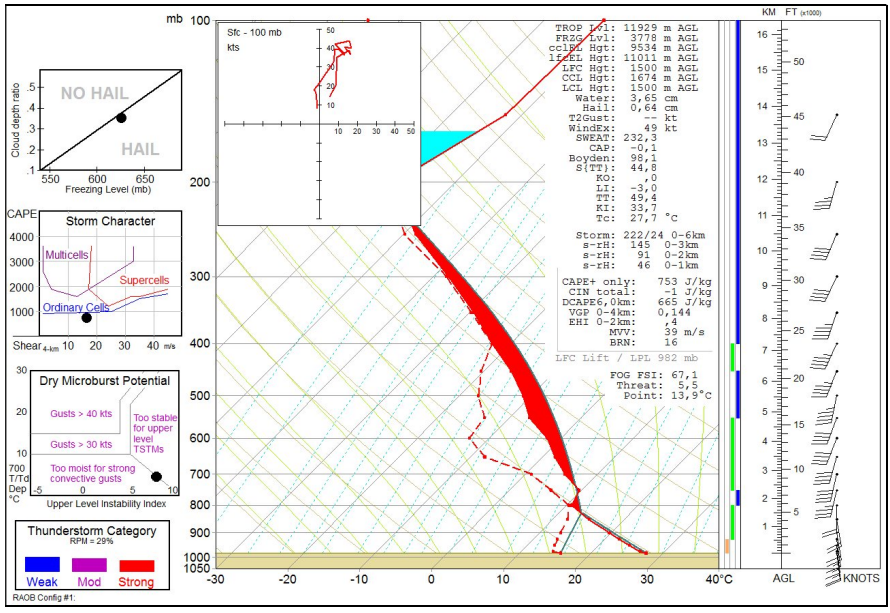


Рис. 9. Аэрологическая диаграмма (по данным реанализа GFS для точки с координатами 54,85º с. ш., 35,65º в. д.), 07.08.2021 г., 12.00 ч ВСВ.
Fig. 9. Skew-T diagram (by reanalysis GFS data for point with coordinates: 54.85 N., 35.65 E), 07.08.2021, 12.00 UTC.

В 13.30 ч ВСВ на территории Можайского района Московской области при прохождении анализируемого мощного конвективного шторма был зафиксирован очевидцами (и зарегистрирован в европейской базе данных ESWD [https://eswd.eu/]) сильный ветер, возможно, шквалистого характера (рис. 10). Так, в Бородинском поселении вырваны с корнем несколько огромных деревьев, пострадали ЛЭП, сорвана часть кровли с крыши. Также в СМИ были сообщения о сильных порывах ветра вместе с ливнем в самом городе Можайске [https://www.m24.ru/videos/proisshestviya/07082021/302686].

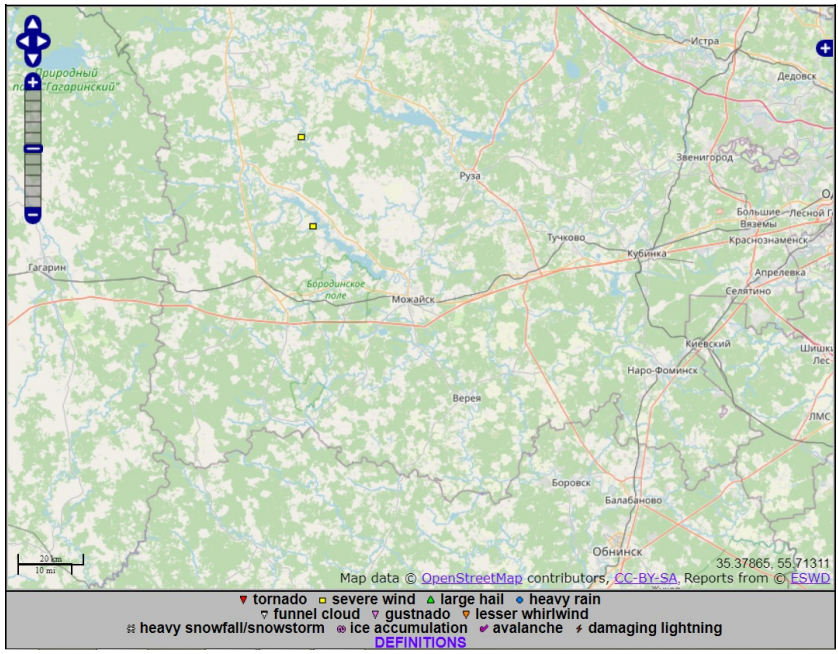


Рис. 10. Локализация зафиксированных случаев опасных явлений (сильный ветер) по западу Московской области (показано квадратами) из базы ESWD [21] за 07.08.2021 г.
Fig. 10. Localization of cases of dangerous phenomena (severe wind) fixed on the west of the Moscow region (shown by squares) from the ESWD [21] for 07.08.2021.

Для анализа грозовой активности выделялась область конвективного шторма, границы которой определялись по спутниковым данным по зоне значительного градиента радиационной температуры в канале IR 10,8 мкм (как показано на рис. 7, где красным прямоугольником выделена область шторма). Для таких пространственных областей из базы данных грозопеленгации НИЦ «Планета» выбирались данные о положении и полярности молниевых разрядов (а также их количестве – отдельно для положительных и отрицательных разрядов) для всех 5-минутных

интервалов, предшествующих сроку соответствующего спутникового снимка, на котором был выделен шторм. Данные также сопоставлялись с минимальными значениями радиационной температуры в канале IR 10,8 мкм спутника Meteosat-10, максимальной высотой верхней границы облачности и типом метеоявлений – по данным сети ДМРЛ-С. При этом для метеоявлений выбиралась наиболее существенная (по умолчанию нижняя) градация по их рангу в шкале, с некоторым упрощением, например градации «гроза+шквал» (любой интенсивности) присваивалась градация «ШКВАЛ», аналогично «гроза+град» – «ГРАД» и т. п. Все виды перечисленных диагностических данных, полученных для трека конвективного шторма от его зарождения до распада (т. е. на всех стадиях жизненного цикла), представлены в графическом виде совместно на рис. 11.

Из комплексного анализа данных, представленных на рис. 11, можно сделать следующие выводы:

1. Рост грозовой активности (по данным о количестве молниевых вспышек) от начала зарождения шторма до стадии максимального развития хорошо коррелирует с ростом высоты верхней границы облачности и падением радиационной температуры.

2. Соотношение положительных и отрицательных разрядов в течение жизненного цикла исследуемого шторма было изменчиво, в зрелую стадию наблюдалось преобладание доли положительных разрядов, в стадии диссипации, наоборот, – доли отрицательных разрядов.

3. Наблюдался выраженный скачок общего числа разрядов в 11.25–11.30 ч ВСВ практически в 2 раза по сравнению с предыдущими значениями, в основном за счет положительных разрядов. Такого типа скачки (так называемая сигнатура *Lightning Jump – LJ*) описаны в [12, 16]. По результатам исследований известно, что они имеют связь с формированием опасных явлений. В это же время произошла смена градации по шкале метеоявлений (в данных ДМРЛ-С) с «ГРАДа» на «ШКВАЛ», т. е. произошло увеличение степени общего развития очага (рост отражаемости, повышение высоты ее максимальных значений и т. д.). К этому же времени по спутниковым данным сформировалась сигнатура *cold-U*, в дальнейшем она трансформировалась в кольцеобразную сигнатуру *cold-ring*, которая непрерывно наблюдалась в шторме до 14.05 ч ВСВ, а затем, еще 20 минут просуществовав, снова в U-образной форме.

Таким образом, сигнатура *cold-U/ring* наблюдалась в шторме в большей части периода его зрелой стадии, когда такие характеристики, как радиационная температура, высота верхней границы и радарная отражаемость (о значениях которой можно судить косвенно, по градациям явлений в алгоритмах распознавания по исходным данным ДМРЛ-С), достигали экстремальных значений. При этом заблаговременность (по отношению ко времени регистрации ОЯ) появления данной сигнатуры на спутниковых снимках составила 2 часа 10 минут.

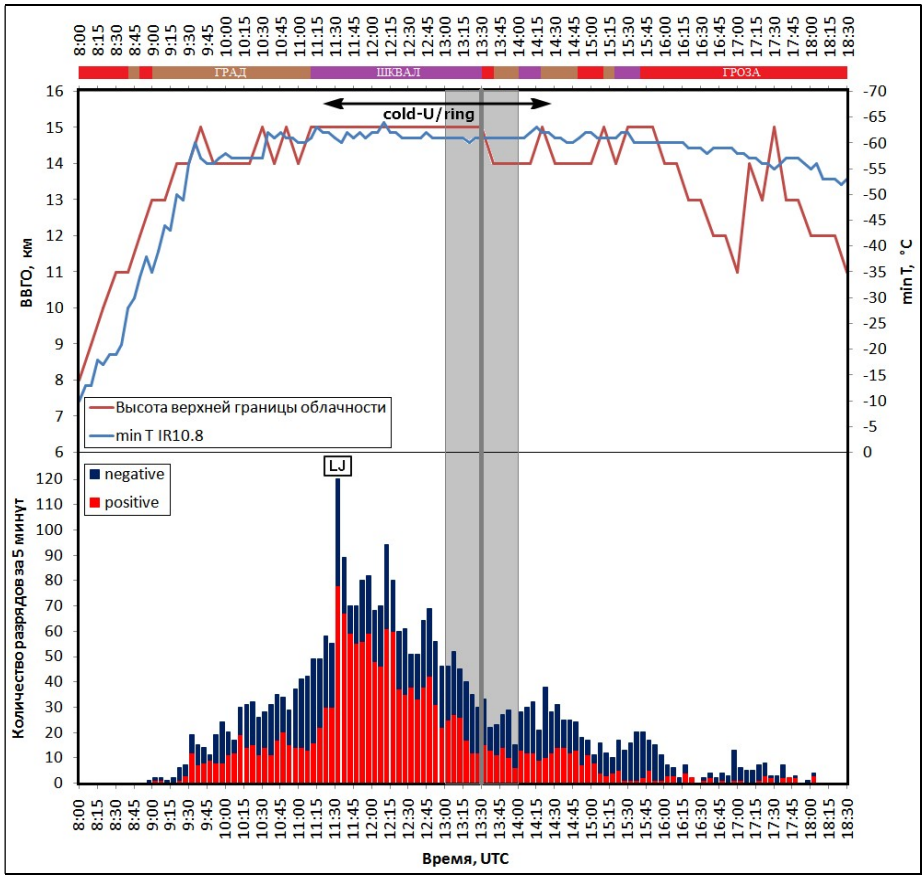


Рис. 11. Распределение молниевой активности по данным ГПС НИЦ «Планета»: количество разрядов за 5-минутные интервалы с указанием полярности. Отмечена сигнатура Lightning Jump – LJ; значения минимальной радиационной температуры (по данным канала IR 10.8 спутника MSG-3) и максимальной высоты (по данным ДМРЛ-С) верхней границы исследуемого шторма. Показаны градации метеоявлений по радарным данным, а также период с наблюдаемыми сигнатурами *cold U/ring* по спутниковым данным (вверху). Вертикальной линией отмечено время регистрации (13.30 +/- 30 мин исходя из характеристик сообщений базы данных ESWD) опасных явлений (сильный ветер) у земли.

Fig. 11. Distribution of lightning activity by of the SRC «Planeta» lightning detection network: the number of discharges for 5-minute intervals with indicating polarity. The Lightning Jump - LJ signature, the values of the minimum radiation temperature (by IR 10.8 MSG-3 data) and the maximum cloud height (by DMRL-C radar data) of the studied storm are shown. The gradations of weather phenomena by radar data, a period with the observed signatures of *cold-U/ring* by satellite data (at the top) are shown. The time of registration of dangerous phenomena (strong wind on 13:30 +/- 30 min UTC, based on the characteristics of ESWD messages) marked by the vertical line.

4. Отмечалось волнообразное распределение общего количества разрядов в течение жизненного цикла исследуемого шторма. Колебания общей молниевой активности были квазипериодическими (с периодом около 1 ч 20 мин – 1 ч 30 мин), при этом наблюдалась некоторая корреляция максимумов молниевой активности с радарными градациями метеоявлений (а значит, и с радарной отражаемостью: как общей, так и на определенных высотах исходя из алгоритмов определения метеоявлений по исходным радарным данным) и в меньшей степени – с высотой верхней границы облачности.

5. В зрелую стадию развития шторма, когда молниевая активность, высота и радиационная температура верхней границы облачности достигали экстремальных значений, наблюдалось преобладание градаций распознавания метеоявлений «ШКВАЛ» и «ГРАД» по данным ДМРЛ-С.

6. Зарегистрированные у земли ОЯ отмечались во время спада (после периода наивысшей молниевой активности) общего количества разрядов, около времени первого локального минимума активности, примерно через 2 часа после скачка LJ. При этом радарные характеристики предполагали вероятность опасных явлений, а по спутниковым данным в это время продолжала наблюдаться сигнатура *cold-ring*.

Представляет интерес также проанализировать пространственное распределение разрядов разной полярности в сопоставлении со спутниковыми сигнатурами и локализацией зафиксированных опасных явлений. Для визуализации положения спутниковых сигнатур вдоль трека шторма было решено использовать центры сигнатур, которые определялись приблизительно вблизи геометрического центра окружности (эллипса), линия которой соответствовала положению холодной кольцеобразной области сигнатуры (рис. 12). Для исключения ошибки пространственной локализации этих центров учитывался параллакс, характерный для геостационарных спутниковых данных (рис. 13), который в данном случае составил около 25 км (на широтах 55–56º при высоте верхней границы кучево-дождевой облачности 13–15 км [14]).

Для анализа пространственного распределения молниевых разрядов, геометрических центров сигнатур *cold-U/ring* и локализацией зарегистрированных ОЯ были построены карты, изображенные на рис. 14.

Из анализа пространственного распределения диагностических характеристик конвективного шторма (рис. 14) можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее плотное распределение разрядов отмечалось в период примерно от начала формирования сигнатуры *cold-U/ring* до времени регистрации ОЯ. Особенно это характерно для распределения положительных разрядов.

2. После времени регистрации ОЯ плотность (особенно положительных разрядов) существенно снижалась, но далее наблюдались менее выраженные локальные максимумы плотности, соответствующие

периодам увеличения общего количества разрядов, а также вариациям радарных и спутниковых параметров, отмеченных выше, при описании выявленных квазипериодических колебаний активности (см. выше п. 4 выводов к рис. 11).

3. Заметным является наличие двух параллельных друг другу треков повышенной плотности разрядов (как положительных, так и отрицательных) на большей части интервала с сигнатурой cold-U/ring. Причем центры сигнатур локализировались в промежутке низкой плотности разрядов, вытянутом между двумя параллельными треками повышенной плотности.

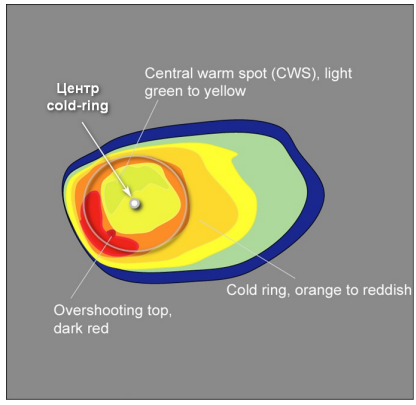


Рис. 12. Схематическое изображение сигнатуры *cold-ring* [15]. Показано примерное положение геометрического центра сигнатуры.
Fig. 12. The scheme of *cold-ring* signature [15]. The approximate position of the geometric center of signature is shown.

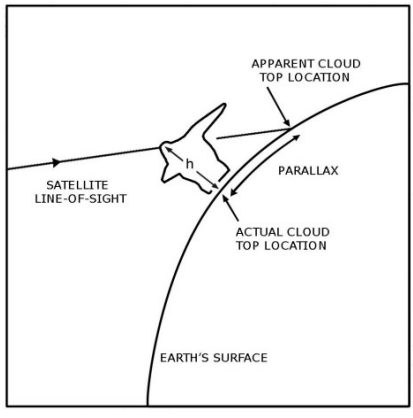
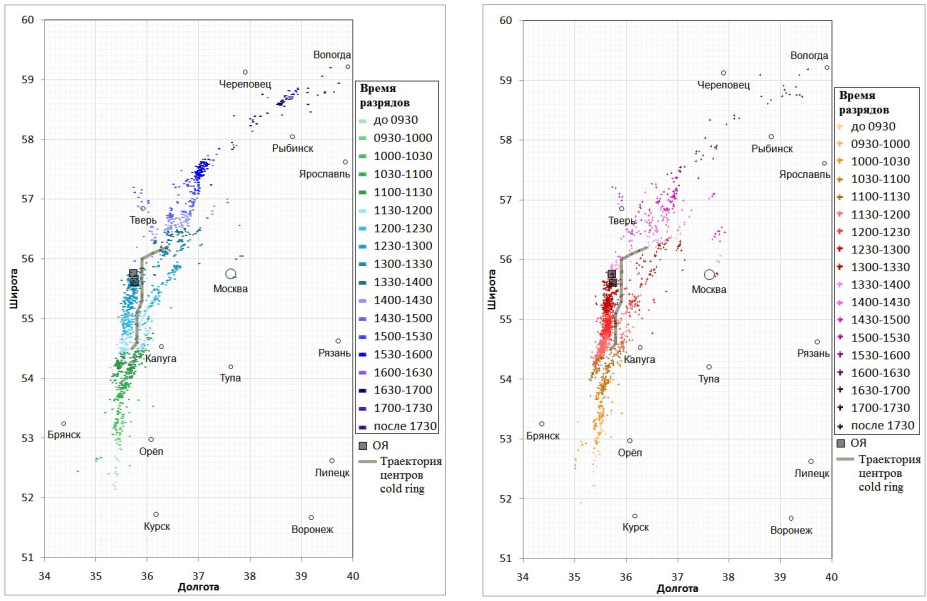


Рис. 13. Схематическое изображение параллакса для спутниковых изображений кучево-дождевой облачности [14].
Fig. 13. Parallax scheme for satellite images of the cumulonimbus clouds [14].



а) **б)**

Рис. 14. Распределение разрядов отрицательной (а) и положительной полярности (б) вдоль трека шторма с указанием временного интервала. Серой линией показан трек, соединяющий центры сигнатур cold-U/ring для всего временного интервала, когда сигнатуры наблюдались по спутниковым данным. Серыми квадратами показана локализация зарегистрированных ОЯ (ESWD).
Fig. 14. The distribution of the discharges of negative (a) and positive polarity (b) along the storm track indicating the time interval. The gray line shows the track connecting cold-U/ring signature centers for the entire time interval when the signatures were observed according to satellite data. Gray squares showing localization of registered dangerous phenomena (ESWD).

Для анализа вариаций электрического поля атмосферы (ЭПА) в относительной близости от траектории прохождения мощного конвективного шторма применялись данные флюксметров, разработанных в НПО «Тайфун» [1] и установленных на верхней площадке высотной метеомачты (ВММ) в г. Обнинске (высота 310 м) и на станции геофизического мониторинга «Вашутино» (Калужская обл., 5 км на северо-запад от Обнинска).

Технические характеристики флюксметра НПО «Тайфун» подтверждены в серии экспериментов по мониторингу вертикальной компоненты *Ez* напряженности ЭПА. Установлено, что достигнутый уровень чувствительности измерений *Ez* позволяет, в частности, регистрировать при некоторых условиях сигналы глобальных электромагнитных резонансов Шумана [2]. Флюксметр на станции «Вашутино» установлен

на мачте высотой 4 метра. Значения *Ez*, измеренные на мачте, более чем на порядок превышают значения, измеренные непосредственно у поверхности земли, и линейно зависят от высоты мачты [10].

На рис. 15 представлены графики временного хода *Ez* на верхней площадке ВММ и на станции «Вашутино» с 09.00 до 15.00 ч ВСВ 7 августа 2021 года с посекундным усреднением исходных данных флюксметров.

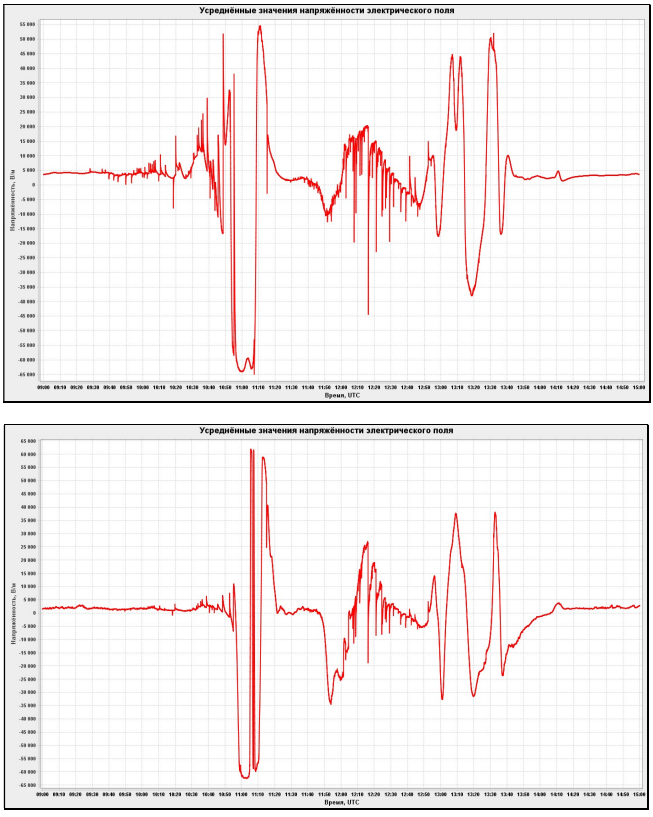


Рис. 15. Временной ход вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы: верхняя площадка ВММ (а); станция «Вашутино» (б). С 09.00 до 15.00 ч ВСВ 07.08.2021 г.
Fig. 15. The time variation of vertical atmospheric electric field: top platform of the Obninsk meteorological tower (a); station «Vashutino». From 09.00 to 15.00 UTC 07.08.2021.

Из сопоставления данных флюксметров с радарными данными (рис. 16) можно заключить о выявлении нескольких характерных периодов с особенностями временного хода вертикальной компоненты напряженности ЭПА в период прохождения конвективных систем различного рода вблизи или непосредственно над пунктами наблюдений:

1. В период с 09.30 до 10.30 ч ВСВ наблюдались слабые (с постепенным ростом амплитуды) импульсные возмущения вертикальной компоненты *Ez* напряженности ЭПА (рис. 15), связанные с приближением грозовых очагов к пунктам наблюдений (рис. 16, 10.00 ч).

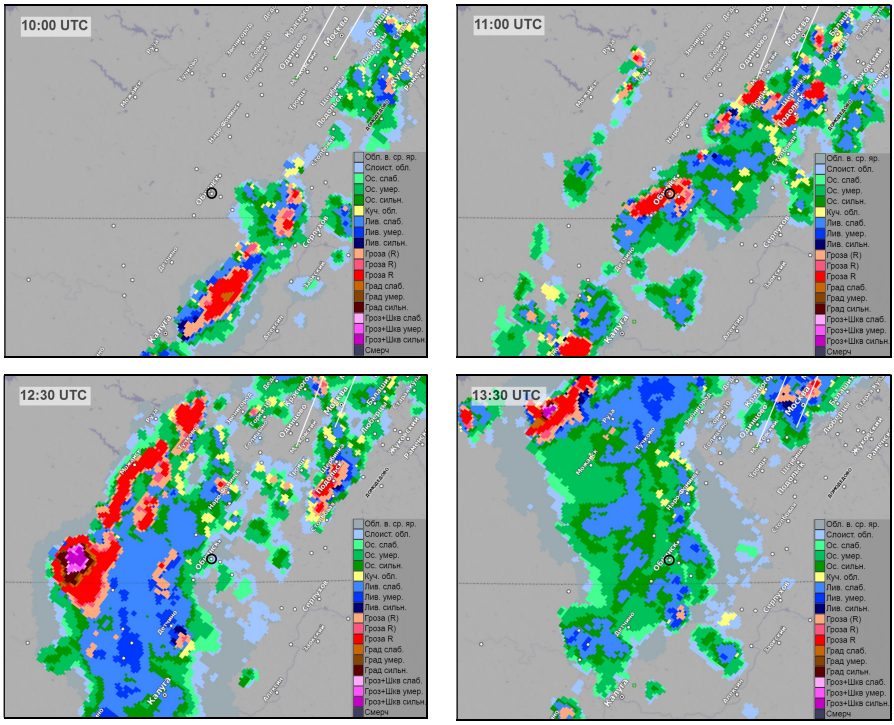


Рис. 16. Данные сети ДМРЛ-С (метеоявления) за 10.00, 11.00, 12.30 и 13.30 ч ВСВ (черным кружком в центре карт обозначен Обнинск).
Fig. 16. DMRL-C network data (weather phenomena mode) for 10.00, 11.00, 12.30 and 13.30 UTC (city Obninsk are shown by black circle in the center of maps).

2. Наиболее сильные возмущения *Ez* наблюдались примерно с 10.30 до 11.30 ч (рис. 15). Они связаны с прохождением непосредственно через пункты измерения *Ez* локальных грозовых очагов (не связанных с исследуемой в работе конвективной системой) (рис. 16, 11.00 ч).

3. В период с 11.30 до 13.00 ч в Обнинске и на станции «Вашутино» наблюдалось относительно более слабое возмущение временного хода *Ez* (рис. 15), связанного с близкой грозой на минимальном расстоянии примерно 10 км от Обнинска на фоне прохождения в относительной близости исследуемого в работе мощного конвективного шторма в составе квазилинейной мезомасштабной конвективной системы (рис. 16, 12.30 ч). Минимальное расстояние до наиболее выраженной зоны активной конвекции составило 50–60 км к западу от пунктов наблюдения.

4. Примерно с 13.00 до 14.00 ч наблюдалось низкочастотное (с периодом 10–20 минут) колебание средней амплитуды *Ez* (рис. 15), характерное для прохождения ливневой (не грозовой) кучево-дождевой облачности [6], в данном случае связанной с южной периферией мезомасштабной конвективной системы, проходящей в этот период непосредственно над пунктами наблюдений (рис. 16, 13.30 ч).

В остальные периоды (до 09.30 и после 14.00 ч) электрическое поле атмосферы было мало возмущенным (рис. 15).

Выводы

Комплексный анализ случая мощной конвекции, наблюдавшегося 7 августа 2021 года над территорией центральной части ЕТР, по различным видам данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Для развития мощной организованной конвекции наблюдались как благоприятные синоптические условия, так и определенные особенности распределения температурно-влажностных, ветровых и других характеристик, в т. ч. установленных по анализу значений специальных комплексных индексов. При сопоставлении поля значений этих индексов с областью формирования и треком исследуемого мощного шторма можно заключить об их достаточно высокой прогностической информативности.

2. Что касается классификации исследуемого мощного конвективного шторма, то исходя из анализа диагностических данных (наличие устойчивой области высокой отражаемости по радарным данным и малоизменчивой во времени квазиэллиптической формы шторма и характерных сигнатур по спутниковым данным, высокого количества и плотности распределения молниевых разрядов), а также наличия благоприятных синоптических, температурно-влажностных и ветровых условий, можно сделать предположение о формировании очага *суперъячейкового* типа (с вероятным наличием устойчивого вращающегося восходящего потока – мезоциклона) внутри квазилинейной мезомасштабной конвективной системы. Более достоверное суждение о классификации шторма как «затопленной» суперъячейки можно было бы сделать по детальному анализу доплеровских радарных параметров (что позволило бы идентифицировать наличие мезоциклона), которыми авторы, к сожалению, не располагали.

3. Одним из важных результатов исследования является анализ заблаговременности (по отношению к регистрации ОЯ) специальных сигнатур, имевших место у исследуемого шторма (таких как *cold-U/ring, lightning jump*), и часто связанных с формированием опасных явлений. Так, в данном исследовании установлено значение заблаговременности для данных сигнатур порядка 2 часов, что является важным фактом для разработки схем наукастинга ОЯ. При этом можно допустить потенциальную возможность формирования ОЯ (при отсутствии фактов их регистрации у земли по ряду объективных причин) в период сразу после

выявления сигнатур ввиду потенциальной мощности и устойчивости исследуемого шторма, опираясь на диагностические данные в этот временной период: максимальной ВВГО, минимальной радиационной температуры, градации опасности по радарным данным, плотности разрядов и др.

4. При пространственно-временном анализе данных грозопеленгации выявлен периодический характер общего количества и плотности разрядов (по анализируемому треку шторма), возможно связанный с периодами интенсификации мощных устойчивых конвективных движений долгоживущего мощного шторма. Представляет интерес выявление таких особенностей в будущих работах по анализу иных случаев мощной конвекции.

5. В работе дополнительно также проанализированы данные флюксметров (пункты размещения которых оказались в относительной близости от районов перемещения мезомасштабной конвективной системы) в сопоставлении с радарными данными и данными грозопеленгации. Выявлены характерные периоды с особенностями временного хода вертикальной компоненты *Ez* напряженности электрического поля атмосферы как отдельно для периода приближения или прохождения непосредственно над пунктами наблюдений грозовых и ливневых очагов, так и для периода прохождении на некотором расстоянии от пунктов наблюдений очагов мощной организованной конвекции, что позволяет предварительно заключить о возможном некотором значении таких данных для наукастинга конвективных и грозовых процессов. Данный вопрос также требует дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность ФГБУ НИЦ «Планета» за предоставление данных грозопеленгации и ФГБУ «ЦАО» за предоставление радарных данных.

The authors are grateful for the provision of lightning detection network data from the Scientific Research Center «Planeta» and radar data from the Central Aerological Observatory.

Список литературы

1. *Болдырев А.И., Вязилов А.Е., Иванов В.Н., Кемаев Р.В., Коровин В.Я., Меляшинский А.В., Памухин К.В., Памухина И.А., Панов В.Н., Швырёв Ю.Н.* Высокочувствительный флюксметр для регистрации вариаций напряженности электрического поля атмосферы Земли // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 123-132.

2. *Болдырев А.И., Вязилов А.Е., Иванов В.Н., Кемаев Р.В., Коровин В.Я., Меляшинский А.В., Памухин К.В., Панов В.Н., Швырёв Ю.Н.* Регистрация слабых УНЧ/КНЧ колебаний напряженности приземного электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 4. С. 535-544.

3. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В.* Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской территории России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 35-49.

4. *Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я. и др.* Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30-40.

5. *Прохареня М.И., Спрыгин А.А.* Применение метода комплексного диагноза и прогноза мощных конвективных структур над территорией Республики Беларусь для летнего периода 2018 года // Природные ресурсы. 2019. № 1. С. 96-107.

6. *Пустовалов К.Н., Нагорский П.М.* Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 647-653.

7. *Спрыгин А.А.* Параметры долгоживущих мощных конвективных структур на Европейской территории России и сопредельных территориях и возможности унификации их прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 21-47.

8. *Спрыгин А.А., Прохареня М.И.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 6-22.

9. *Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О.* Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 223-236.

10. *Chubb J.* The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters // Journal of Electrostatics. 2014. Vol. 72. P. 295-300.

11. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteor. 2006. Vol. 1 (3). P. 1-22, available at: http://www.ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/view/11/10

12. *Farnell C., Rigo T.* The Lightning Jump Algorithm for Nowcasting Convective Rainfall in Catalonia // Atmosphere. 2020. Vol. 11 (4), available at: https://doi.org/10.3390/atmos11040397

13. *Putsay M., Simon A., Szenyán I. et al*. Case study of the 20 May 2008 tornadic storm in Hungary – remote sensing features and NWP simulation // Atmos. Res. 2011. Vol. 100 (4). P. 657-679.

14. *Radová M., Seidl J.* Parallax applications when comparing radar and satellite data. The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, available at: https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p_s5_22_radova_p.pdf

15. *Setvák M., Lindsey D.T, Novák P. et al.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // Atmos. Res. 2010. Vol. 97 (1-2). P. 80-96.

16. *Schultz C., Petersen W., Carey L.* Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends // Weather and Forecasting. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 744-755.

17. Basics of operational monitoring and nowcasting of convective storms using satellite imagery. http://convectivestorm.blogspot.com.

References

1. *Boldyrev A.I., Vyazilov A.E., Ivanov V.N., Kemaev R.V., Korovin V.Y., Melyashinskiy A.V., Pamukhin K.V., Pamukhina I.A., Panov V.N., Shvyrev Y.N.* A highly sensitive field mill for registering weak and strong variations of the electric-field intensity of the Earth's atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 740-748. [in Russ.].

2. *Boldyrev A.I., Vyazilov A.E., Ivanov V.N., Kemaev R.V., Korovin V.Y., Melyashinskiy A.V., Pamukhin K.V., Panov V.N., Shvyrev Y.N.* Registration of weak ULF/ELF oscillations of the surface electric field strength. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016, vol. 56, no. 4, pp. 503-512. [in Russ.].

3. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Kostarev S.V., Bykov A.V.* Environments of formation of severe squalls and tornadoes causing large-scale windthrows in the forest zone of

European Russia and the Ural. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021, vol. 46, no. 2, pp. 83-93. [in Russ.].

4. *Novitskii M.A., Pavlyukov Y.B., Shmerlin B.Y. et al.* The tornado in Bashkortostan: the potential of analyzing and forecasting tornado-risk conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol.41, no. 10, pp. 683-690. [in Russ.].

5. *Proharenja M.I., Sprygin A.A.* Primenenie metoda kompleksnogo diagnoza i prognoza moshhnyh konvektivnyh struktur nad territoriej Respubliki Belarus' dlja letnego perioda 2018 goda [Application of the method of complex diagnosis and forecast of severe convective structures over the territory of the Republic of Belarus for the summer period of 2018]. *Prirodnye resursy* [Natural resources], 2019, no. 1, pp. 96-107. [in Russ.].

6. *Pustovalov K.N., Nagorskij P.M.* Osnovnye tipy variacij jelektricheskogo polja pri prohozhdenii kuchevo-dozhdevyh oblakov razlichnogo genezisa [The main types of electric field variations during the passage of cumulonimbus clouds of various genesis]. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2016, vol. 29, no. 8, pp. 647-653. [in Russ.].

7. *Sprygin A.A.* Parametry dolgozhivushhih moshhnyh konvektivnyh struktur na Evropejskoj territorii Rossii i sopredel'nyh territorijah i vozmozhnosti unifikacii ih prognoza [Parameters of long-lived severe convective structures in the European territory of Russia and adjacent territories and the possibility of unifying their forecast]. *Gidrometeorologicheskie issledovanija i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2020, vol. 375, no. 1, pp. 21-47. [in Russ.].

8. *Sprygin A.A., Proharenja M.I.* Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovanija i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, no. 3 (369), pp. 6-22. [in Russ.].

9. *Shihov A.N., Chernokul'skij A.V., Sprygin A.A., Azhigov I.O.* Identification of mesoscale convective cloud systems with tornadoes using satellite data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2019, vol. 16, no. 1, pp. 223-236. [in Russ.].

10. *Chubb J.* The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters. *Journal of Electrostatics*. 2014, vol. 72, pp. 295-300.

11. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.* 2006, vol. 1 (3), pp. 1-22, available at: http://www.ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/view/11/10.

12. *Farnell C., Rigo T.* The Lightning Jump Algorithm for Nowcasting Convective Rainfall in Catalonia. *Atmosphere.* 2020, vol. 11 (4), available at: https://doi.org/10.3390/atmos11040397.

13. *Putsay M., Simon A., Szenyán I. et al*. Case study of the 20 May 2008 tornadic storm in Hungary – remote sensing features and NWP simulation. *Atmos. Res.* 2011, vol. 100, no. 4. pp. 657–679.

14. *Radová M., Seidl J.* Parallax applications when comparing radar and satellite data. The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Available at: https://www-cdn.eumetsat.int/ files/2020-04/pdf_conf_p_s5_22_radova_p.pdf

15. *Setvák M., Lindsey D.T, Novák P. et al.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Atmos. Res.* 2010, vol. 97, no. 1-2, pp. 80–96.

16. *Schultz C., Petersen W., Carey L.* Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. *Weather and Forecasting*. 2011, vol. 26, no. 5. pp. 744-755.

17. Basics of operational monitoring and nowcasting of convective storms using satellite imagery. Available at http://convectivestorm.blogspot.com

Поступила 31.03.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 31.03.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116
УДК 504.453

Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований

Н.А. Варенцова [1,2], М.Б. Киреева [2], М.А. Харламов [2], М.И. Варенцов [3], Н.Л. Фролова [2], Е.С. Повалишникова [2]

[1] Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Москва, Россия;
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
[3] Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
kireeva_mb@mail.ru

Представлен обзор работ, посвященных формированию стока рек. Проведена типизация факторов формирования весеннего половодья. Выделены группы прямых и косвенных, динамических и квазипостоянных, а также антропогенных факторов. Построена сводная схема факторов формирования половодья с учетом особенностей их влияния на водный сток, проанализирована роль каждого значимого фактора в формировании весеннего половодья, приведены их количественные оценки. Выдвинута гипотеза, что к настоящему времени представление о главенствующей роли приходных составляющих в формировании стока весеннего половодья во многом утратило актуальность. Рассмотрены современные подходы к расчету основных факторов формирования стока весеннего половодья.

Ключевые слова: весеннее половодье, изменение климата, снежный покров, водный эквивалент, влажность почвы, глубина промерзания

Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. I. Review of previous studies

N.A. Varentsova [1,2], M.B. Kireeva [2], M.A. Kharlamov [2], M.И. Varentsov [3], N.L. Frolova [2], E.S. Povalishnikova [2]

[1] Central Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Moscow, Russia;
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
[3] Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
kireeva_mb@mail.ru

The review of the papers dealing with the river runoff formation is presented. The factors of the spring flood formation are typified. The groups of direct and indirect, dynamic and quasi-permanent, as well as anthropogenic factors are distinguished.

The authors constructed a summary scheme of the spring flood formation factors, taking into account the peculiarities of their influence on water runoff, analyzed the role of each significant factor in the formation of spring floods, and presented their quantitative estimates. It was hypothesized that the concept of the dominant role of incoming components in the spring flood runoff formation has currently lost its relevance. Modern approaches to the calculation of the main factors of the spring flood runoff formation are considered.

Keywords: spring flood, climate change, snowpack, water equivalent, snow cover, soil moisture, freezing depth

Введение

Весеннее половодье в пределах Европейской территории России (ЕТР) – одна из важнейших фаз водного режима, во время которой формируется от 70 до 90 % годового стока [2, 43, 52]. Актуальность его изучения связана с наводнениями в этот период года, сопровождающимися значительным ущербом [54]. Часты случаи затопления населенных пунктов и линейных объектов (дороги, мосты, опоры ЛЭП и др.), повреждения сооружений как ледяными полями, корчеходом, так и самим водным потоком. Еще одна угроза, набирающая актуальность в последние десятилетия, – низкий сток в течение половодья (до 40 % от годового стока), влияющий на формирование маловодья в остальную часть года. Значительный объем стока за период половодья рассматривался как достаточный источник водных ресурсов на протяжении всего водохозяйственного года. Однако с изменением климата увеличилась повторяемость развития как единичных случаев, так и серий лет с маловодными веснами.

Большое значение для населения и экономики по-прежнему имеет регулирование стока. В пределах ЕТР и по сей день действуют схемы, опирающиеся на зимнюю сработку водохранилищ и наполнение их полезного объема весной. Но все чаще отмечаются маловодные весны, которые приводят к нарушению обеспечения населения и объектов экономики водой. Или же формируются весны с поздним выпадением большого количества осадков, что вынуждает формировать залповые сбросы, повышая общественные и экономические риски.

Только за последние 30 лет число опасных гидрологических явлений выросло почти в три раза [18]. Практически вся южная и центральная части ЕТР по наводнениям относятся к районам средней и высокой степени опасности, низкая и незначительная опасность фиксируется лишь для бассейнов Северной Двины ниже Котласа, Мезени и Печоры [21]. Отметим, что в случае маловодий пространственное распределение рисков и уязвимости объектов экономической инфраструктуры аналогично.

Изучение современных факторов формирования стока (далее – ФФС) и совершенствование методов прогнозирования половодья позволит уменьшить риск возникновения опасных гидрологических явлений. Большинство существующих методик разрабатывались и апробировались

на периодах, предшествовавших наблюдаемому изменению климата. Отсутствие синхронности и синфазности изменений со статистической точки зрения привели к нарушению устойчивости прогнозных уравнений в бассейнах Дона, Оки и Волги [10], а в 2000-х гг. существенные поправки приходилось вводить и для рек севера ЕТР.

Первая часть представленной работы посвящена обзору научных исследований, посвященных анализу факторов формирования весеннего половодья на реках ЕТР и используемым методам гидрологических прогнозов в XX–XXI веке.

Материалы и методы исследования

Изучение литературных источников основывалось на их временной классификации и различиях в подходах советской и зарубежной гидрологической школы. В первой части обзора проведена схематическая классификация факторов формирования стока половодья на основе имеющихся представлений. Затем согласно предложенной классификации давалась оценка влияния изменений климата на каждый отдельный фактор на основе исследований, проведенных на Русской равнине.

Представления о формировании стока половодья в XX веке

Половодье – сложный многофакторный процесс. В значительной степени на формирование весеннего половодья оказывают влияние условия предшествующего осеннего периода, хотя для ряда регионов доказана также значимость влияния условий летнего периода, а также половодья предшествующего года [13, 41].

В России вопросами влияния различных факторов на формирование весеннего половодья начали заниматься еще на рубеже XIX–XX вв. Г. Тарловский, Ю.В. Ланге, Р.П. Спарро, Е.А. Гейнц и Д.И. Кочерин. Основным же толчком к развитию данного направления стало экстремально высокое половодье 1908 года в бассейне Волги. В сущности, именно в работах Е.А. Гейнца и Д.И. Кочерина впервые были определены основные факторы формирования стока, которые далее на протяжении века рассматривались советскими и российскими гидрологами. Было установлено, что характеристики половодья (объем, максимальный расход воды, форма гидрографа, интенсивность роста) зависят от количества влаги, поступившей на водосбор и условий ее трансформации к замыкающему створу русла.

При детальном рассмотрении формирования стока половодья перечень влияющих на него факторов значительно расширяется (рис. 1). По роли в водном балансе ФФС половодья делят на приходные и расходные, по типу воздействия – на прямые и косвенные, по времени воздействия – на квазипостоянные и динамические.

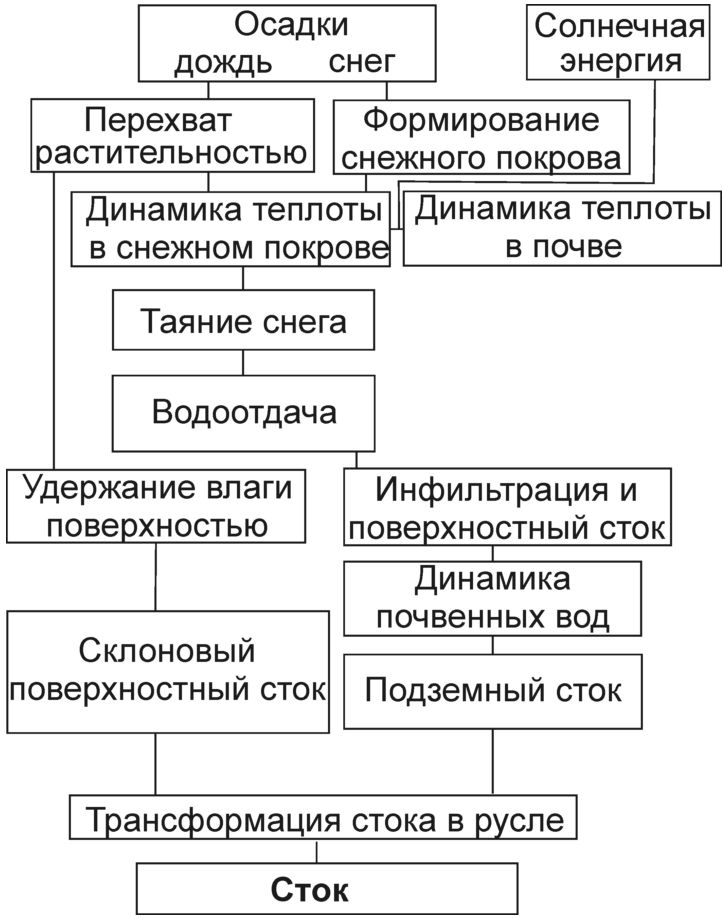


Рис. 1. Общие представления о факторах формирования стока половодья (по опубликованным работам в XX в.).
Fig. 1. General ideas about the factors of flood runoff formation (according to published works in the 20th century).

К ***приходным факторам*** половодья относят генетически разные составляющие стока – талые, дождевые и подземные воды. Доля талого стока напрямую зависит от запасов воды в снежном покрове на водосборе. Доля дождевых вод отличается большой пространственно-временной изменчивостью. Ее значимость прямо пропорциональна величине снегозапасов: с юга на север Европейской территории России доля дождевого стока возрастает с 10 % в бассейне Среднего и Нижнего Дона до 40–50 % в бассейне рек Северной Двины и Печоры. Доля подземного стока в объеме половодья определяется гидрогеологическими условиями, но редко превышает 5–10 % от суммарного стока [43]. ***Расходные факторы*** – это факторы, определяющие потери стока: испарение, поверхностное

задержание и пополнение влаги в толще почвогрунтов (включая потери стока на увлажнение зоны аэрации, пополнение запасов подземных и грунтовых вод).

Прямые факторы связаны с общим запасом влаги на водосборе, в том числе с запасом воды в снеге, ледяной корке и в почвогрунтах, с осадками в период снеготаяния. ***Косвенные факторы*** привлекаются при невозможности прямых измерений или низкой репрезентативности результатов контактных измерений при их экстраполяции. Наиболее часто они применяются для оценки впитывающей способности водосбора, дружности весны и влияния большинства квазипостоянных факторов: типов почвы и растительности, рельефа и т. д. [15, 19, 50].

Отдельного внимания заслуживает впитывающая способность водосбора. На протяжении всей истории ее описывали исключительно косвенными характеристиками – влажностью и глубиной промерзания почвы [13, 46]. Эти ФФС не являются стокоформирующими: различные их сочетания могут приводить к совершенно противоположным эффектам. По этой причине в рамках данной работы предлагается их классифицировать как ***перераспределяющие факторы***.

Изменчивость стока определяется ***динамическими*** факторами – характеристиками метеорологического, гидрологического и гидрогеологического режимов. Здесь ***квазипостоянными*** выступают факторы подстилающей поверхности, которые в масштабах десятилетий редко претерпевают значимые изменения (размеры и форма речного водосбора, геология, почвы и почвогрунты, растительность, рельеф и фильтрационный режим территории, естественные аккумуляторы стока и источники дополнительного питания). Они определяют пространственное перераспределение выпадающих осадков, задержание талых вод на поверхности и в толще водосбора, испарение и время добегания склонового и руслового стока [5, 42]. Примечательно, что в [38] к свойствам подстилающей поверхности уже относят динамические (влажность и глубина промерзания почвы) и квазипостоянные факторы (плотность почвы, ее механический состав, почвенно-гидрологические константы, рельеф, залесенность, заболоченность, виды землепользования и др.).

Особое место в структуре формирования стока принадлежит ***антропогенным факторам***. Среди наиболее ярких примеров – изъятие вод на сельскохозяйственные, промышленные нужды, коммунальное водоснабжение, гидроэнергетику и речной транспорт, преобразование поверхности водосбора или активные воздействия на факторы формирования стока. Каждый вид хозяйственной деятельности влияет на изменение внутригодовой неравномерности стока, его объема, коэффициента стока отдельно взятых фаз водного режима, величины подземного стока и скорости добегания.

Вышеупомянутые ФФС могут быть описаны качественными и количественными характеристиками, что позволяет проанализировать

их влияние на весеннее половодье. На набор изучаемых параметров всегда влиял выбор метода исследований: физико-математического, воднобалансового или статистического. В основу ***физико-математического подхода*** заложены общие представления о том, что каждый процесс на речном водосборе можно описать уравнением, основанном на теоретических физико-математических или экспериментально-эмпирических выводах. Большинство полученных в XX в. выводов легли в основу современных гидрологических моделей. К настоящему времени значительные достижения в моделировании стока имеют научные группы под руководством Д.А. Буракова, Ю.Б. Виноградова, Б.И. Гарцмана, А.Н. Гельфана, Е.М. Гусева, С.А. Кондратьева, В.И. Корня, Л.С. Кучмента, Ю.Г. Мотовилова и др. Методы физико-математического моделирования применяются чаще для изучения и прогнозирования самого стока, но не его факторов.

К недостаткам физико-математического подхода относится трудоемкость его реализации. В некоторых случаях можно говорить и о невозможности применения математического моделирования в рамках отдельного речного бассейна или о превышении итоговой ошибки над ошибкой статистических и воднобалансовых методов.

Частным случаем физико-математического подхода является представление о речном водосборе как о системе с неравномерным распределением емкости и переменной инфильтрационной способностью. В основе его подхода лежат интегральные полуэмпирические уравнения емкостного и инфильтрационно-емкостного типов водопоглощения, которые стали основой физико-статистических методов прогнозирования. Данный тип методов лег в основу прогнозов притока воды к Цимлянскому водохранилищу и потерь талых вод в левобережной части Нижнего Дона [8, 13]. Но для рек севера ЕТР и заболоченных территорий неучет испарения приводит к большим ошибкам [7].

Важно отметить, что подобные уравнения хорошо работают только при условии задания точного объема водоподачи на водосбор. Не решен вопрос границ зон сильного и слабого промерзания почвы. Перечисленные проблемы в условиях низкой плотности существующей наблюдательной сети не позволяют использовать этот подход как основной.

Предельным случаем упрощения физико-математического подхода можно назвать ***воднобалансовый***. Согласно [30, 46], метод применим исключительно для водосборов лесной зоны избыточного увлажнения – Верхней Волги, Западной Двины, Верхней Вятки. В этих условиях водопоглотительная способность речных бассейнов определяется емкостью зоны аэрации, фильтрацией в грунтовые воды и испарением. Воднобалансовый подход физически обоснован, однако отсутствие простых и надежных схем определения потерь для любого речного водосбора в любых ландшафтных условиях накладывает ограничения на его использование.

В отличие от двух предыдущих ***статистический подход*** основан полностью на эмпирических зависимостях. Он приобрел распространенность за счет низкой плотности наблюдательной сети, сложности организации наблюдений, а также потребности экстраполяции полученных результатов на неизученные речные водосборы.

Физически обоснованные статистические зависимости активно использовались для изучения факторов формирования и прогноза весеннего стока рек севера Восточно-Европейской равнины на протяжении всего XX века. А их результаты и выводы часто ложились в основу методик оперативного прогнозирования характеристик половодья. В настоящее время одной из ветвей статистического подхода в гидрологии стало применение машинного обучения [55–57].

В рамках статистического подхода велся постоянный поиск факторов формирования стока и их комбинаций, максимально точно описывающих процесс в рамках заданных условий, но проводился он по крайне ограниченному перечню показателей:

– запасу воды в снежном покрове и неравномерности его залегания по площади водосбора;
– ледяной корке;
– дополнительным осадкам;
– глубине промерзания и влажности почвы.

От исследования к исследованию, в зависимости от природной и ландшафтной зоны ФФС конкретизировались с учетом рассматриваемого периода, но общий вид зависимости чаще всего оставался неизменным. Установленный набор факторов вытекал из уравнения водного баланса речного бассейна в период развития весеннего половодья (рис. 2).

Запас воды в снежном покрове – безусловно, наиболее значимый фактор формирования стока весеннего половодья. Весь снег, накапливающийся на речном водосборе, участвует в формировании стока половодья. Формирование пика половодья происходит в основном за счет снегозапасов в полях и овражно-балочной сети, а объема половодья – за счет лесных запасов и подповерхностного и грунтового стока.

Среднее многолетнее значение максимального запаса воды в снежном покрове в пределах Европейской территории России в середине XX в. варьировало от 30–40 мм в низовьях Дона и Приазовье до 160–180 мм в верховьях Печоры, Вычегды и Камы. При этом в лиственных и смешанных лесах запас воды в снеге обычно на 10–20 % превышал полевой, в хвойных лесах – на 10–15 %. В районах с частыми оттепелями эта разница могла достигать 30 % и более [11, 24, 42, 45, 46]. Зачастую запасы воды в снеге на залесенных участках оценивались путем умножения на фиксированный коэффициент, поскольку снегомерные маршруты в лесах были редки, а надежность их результатов на протяжении всего XX в. вызывала сомнения. Наглядным примером можно назвать значимые расхождения максимальных снегозапасов и стока половодья на севере Европейской территории России [48, 53].

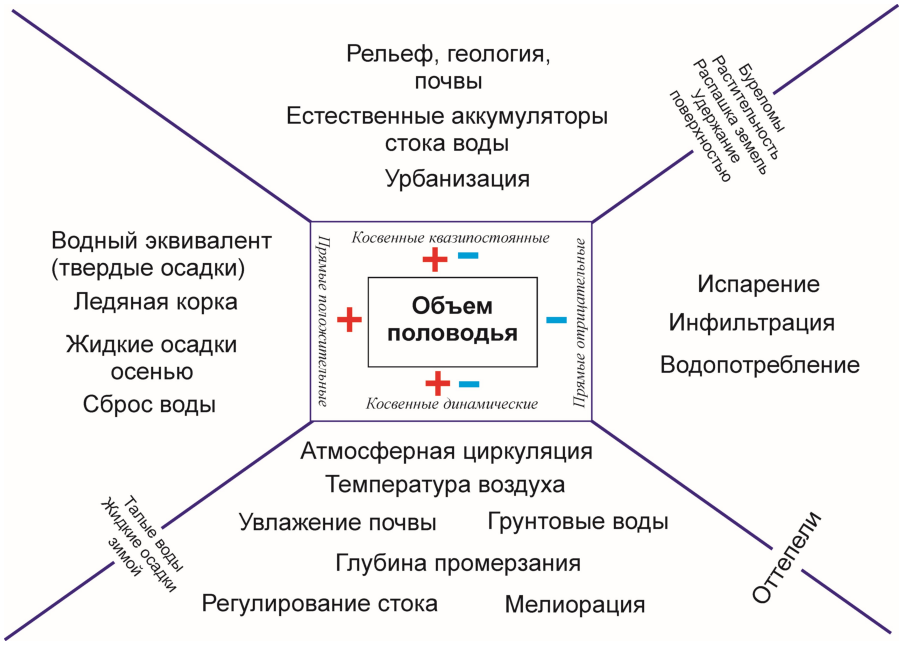


Рис. 2. Схема факторов формирования половодья, составленная авторами по обзору литературы.
Fig. 2. Scheme of flood formation factors compiled by the authors based on a literature review.

Изменчивость снегозапасов в пределах обширных территорий определялась в том числе факторами подстилающей поверхности. В зимний период значительно влияние рельефа: в ряде работ указывается на ярко выраженную линейную зависимость максимальных снегозапасов от высоты и экспозиции местности. Например, в лесостепной зоне ЕТР градиент изменения максимальных снегозапасов по высоте в среднем равен 40 мм на 100 м высоты, а экспозиция склона определяет продолжительность залегания снежного покрова [36].

Влияние расчлененности территории характеризуется коэффициентом снегонакопления [15, 29, 36, 42]. На примере Дона показано, что его наибольшие значения (до 10–20) присущи узким оврагам и балкам, особенно если в верхней части склоны более пологие, чем в нижней, и расположены перпендикулярно преобладающему направлению зимних ветров. Максимальных значений эта величина достигает в малоснежные зимы, когда за счет снега овражно-балочной сети почти полностью формируется весеннее половодье [13].

Важно, что густота овражно-балочной сети и первичных звеньев русловой сети в масштабах десятилетий претерпевают изменения. В современных условиях этот фактор перестает быть квазипостоянным.

Наиболее существенные изменения за последние два века отмечены в пределах степной и лесостепной зон ЕТР – в ареалах наибольшей антропогенной нагрузки. Сокращение первичного звена русловой сети привело к росту потерь стока на испарение и инфильтрацию, сокращению скорости добегания талого стока [1, 22, 25]. В то же время некоторые работы указывают на перспективы возобновления роста овражно-балочной сети в первой половине XXI в. [12].

Начиная с 1937 г. внимание уделялось интенсивности снеготаяния. Низкая интенсивность таяния оценивалась в 5–6, средняя – 8–12, высокая – более 15–17 мм/сутки. Предельные ее значения на открытой местности принимались в размере 25–30, при проталинах – до 60 мм/сутки. В хвойном лесу интенсивность таяния оценивалась в размере до 10–12, но редко превышала 20 мм/сутки. Однозначного представления о значимости этого фактора не было: ряд исследований указывали, что в отличие от продолжительности интенсивность снеготаяния не влияет на характер половодья, особенно в границах лесной зоны [28, 42], другие склонялись к обратному [40].

Несмотря на кажущуюся примитивность, количественная оценка интенсивности снеготаяния довольно сложна. Одним из путей решения задачи считался расчет интенсивности снеготаяния через тепловой баланс, однако его результаты показали значительные погрешности. Даже современные наблюдения с привлечением спутниковой съемки для смоченного (тающего) снега показывают большие ошибки, хотя и тыл снеготаяния отслеживается надежно [53]. Наибольшее распространение в XX в. получил метод, основанный на эмпирических зависимостях слоя стаивания от суммы положительных среднесуточных температур [29, 33]. Так, для рек Москвы и Пехорки он был оценен в 2,1 мм/сутки. Для густого ельника он составлял 1,4, для ельника средней густоты и смешанных лесов – 1,8, для редколесья – 3–4 мм/сутки. Последнее значение подтверждается работами П.П. Кузьмина. В поле коэффициент стаивания рекомендовалось принимать равным 5,2 мм/сутки.

Схожая схема принималась при учете оттепелей в зимний период: из расчета 3 мм на 1 С положительной среднесуточной температуры [13, 14]. Подобные оценки – результат многолетних наблюдений на сети воднобалансовых станций Европейской территории России.

Осадки в период весеннего половодья – еще один фактор, чаще всего характеризующий приходную составляющую. В середине XX в. их норма в бассейнах Дона, Днепра и Нижней Волги составляла от 5 до 15 мм, в бассейнах Оки, Верхней Волги и Камы, а также в верховьях Северной Двины – примерно 15–20 мм, увеличиваясь лишь к бассейну Печоры до 40 мм [3]. В отдельные годы в пределах всей ЕТР эта величина могла колебаться от 0 до 70 мм. При этом лишь часть выпадающих осадков оценивалась как эффективная. Порядка 5–10 мм влаги перехватывалось смешанным лесом, 15–25 мм – хвойным [28]. Кроме того, коэффициент стока осадков, выпавших на проталины, редко превышал 0,2.

В ряде работ XX в. постулируется факт существенного влияния весенних осадков на половодье рек вследствие их значительной изменчивости. На примере прогноза слоя стока половодья в бассейнах рек Кобры, Летки, Камы, Вятки, Великой, Бол. Холуницы и Весляны В.Д. Комаров показал значимое увеличение тесноты связи при привлечении данных о весенних осадках. Иные количественные оценки по связи весенних осадков со стоком половодья не были обнаружены.

Гораздо больше работ, описывающих *суммарное влияние снегозапаса и весенних осадков* на сток половодья. Одна из первых работ, посвященных выявлению связи между суммой осадков за зиму и весну с объемом стока в половодье, была опубликована Е.А. Гейнцом еще в 1903 г. для Оки у г. Орла [28]. В 1930-х гг. были установлены одни из первых зависимостей для Волги у Ярославля и Оки у Калуги, а в 1940-х гг. – для рек Камы, Вятки и Северной Двины. Чуть позже они были дополнены параметром осадков за период развития половодья, который повысил их надежность.

Надежность подобного двухпараметрического описания стока половодья, зависящего от запаса воды в снежном покрове (S) и осадков за время таяния (X), неодинакова в разных географических зонах. Наибольшая теснота связи в середине XX в. наблюдалась для рек севера лесной зоны (коэффициент корреляции $R = 0{,}8–0{,}9$) и наименьшая – на востоке степной, лесостепной зон и на востоке южной части лесной зоны, а также на реках северо-запада ($R = 0{,}4–0{,}6$). В центральных и западных районах степной и лесостепной зон, а также южной половины лесной зоны коэффициенты корреляции имели значения 0,7–0,8.

Исходя из совместного анализа снегозапасов и сумм весенних осадков, исследователями при использовании статистического подхода был сделан вывод о главенстве их роли в формировании стока половодья [3, 13, 50]. Однако для большей части Восточно-Европейской равнины зависимость $Y = f(S + X)$ оказалась недостаточной.

Понятие о потерях стока. Начиная с 1930-х гг. возрастает интерес к изучению факторов, определяющих потери стока в период весеннего половодья. Определение всех членов балансового уравнения было трудоемко, часто сопровождалось значительными ошибками, а часть из них не могла быть измерена. В результате специалисты в этой области все чаще стали прибегать к интегральным характеристикам. Так, в 1939–1947 гг. В.Д. Комаров ввел понятие потерь p_0, которое определяло сумму величин полной поверхностной емкости бассейна и затрат талой воды на инфильтрацию в увлажненную мерзлую почву, обусловленных некоторым количеством открытых сверху некапиллярных пор в верхнем слое почвы и частичным оттаиванием ее на проталинах. В сущности, p_0 – это отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между снегозапасом и стоком (рис. 3). Примечательно, что низ этих кривых предлагалось обосновывать зимними паводками, поскольку случаев половодий

с непроницаемой почвой и малым снегозапасом (до 30 мм) в первой половине XX в. не наблюдалось.

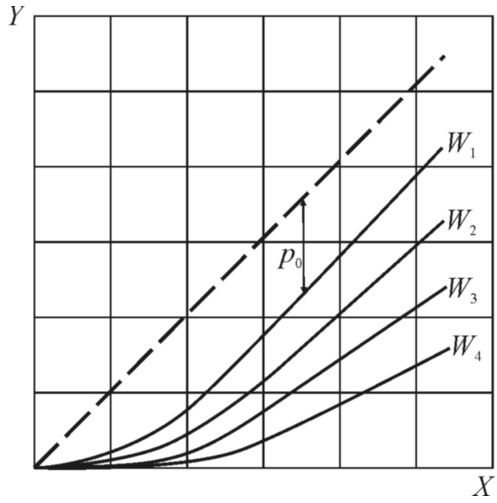


Рис. 3. Общий вид зависимости стока за половодье (Y) от запаса воды в снежном покрове (S), сложенного с осадками за время таяния (X) и осеннего увлажнения почвы (W_1–W_4), p_0 – отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между снегозапасом и стоком [29].
Fig. 3. General view of the dependence of the runoff during the flood (Y) on the water reserve in the snow cover (S), combined with precipitation during the thawing time (X) and autumn soil moistening (W_1–W_4), p_0 is the deviation of the dependence from the straight line of ideal correspondence between the snow reserve and runoff [29].

Неоднозначность определения параметра p_0 привела к тому, что первые работы были направлены на определение его через коэффициент стока, который для рек ЕТР варьировал в пределах от 0,02 до 0,95. Так, Е.Г. Попов предлагал использовать отношение интенсивности впитывания i к поступлению талой воды на почву h. В первом приближении i/h по смыслу близко к $(1 – \eta)$, где η – коэффициент стока.

Одновременно с этим отмечалось возрастание величины потерь с увеличением разности полной и наименьшей полевой влагоемкости почв бассейна [24], а также тесная связь с расчлененностью рельефа [40]. Однако ни то, ни другое все еще не поддавалось количественным оценкам на масштабах различных речных водосборов.

В среднем величина потерь увеличивалась преимущественно с северо-запада на восток и юго-восток от 30 до 60 мм, в отдельные годы достигая 80–100 мм. Для рек лесной зоны большое внимание уделялось лесной подстилке. Ее впитывающая способность оценивалась в размере до 20, в заболоченных лесах – до 30, а при наличии сфагнума и торфа – до 50 мм

воды [28, 39]. Отсюда следовало, что для достижения оптимального увлажнения на севере ЕТР требовалось больше влаги, чем на юге.

Весомый вклад в развитие математического описания потерь стока внесли изменения программ наблюдений на гидрометеорологической сети, которые положили начало массовым наблюдениям за снежным покровом, глубиной промерзания почвы и другими показателями. Подкрепленные увеличивающимися массивами данных, были получены выводы о существенном влиянии влажности почв и глубины их промерзания на потери талого стока в период весеннего половодья. В частности, было показано, что [15, 27, 50]:

– в лесной зоне и на заболоченных участках глубина промерзания почвы имеет слабую связь со стоком половодья, в то время как ее высокая влажность формирует своеобразный водоупор;

– в пределах лесостепной и степной зон минимум потерь достигается при влажности почв, близкой к наименьшей полевой влагоемкости, и глубоком их промерзании;

– в регионах с большой повторяемостью развития ледяной корки (например, Заволжье) получена высокая теснота связи потерь весеннего стока с глубиной промерзания;

– в суглинистых почвах водонепроницаемый слой возникает, если во время таяния начальная влажность почвы составляет не менее 60 % общего объема пор, а в песчаных почвах – при значениях, близких к наименьшей полевой влагоемкости. В лесных массивах водонепроницаемый слой образуется исключительно редко;

– для глинистых и суглинистых почв требуется учет степени залесенности водосбора и распределения их по площади для оценки объема потерь талого стока.

В результате к концу XX в. практически все полученные статистические уравнения, описывающие сток половодья, можно было свести к следующим постулатам:

1) потери талых вод сильно возрастают при слабо промерзшей почве;

2) пониженное увлажнение почвы осенью влечет увеличение потерь талых вод;

3) при стоке по мерзлой и хорошо увлажненной с осени почве потери талых вод невелики и практически не зависят от продолжительности таяния. В этих условиях наблюдается тесная связь стока за половодье с запасом воды в снежном покрове (с учетом осадков за время таяния);

4) требуется совместный учет влияния промерзания и влажности почвы.

Влажность почвогрунтов при достижении высоких значений формирует условия, близкие к водоупору. Низкая влажность почвы, анализируемая в отрыве от остальных факторов, указывает на большую фильтрационную способность почвогрунтов и, следовательно, большие потери стока для половодья как фазы водного режима [15]. В то же время

не всякая очень сухая почва будет хорошо пропускать влагу: суглинистые и глинистые почвы при значительном промерзании и интенсивной водоподаче талых вод за определенные интервалы времени образуют воздушные водоупоры, повышающие коэффициент стока до промачивания верхнего почвенного слоя.

Значимость этого ФФС половодья не подвергается сомнению. Но интересно, что работ, предлагавших использование измеренной влажности почвы в качестве количественного фактора, крайне мало. Это определено как трудоемкостью и ограниченностью по времени года подобного вида наблюдений, так и крайне высокой изменчивостью получаемого пространственного поля характеристики. Примерами работ с использованием одновременно фактической и расчетной влажности почв можно назвать методики прогноза притока воды к Цимлянскому водохранилищу [13, 14]. В них увлажнение почвы перед началом снеготаяния W оценивалось по фактическим данным для трех из четырех речных водосборов.

По этой причине в зависимости от региона исследований ученые использовали косвенные характеристики [5, 13, 46]. Еще в 1935 г. Б.Д. Зайков на примере стока половодья р. Большой Узень у г. Новоузенска предлагал зависимость вида:

$$y = 0{,}1X\sqrt{(X - z)} \ ,$$

где X – сумма зимне-весенних осадков (до окончания половодья), а $(X - z)$ – разность между суммой осадков и испарением по графикам Мейера за период с 1 октября до установления снежного покрова.

Этот способ косвенной оценки влагоемкости водосбора с некоторыми изменениями до конца XX в. считался наиболее популярным, особенно для водосборов лесной зоны, включая рр. Летку, Кобру, Каму, Великую, Вятку, Большую Холуницу и Весляну. Но наиболее распространенной стала оценка поверхностной влагоемкости $w_{\text{пв}}$, впервые появившаяся в [24]. Ее получали путем сложения:

– осадков за вычетом испарения (по Б.В. Полякову) за 90 дней, предшествующих дате перехода температуры воздуха через 0ºС осенью;

– осадков за период от даты перехода через 0 ºС до даты образования устойчивого снежного покрова;

– количества воды, образующейся из снега в период оттепели и попадающей на поверхность почвы.

В таком виде параметр вошел в ряд прогностических методик, включая прогнозы половодья на р. Оке и других реках нечерноземной зоны ЕТР [50].

Для характеристики предзимней влагонасыщенности водосбора допускалось использование и величины паводочного стока рек в осенний период или среднемесячных расходов воды за 1–2 месяца до начала зимы [35], а также водность рек в феврале – марте. Подобные решения были реализованы Т.И. Великановой [11] для Юга, Сухоны, Устьи и Кокшеньги.

Кроме того, в США были разработаны схемы, учитывающие осадки за каждый день в течение заданного периода с неким редукционным коэффициентом [33].

Наряду с влажностью для расчета характеристик половодья использовали *глубину промерзания почвы*. При промерзании почвы происходят важные структурные изменения ее пористости, плотности, водопроницаемости и теплофизических характеристик. Ряд авторов отмечает, что глубина промерзания в первую половину зимы в основном определяется январскими морозами, если к этому времени высота снежного покрова не превышает 15–25 см [32]. Промерзание почвы наиболее интенсивно развивается в суглинистых почвах, которые характеризуются меньшим размером пор и большим содержанием в них влаги после выпадения осенних дождей. Именно для глинистых и суглинистых почв зимой характерно увеличение глубины промерзания за счет капиллярного поднятия, в том числе при близком положении уровня грунтовых вод. Значительные отрицательные аномалии в условиях малоснежных зим ведут к нарастанию глубины промерзания. В отдельных случаях в лесных массивах она может достигать 1 м [15].

Экспериментально установлено, что скорость инфильтрации не зависит от льдистости почвы при средней глубине промерзания 0–25 см, а наиболее резкое изменение фильтрационных свойств почвы происходит при глубине промерзания 30–45 см. При достижении значения в 60 см почва, по мнению ученых, становится практически непроницаемой для талого стока. В то же время в работах разных лет отмечается, что большие потери могут формироваться при сочетании малого увлажнения и большой глубины промерзания [26, 27].

В первой половине XX в. в пределах ЕТР средняя глубина промерзания увеличивалась от 30–40 в Приазовье до 60 см в бассейнах Медведицы, Хопра, Сулы, Оскола, Ворсклы и до 80–100 см в бассейнах Камы и Печоры [28, 44]. Отсюда следовало, что она относится к ФФС половодья лишь для южных водосборов.

Чаще всего при анализе ФФС половодья и разработке методов прогноза использовали среднюю максимальную или среднюю на дату глубину промерзания почвы. В середине XX в. некоторые исследователи предприняли попытку учета неравномерности промерзания почвы через кривые распределения по аналогии со снежным покровом. Однако данный подход не показал увеличения эффективности методик прогнозирования весеннего стока.

Прочие факторы весеннего стока. Среди неклассических ФФС половодья можно выделить среднюю температуру воздуха в зимний период по Е.А. Гейнцу, а также площадь водосбора по Д.И. Кочерину и Д.Л. Соколовскому.

Отдельного внимания заслуживает ледяная корка. Притертая корка способствует увеличению коэффициента талого стока весной.

Аналогичный эффект достигается при выпадении жидких осадков весной на наст. А при оттепелях он сокращает потери на испарение снежного покрова. Эти эффекты приобретают значимость лишь при достижении некоторой степени покрытости водосбора снегом или его толщины в 2–4 см. Тем не менее, в количественных показателях ледяная корка в течение XX в. в большинстве работ просто суммировалась с запасом воды в снежном покрове. Большой популярности этот показатель не приобрел в силу ненадежности результатов натурных измерений.

Помимо перечисленных параметров, отмечалась связь половодья с почвенным и растительным покровом, характером рельефа, глубиной залегания грунтовых вод. В XX в. сделаны выводы о характере половодья для однородных физико-географических и ландшафтных зон [11, 28, 40]. Большое число работ посвящено влиянию леса, в т. ч. многократному снижению интенсивности снеготаяния и увеличению потерь талого стока в лесных массивах, особенно на песчаных почвах [48].

Нельзя обойти вниманием *антропогенное влияние* на сток половодья, оценке роли которого посвящено множество работ [4, 9, 16, 17, 20, 23, 36, 51].

Помимо прямых (регулирование стока, водозабор, водосброс, переброска стока), разительно преобразующих водный режим рек, влияние оказывают косвенные факторы переменного воздействия. Первый из них – сельскохозяйственное освоение земель. Распашка речных водосборов под озимые и создание зяби под яровые культуры в осенний период ведет к увеличению пористости верхнего слоя почвы и ее фильтрационной способности [31, 47, 49]. Так, коэффициент фильтрации в зимний период для возделываемых почв снижается лишь в 2–4 раза, тогда как на условно-естественных участках – до 10–12 раз. В то же время распашка влияет и на коэффициент стока: повышая его для грунтовой составляющей и снижая для талых вод.

Еще один антропогенный ФФС половодья – создание лесозащитных полос для удержания снега и талого стока на полевых участках. В естественных условиях большая часть снега с метелевым переносом задерживалась в овражно-балочной сети. Снегозадержание в полях привело к увеличению инфильтрации талых вод и времени добегания до первичных звеньев русловой сети. Тот же эффект диагностирован для распашки склонов водосборов.

Лесные полосы оказывают сильное влияние не только на условия снегонакопления непосредственно в пределах лесополос, но и на прилегающих к ним территориях полей. Снегонакопление в зоне влияния лесополос определяется конструкцией насаждений, их размерами и положением относительно преобладающих направлений зимних ветров, характером и размером снегосборной площади, расстояниями между полосами, а также метеорологическими условиями зимы: скоростью ветра, количеством и распределением во времени осадков и другими

факторами. Влияние лесных полос на снегоотложение распространяется на расстояние, равное 20–30-кратной высоте деревьев. По результатам наблюдений в заповеднике Каменная Степь установлены закономерности снегонакопления внутри полностью взаимодействующей системы лесных полос и разобщенных систем [36]. Основной функцией лесных полос является снижение скоростей ветра, перераспределение снегозапасов и сокращение весеннего поверхностного стока с частичным его переводом в подземный.

Влияние леса на весенний сток проявляется и при его сведении. Так, в работе [30] показано, что при неизменности климата рубки леса с последующим его восстановлением приводят к росту весеннего стока в нечерноземной зоне ЕТР в пределах 5–10 % на крупных и средних реках и до 25 % – на малых рек.

Интегральное влияние распашки и создания лесозащитных полос породило предложения по возможности управления инфильтрацией, глубиной промерзания и равномерностью распределения снежного покрова [6].

Несмотря на большое разнообразие неосновных ФФС, большинство второстепенных и антропогенных ФФС до настоящего времени не поддаются количественной оценке, оставаясь качественными факторами.

Мультифакторные оценки характеристик половодья. Статистический подход подразумевает проведение регрессионного анализа, поэтому не удивительно, что в большом числе исследований опубликованы также и мультифакторные уравнения для стока половодья. Одни из первых статистических зависимостей имели крайне простой вид: сток половодья увязывался с запасом воды в снеге или эффективными осадками (максимальный снегозапас, сложенный с осадками на период половодья). К 1920–1930-м гг. в качестве дополнительных косвенных характеристик появляется средняя температура зимнего периода и осадки за сентябрь предшествующего года.

Общий вид зависимостей, которыми пользовались с середины XX в. и до настоящего времени, был сформирован в 1940–1950-е гг. В эти же сроки активное развитие получили территориальные методы прогнозирования. Считается, что их общей физической основой были метод водного баланса и закономерности движения талых вод в толще почвогрунтов, но реализованы они были квазистатистическим методом. Наиболее распространенным видом зависимости слоя стока половодья во второй половине XX в. стала:

$$Y = f\left(S + X;\, w \cdot L / 50\right),$$

где $S + X$ – сумма запасов воды в снежном покрове и осадков на период половодья, w – количество продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см, L – глубина промерзания. Выражение $w{\cdot}L/50$ описывает количество продуктивной влаги в почве, превратившееся в лед. Его в 1955 г. практически одновременно предложили Е.С. Змиева, Т.Т. Макарова и В.Д. Комаров,

опиравшиеся на успешность его применения при оценке потерь на Каме, Вятке и Белой, а также реках Заволжья.

Зависимости такого вида применялись для бассейна Медведицы у хут. Арчединская, рек бассейна Оки, Белой, Сулы у г. Лубны [24, 28, 34, 40]. При этом погрешность в описании объема половодья, например, для Оки у г. Белев не превышала 20 мм. Однако в зависимости от природной зоны и ландшафтных условий ее внешний вид претерпевал изменения. Так, для рек степной и лесостепной зон (Дона, Оки и рек южного Заволжья) при отсутствии связи стока половодья с осенней влажностью почв и уровнем грунтовых вод зависимость выглядела следующим образом:

$$Y = f\left(S + X, \zeta, L, \xi\right),$$

где S – запасы воды в снеге, X – осадки за время снеготаяния, ζ – льдистость почвы (в баллах), L – глубина промерзания, ξ – интенсивность таяния.

Для рек севера и лесной зоны ЕТР зависимость, наоборот, чаще всего лишалась показателя глубины промерзания, т. к. в наблюдавшихся климатических условиях промерзание почвы практически ежегодно превышало 60 см:

$$Y = f\left(S + X, W\right),$$

где W – осеннее увлажнение почвы. Отдельное внимание уделялось водосборам, практически сплошь покрытым лесами: для них вычитания испарения не производилось. Вместо этого за косвенную характеристику увлажнения принималась сумма осадков с 1 августа до установления снежного покрова.

Альтернативный подход для залесенных водосборов применялся в работе [35], где уравнение прогноза стока половодья имело вид

$$Y = f\left(S + X, Y_{II}\right),$$

где Y_{II} – сток за февраль.

Одновременно с этим появляется целый набор зависимостей вида $Y = f(S + X)$ при условии «оптимальных» показателей влажности и глубины промерзания почвы. Так, для р. Москвы оптимальная влажность почвы принималась ≥65 мм, а глубина промерзания ≥60 см [28]. При этом теснота связи R повысилась до 0,92, а продолжительность таяния не оказывала влияния на величину потерь стока.

Менее распространенные зависимости имели вид:

$$Y = \left(S + X\right) - p_0 \operatorname{th} \frac{X}{p_0},$$

где p_0 – параметр, зависящий для данного типа почвы только от ее осеннего увлажнения и определяемый через экспоненциальную связь с увлажнением почвы при условии промерзании почвы более чем на 60 см.

Анализ половодья по уравнению такого вида реализован В.Д. Комаровым на примере рек степного Заволжья.

Учет слабопромерзших участков речного водосбора чаще всего велся дифференцировано. Для них коэффициент стока был принят равным 0,1. Примечательно, что учет неоднородности глубины промерзания в зависимостях, описывающих слой стока половодья для ряда рек лесной зоны, позволил вдвое снизить погрешность прогноза.

Но далеко не всегда предлагалось использовать для анализа только зимние или предзимние характеристики. Так, в работе Е.С. Змиевой [24] наравне со снегозапасом предлагалось учитывать произведение дефицита влажности на глубину оттаивания почвы на рано появившихся проталинах в момент освобождения половины водосбора от снежного покрова. Однако значимых выводов получено не было.

Как следует их приведенного анализа, в большинстве существующих на данный момент работ отечественных гидрологов применяются схожие подходы к описанию факторов формирования стока половодья и его прогноза: сток половодья зависит от снегозапасов, влажности почвы и глубины промерзания. На этом построена теория статистической гидрологии уже восемь десятков лет. При этом практически везде дополнительно указывается на большую значимость условий весны. Формирующиеся в период заблаговременности прогноза, они значительно влияют на конечные количественные и качественные характеристики половодья.

Выводы

На основе обзора литературы проведена единая типизация факторов формирования весеннего половодья. Выделены группы прямых и косвенных, динамических и квазипостоянных, а также антропогенных факторов.

На основе анализа литературы авторами построена сводная схема факторов формирования половодья с учетом особенностей их влияния на водный сток.

Проанализированы представления о роли каждого значимого фактора в формировании весеннего половодья, приведены их количественные оценки за различные временные промежутки времени, приведенные в литературных источниках.

Рассмотрены современные теоретические подходы к расчету основных факторов формирования стока весеннего половодья.

Выдвинута гипотеза, что к настоящему моменту представления о главенствующей роли приходных составляющих в формировании слоя стока весеннего половодья во многом утратили свою актуальность. Существенная трансформация процессов формирования талого стока на водосборе за счет климатических изменений и антропогенных факторов коренным образом повлияла на роль отдельных компонентов, что требует детального переосмысления и анализа на уровне отдельных регионов. В следующей части работы подобный анализ реализован на примере водосборов рек Донского бассейна.

Типизация факторов формирования весеннего половодья выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-77-10032, анализ роли таких факторов – при поддержке гранта РНФ № 21-47-00008.

The typing of spring flood formation factors was supported by the RSF grant no. 19-77-10032, and the analysis of the role of such factors was supported by the RSF grant no. 21-47-00008.

Список литературы

1. *Авилова К.В., Голосов В.Н., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Состояние русел // Малые реки волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 109-116.

2. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3-12.

3. *Алюшинская Н.М., Анискина Н.А., Ивашинцова Л.Д.* Весенний сток рек бассейна Северной Двины и его прогнозы // Труды ГГИ. 1962. Вып. 97. С. 3-138.

4. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.

5. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов: учебник. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.

6. *Барабанов А.Т.* Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его прогноз и регулирование // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2012. № 1(33). С. 65-68.

7. *Бураков Д.А., Литвинова О.С.* Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. Вып. 3. С. 111-120.

8. *Быстров А.В.* Расчет и прогноз потерь талых вод на водосборах левобережной части Нижнего Дона // Труды ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 83-87.

9. *Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л.* Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91-100.

10. *Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А.* Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 6. С. 694-709. DOI: 10.31857/S0321059620060152

11. *Великанова Т.И.* Весенний сток и особенности его формирования в условиях северной части Европейской территории СССР // Труды ЦИПа. 1967. Вып. 54. С. 78-100.

12. *Веретенникова М.В., Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Любимов Б.П.* Современная пораженность овражной эрозией земель сельскохозяйственного фонда и прогноз возможного ее развития // Эрозия почв и русловые процессы. 1998. Т. 11. С. 103-111.

13. *Вершинина Л.К.* Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // Труды ГГИ. 1977. Вып. 223. С. 52-65.

14. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И.* Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // Труды ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 3-30.

15. *Владимиров А.М.* Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та. 2009. № 9. С. 22-39.

16. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.

17. *Водогрецкий В.Е.* Антропогенное изменение стока малых рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 176 с.

18. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Основной том. М.: Изд-во ААНИИ, 2014. 1018 с.

19. *Гареев А.М., Зайцев П.Н., Комиссаров А.В.* Некоторые особенности изменчивости максимальных расходов воды весеннего половодья в зависимости от влияния стокоформирующих факторов (на примере бассейнов рек Башкирского Предуралья) // Вестник Башкинского ун-та. 2015. № 2. С. 478-485.

20. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А*. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1

21. *Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л.* Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России. 2012. № 2. С. 29-46.

22. *Голосов В.Н., Панин А.В.* Пространственно-временные закономерности процесса деградации речной сети на Восточно-Европейской равнине // Труды Академии водохозяйственных наук. 1998. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. С. 163-172.

23. *Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л.* Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

24. *Змиева Е.С.* Весенний сток в бассейне р. Волги и метод его прогноза // Труды ЦИПа. 1955. Вып. 39(66). С. 27-34.

25 *Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В*. Земледельческое освоение территории и отмирание рек европейской части России // Геоморфология. 1996. № 4. С. 53-60.

26. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лед и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220

27. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. СПб: Нестор-История, 2012. 616 с.

28. *Комаров В.Д.* Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеоиздат, 1959. 259 с.

29. *Комаров В.Д.* Долгосрочный прогноз весеннего стока рек черноземной зоны Европейской части СССР на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеоиздат, 1955. 74 с.

30. *Крестовский О.И.* Опыт расчета и прогноза элементов водного баланса весеннего половодья бассейна р. Вятки // Труды ГГИ. 1977. Вып. 233. С. 3-14.

31. *Кузник И.А.* Агролесомелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почв. Л.: Гидрометеоизат, 1962. 220 с.

32. *Леонович И.И., Вырко Н.П., Демидко М.Н.* Статистический метод определения глубины промерзания грунтов // Труды БГТУ. 2015. № 2. С. 27-31. https://rep.bntu.by/handle/data/47635

33. *Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Л.Х.* Прикладная гидрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 759 с.

34. *Макарова Т.Т*. Исследование условий формирования весеннего стока р. Камы и методика его прогноза // Труды ЦИП. М.: Гидрометеоиздат, 1955. Вып. 39(66). С. 15-22.

35. *Макарова Т.Т.* Исследование формирования весеннего половодья по методу водного баланса (на примере р. Мологи) // Труды ЦИПа. 1950. Вып. 22(49). С. 53-84.

36. *Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И*. Бассейн Верхнего Дона: водные ресурсы, гидрология, гидрография // Тр. НИИ Геологии ВГУ. Вып. 26. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005а. 139 с.

37. *Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И.* Гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне Верхнего Дона // Экология бассейна Дона. Воронеж, 2005б. С. 74-75.

38. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / под ред. М.Л. Маркова. СПб.: РИАЛ, 2021. 202 с.

39. *Молчанов А.А*. Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 488 с.

40. *Паршин В.Н., Салов М.С.* Весенний сток в бассейне реки Дон и его предвычисление. Л.: Гидрометеоиздат, 1955. 103 с.

41. *Перминов А.В., Смирнова М.А.* Оценка внутригодового распределения речного стока в бассейне Верхней Волги // Вестник ФГОУ ВО МГАУ. 2014. № 3. С. 30-34.

42. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 395 с.

43. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века / под ред. А.В. Кислова, В.М. Евстигнеева, С.М. Малхазовой, Н.Н. Соколихиной, Г.В. Сурковой, П.А. Торопова, А.В. Чернышева, А.Н. Чумаченко. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.

44. *Разумова Л.А.* Сезонная мерзлота и влажность почвы на Европейской территории СССР // Труды ЦИП. Вып. 51. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 352 с.

45. *Рахманов В.В.* Водоохранная роль лесов. М.: Гослесбумиздат, 1962. 235 с.

46. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 248 с.

47. *Сафина Г.Р., Голосов В.Н.* Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского ун-та. Серия Естественные науки. 2018. № 1. С. 111-125.

48. *Соколов А.А.* О влиянии леса на максимальный сток весеннего половодья // Труды ГГИ. 1962. № 99. С. 79-140.

49. *Соломатин Н.В., Валиева Ж.А., Гейде Э.Г.* Антропогенные изменения в формировании стока на водосборах Южного Урала // Известия ОГАУ. 2007. № 15-1. С. 104-106.

50. *Субботин А.И.* Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в нечерноземной зоне европейской территории России. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 98 с.

51. *Фролова Н.Л.* Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока). Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2006. 111 с.

52. *Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П., Повалишникова Е.С.* Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 32-49.

53. *Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г.* Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 120-143.

54. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // Nat Hazards. 2017a. Vol. 88. P. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.

55. *Li K., Huang G., Baetz B.* Development of a Wilks feature importance method with improved variable rankings for supporting hydrological inference and modeling // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2021. Vol. 25. Issue 9. P. 4947-4966. DOI: 10.5194/hess-25-4947-2021.

56. *Merz R., Tarasova L., Basso S.* The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. 114024. DOI: 10.1088/1748-9326/abb9dd.

57. *Schmidt L., Heße F., Attinger S., Kumar R.* Challenges in Applying Machine Learning Models for Hydrological Inference: A Case Study for Flooding Events Across Germany // Water resources research. 2020. Vol. 56. DOI: 10.1029/2019WR025924.

References

1. *Avilova K.V., Golosov V.N., Panin A.V., Sidorchuk A.Yu.* Sostoyanie rusel [Condition of the channels]. Malye reki volzhskogo basseina [Small rivers of the Volga basin], Moscow: MGU Publ., 1998, pp. 109-116. [in Russ.].

2. *Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I.* Otsenka vliyaniya izmenenii klimata na vodnyi rezhim i stok rek basseina Volgi [Assessment of the impact of climate

change on the water regime and runoff of rivers in the Volga basin]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water, climate and ecology]. 2013, no. 4, pp. 3-12. [in Russ.].

3. *Alyushinskaya N.M., Aniskina N.A., Ivashintsova L.D.* Vesennii stok rek basseina Severnoi Dviny i ego prognozy [Spring runoff of rivers in the Northern Dvina basin and its forecasts]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1962, vol. 97, pp. 3-138. [in Russ.].

4. Antropogennye vozdeistviya na vodnye resursy Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v kontse XX stoletiya [Anthropogenic impacts on the water resources of Russia and neighboring states at the end of the 20th century]. Koronkevich N.I., Zaitseva I.S. (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 2003, 367 p. [in Russ.].

5. *Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.* Kurs gidrologicheskikh prognozov: ucheb [Hydrological Forecast Course: textbook]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974, 419 p. [in Russ.].

6. *Barabanov A.T.* Zakonomernosti formirovaniya poverkhnostnogo stoka talykh vod, ego pro-gnoz i regulirovanie [Patterns of the formation of the surface runoff of melt water, its forecast and regulation]. *Izvestiya Orenburgskogo gos. agrarnogo un-ta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2012, no. 1(33), pp. 65-68. [in Russ.].

7. *Burakov D.A., Litvinova O.S.* Vodno-balansovye zavisimosti dlya prognoza stoka talykh vod na yuge Zapadno-Sibirskoi ravniny [Water-balance dependencies for the forecast of melt water runoff in the south of the West Siberian Plain]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2010, issue 3, pp. 111-120. [in Russ.].

8. *Bystrov A.V.* Raschet i prognoz poter' talykh vod na vodosborakh levoberezhnoi chasti Nizhnego Dona [Calculation and forecast of melt water losses in the catchment areas of the left-bank part of the Lower Don]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1980, issue 265, pp. 83-87. [in Russ.].

9. *Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L.* Vliyanie klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Influence of Climatic and Anthropogenic Factors on Spring Runoff in the Don Basin]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr*. [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography]. 2021, no. 5, pp. 91-100. [in Russ.].

10. *Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A.* Prognoz pritoka vody k Tsimlyanskomu vodokhranilishchu v period polovod'ya v sovremennykh kli-maticheskikh usloviyakh: problemy i vosproizvodimost' [Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility]. *Water resources*. 2020, vol. 47, no. 6, pp. 953-967. DOI: 10.1134/S0097807820060159

11. *Velikanova T.I.* Vesennii stok i osobennosti ego formirovaniya v usloviyakh severnoi chasti Evropeiskoi territorii SSSR [Spring runoff and features of its formation in the conditions of the northern part of the European territory of the USSR]. *Trudy TsIPa* [Proceedings of the CIP]. 1967, issue 54, pp. 78-100. [in Russ.].

12. *Veretennikova M.V., Zorina E.F., Kovalev S.N., Lyubimov B.P.* Sovremennaya porazhen-nost' ovrazhnoi eroziei zemel' sel'skokhozyaistvennogo fonda i prognoz vozmozhnogo ee raz-vitiya [Spring runoff and features of its formation in the conditions of the northern part of the European territory of the USSR Modern ravine erosion of agricultural land and forecast of its possible development]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil erosion and channel processes]. 1998, vol. 11, pp. 103-111. [in Russ.].

13. *Vershinina L.K.* Metodika rascheta i prognoza ob"ema stoka vesennego polovod'ya v basseine r. Dona [Methodology for calculating and forecasting the volume of spring flood runoff in the basin of the Don river]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1977, issue 223, pp. 52-65. [in Russ.].

14. *Vershinina L.K., Krestovskii O.I.* Uchet vodopoglotitel'noi sposobnosti vodosborov pri prognozakh stoka vesennego polovod'ya [Accounting for the water absorption capacity of watersheds in forecasting spring flood runoff]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI], 1980, issue 265, pp. 3-30. [in Russ.].

15. *Vladimirov A.M.* Faktory, opredelyayushchie vozniknovenie ekstremal'nykh raskhodov i urovnei vody polovod'ya [Factors Determining the Occurrence of Extreme Flows and High Water

Levels]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorolo-gicheskogo un-ta* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University]. 2009, no. 9, pp. 22-39. [in Russ.].

16. Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use]. I.A. Shiklomanova (Ed.). Saint-Petersburg: Gosudar-stvennyi gidrologicheskii institut Publ., 2008, 600 p. [in Russ.].

17. *Vodogretskii V.E.* Antropogennoe izmenenie stoka malykh rek [Anthropogenic change in the runoff of small rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990, 176 p. [in Russ.].

18. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Osnovnoi tom [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Main volume]. Moscow: AANII Publ., 2014, 1018 p. [in Russ.].

19. *Gareev A.M., Zaitsev P.N., Komissarov A.V.* Nekotorye osobennosti izmenchivosti maksi-mal'nykh raskhodov vody vesennego polovod'ya v zavisimosti ot vliyaniya stokoformiruyushchikh faktorov (na primere basseinov rek Bashkirskogo Predural'ya) [Some Peculiarities of Variability of Maximum Water Discharges in Spring High Water Depending on the Influence of Runoff Forming Factors (on the Example of River Basins of the Bashkir Cis-Urals)]. *Vestnik Bashkinskogo un-ta* [Bulletin of the Bashkin University]. 2015, no. 2, pp. 478-485. [in Russ.].

20. *Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Kashutina E.A.* So-vremennye i stsenarnye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Modern and scenario changes in the flow of the Volga and Don]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2017, no. 3, pp. 6-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1 [in Russ.].

21. *Gladkevich G.I., Terskii P.N., Frolova N.L.* Otsenka opasnosti navodnenii na territorii Rossiiskoi Federatsii [Flood risk assessment on the territory of the Russian Federation]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2012, no. 2, pp. 29-46. [in Russ.].

22. *Golosov V.N., Panin A.V.* Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti protsessa degrada-tsii rechnoi seti na Vostochno-Evropeiskoi ravnine [Spatial and temporal regularities of the process of degradation of the river network in the East European Plain]. *Trudy Akademii vodokhozyaistvennykh nauk* [Proceedings of the Academy of Water Science], issue 5. Gidrologiya i ruslovye protsessy [Hydrology and channel processes]. 1998, pp. 163-172. [in Russ.].

23. *Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L.* Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie [Water resources of the Don basin and their ecological state]. Moscow: GEOS Publ., 2017, 204 p. [in Russ.].

24. *Zmieva E.S.* Vesennii stok v basseine r. Volgi i metod ego prognoza [Spring runoff in the Volga river basin and the method of its forecast]. *Trudy TsIPa* [Proceedings of the CIP]. 1955, issue 39(66), pp. 27-34. [in Russ.].

25. *Ivanova N.N., Golosov V.N., Panin A.V.* Zemledel'cheskoe osvoenie territorii i otmira-nie rek evropeiskoi chasti Rossii [Agricultural development of the territory and the dying off of the rivers of the European part of Russia]. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 1996, no. 4, pp. 53-60. [in Russ.].

26. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Gidrofizicheskie protsessy na vodosbore [Hydrophysical processes in the watershed]. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012, 616 p. [in Russ.].

27. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na glubinu promerzaniya pochv v basseine r. Volga [Influence of climatic changes on the depth of soil freezing in the basin of the river. Volga]. *Led i sneg* [Ice and snow]. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220. [in Russ.].

28. *Komarov V.D.* Dolgosrochnyi prognoz vesennego stoka rek chernozemnoi zony Evropeiskoi chasti SSSR na osnove territorial'no obshchikh zavisimostei [Long-term forecast of the spring runoff of rivers in the chernozem zone of the European part of the USSR based on territorially common dependencies]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955, 74 p. [in Russ.].

29. *Komarov V.D.* Vesennii stok ravninnykh rek evropeiskoi chasti SSSR, usloviya ego for-mirovaniya i metody prognozov [Spring Runoff of Plain Rivers in the European Part of the USSR, Conditions for Its Formation and Methods of Forecasting]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1959, 259 p. [in Russ.].

30. *Krestovskii O.I.* Opyt rascheta i prognoza elementov vodnogo balansa vesennego polovo-d'ya basseina r. Vyatki [Experience in calculating and predicting the elements of the water balance of the spring flood in the basin of the Vyatka river]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1977, issue 233, pp. 3-14. [in Russ.].

31. *Kuznik I.A.* Agrolesomeliorativnye meropriyatiya, vesennii stok i eroziya pochv [Agroforestry measures, spring runoff and soil erosion]. Leningrad: Gidrometeoizat Publ., 1962, 220 p. [in Russ.].

32. *Leonovich I.I., Vyrko N.P., Demidko M.N.* Statisticheskii metod opredeleniya glubiny promerzaniya gruntov [Statistical method for determining the depth of soil freezing]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. 2015, no. 2, pp. 27-31, available at: https://rep.bntu.by/handle/data/47635. [in Russ.].

33. *Linslei R.K., Koler M.A., Paulyus D.L.Kh.* Prikladnaya gidrologiya [Applied hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962, 759 p. [in Russ.].

34. *Makarova T.T.* Issledovanie formirovaniya vesennego polovod'ya po metodu vodnogo ba-lansa (na primere r. Mologi) [Study of the formation of spring floods using the water balance method (on the example of the Mologa River)]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP]. 1950, issue 22(49), pp. 53-84. [in Russ.].

35. *Makarova T.T.* Issledovanie uslovii formirovaniya vesennego stoka r. Kamy i metodika ego prognoza [Study of the conditions for the formation of the spring runoff of the Kama river and the method of its forecast]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1955, issue 39(66), pp. 15-22. [in Russ.].

36. *Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I.* Bassein Verkhnego Dona: vodnye resursy, gidro-logiya, gidrografiya [The Upper Don basin: water resources, hydrology, hydrography]. *Tr. NII Geologii VGU* [Proceedings of the Research Institute of Geology VSU], issue 26, Voronezh: Voronezh State University Publ., 2005a, 139 p. [in Russ.].

37. *Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I.* Gidrologicheskoe obosnovanie vodokhozyaistven-nykh meropriyatii v basseine Verkhnego Dona [Hydrological substantiation of water management activities in the Upper Don basin]. *Ekologiya basseina Dona* [Ecology of the Don basin]. Voronezh, 2005b, pp. 74-75. [in Russ.].

38. Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobalansovykh i bolotnykh stantsiyakh: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term changes in water balance elements at water balance and bog stations: scientific and applied reference book]. M.L. Markova (Ed.). Saint-Petersburg.: RIAL Publ., 2021, 202 p. [in Russ.].

39. *Molchanov A.A.* Gidrologicheskaya rol' sosnovykh lesov na peschanykh pochvakh [Hydrological role of pine forests on sandy soils]. Moscow: AN SSSR Publ., 1952, 488 p. [in Russ.].

40. *Parshin V.N., Salov M.S.* Vesennii stok v basseine reki Don i ego predvychislenie [Spring runoff in the Don river basin and its prediction]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955, 103 p. [in Russ.].

41. *Perminov A.V., Smirnova M.A.* Otsenka vnutrigodovogo raspredeleniya rechnogo stoka v basseine Verkhnei Volgi [Assessment of the intra-annual distribution of river runoff in the Upper Volga basin]. *Vestnik FGOU VO MGAU* [Herald FGOU VO MSAU]. 2014, no. 3, pp. 30-34. [in Russ.].

42. *Popov E.G.* Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka [Issues of theory and practice of river runoff forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963, 395 p. [in Russ.].

43. Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v uslo-viyakh potepleniya XXI veka [Forecast of climatic resource availability of the East European Plain in the conditions of warming of the 21st century]. A.V. Kislova, V.M. Evstigneeva, S.M. Malkhazovoi, N.N. Sokolikhinoi, G.V. Surkovoi, P.A. Toropova, A.V. Chernysheva, A.N. Chumachenko (Eds.). Moscow: MAKS Press Publ., 2008, 292 p. [in Russ.].

44. *Razumova L.A.* Sezonnaya merzlota i vlazhnost' pochvy na Evropeiskoi territorii SSSR [Seasonal permafrost and soil moisture in the European territory of the USSR]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP], issue 51, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1953, 352 p. [in Russ.].

45. *Rakhmanov V.V.* Vodookhrannaya rol' lesov [Water protection role of forests]. Moscow: Goslesbumizdat Publ., 1962, 235 p. [in Russ.].

46. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch [Manual of Hydrological Forecasts. Issue. 1. Long-term forecasts of elements of the water regime of rivers and reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989, 248 p. [in Russ.].

47. *Safina G.R., Golosov V.N.* Vliyanie izmenenii klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka malykh rek yuzhnoi poloviny Evropeiskoi territorii Rossii [The impact of climate change on the intra-annual distribution of runoff of small rivers in the southern half of the European territory of Russia]. *Uchenye zapiski Ka-zanskogo un-ta. Seriya Estestvennye nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences]. 2018, no. 1, pp. 111-125. [in Russ.].

48. *Sokolov A.A.* O vliyanii lesa na maksimal'nyi stok vesennego polovod'ya [On the influence of the forest on the maximum runoff of the spring flood]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1962. № 99. pp. 79-140. [in Russ.].

49. *Solomatin N.V., Valieva Zh.A., Geide E.G.* Antropogennye izmeneniya v formirovanii stoka na vodosborakh Yuzhnogo Urala [Anthropogenic changes in runoff formation in the watersheds of the Southern Urals]. *Izvestiya OGAU* [News OGAU]. 2007, no. 15-1, pp. 104-106. [in Russ.].

50. *Subbotin A.I.* Struktura polovod'ya i territorial'nye prognozy vesennego stoka rek v nechernozemnoi zone evropeiskoi territorii Rossii [Flood Structure and Territorial Forecasts of Spring River Runoff in the Non-Chernozem Zone of European Russia]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978. 98 p. [in Russ.].

51. *Frolova N.L.* Gidrologiya rek (antropogennye izmeneniya rechnogo stoka). Uchebnoe poso-bie [Hydrology of rivers (anthropogenic changes in river flow). Tutorial]. Moscow: Faculty of Geography MSU Publ., 2006. 111 p. [in Russ.].

52. *Frolova N.L., Agafonova S.A., Nesterenko D.P., Povalishnikova E.S.* Estestvennaya zare-gulirovannost' stoka rek basseina Volgi v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Natural regulation of the flow of rivers in the Volga basin in a changing climate]. *Vodnoe khozyai-stvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2013, no. 6, pp. 32-49. [in Russ.].

53. *Churyulin E.V., Kopeikin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulina A.G.* Analiz kharak-teristik snezhnogo pokrova po sputnikovym i model'nym dannym dlya razlichnykh vodosbo-rov na Evropeiskoi territorii Rossiiskoi Federatsii [Analysis of Snow Cover Characteristics Based on Satellite and Model Data for Various Watersheds in the European Territory of the Russian Federation]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasts]. 2018, no. 2(368), pp. 120-143. [in Russ.].

54. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Nat Hazards*. 2017, vol. 88, pp. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2

55. *Li K., Huang G., Baetz B.* Development of a Wilks feature importance method with improved variable rankings for supporting hydrological inference and modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2021, vol. 25, issue 9, pp. 4947-4966. DOI: 10.5194/hess-25-4947-2021

56. *Merz R., Tarasova L., Basso S.* The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany. *Environmental Research Letters*. 2020, vol. 15, 114024. DOI: 10.1088/1748-9326/abb9dd.

57. *Schmidt L., Heße F., Attinger S., Kumar R.* Challenges in Applying Machine Learning Models for Hydrological Inference: A Case Study for Flooding Events Across Germany. *Water resources research*. 2020, vol. 56. DOI: 10.1029/2019WR025924.

Поступила 28.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 28.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-117-146
УДК 504.453

Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона

Н.А. Варенцова [1,2], М.Б. Киреева [2], М.А. Харламов [2], М.И. Варенцов [3], Н.Л. Фролова [2], Е.С. Повалишникова [2]

[1] Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Москва, Россия;
[2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
[3] Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
kireeva_mb@mail.ru

Представлен анализ формирования весеннего стока на реках Русской равнины. Приведен краткий обзор исследований, посвященных динамике отдельных характеристик климата и половодий рек на Русской равнине за последние 40 лет. Показано, что в результате климатических изменений и антропогенного влияния на процессы формирования талого стока во много определяющими стали не приходные, а расходные факторы, обуславливающие его потери. Разработана и верифицирована схема факторов формирования половодья на примере рек бассейна Дона, наиболее сложного с точки зрения формирования половодья. По результатам проверки на 11 водосборах, расположенных в бассейне Дона, определены три наиболее значимые фактора формирования весеннего стока: отсутствие значимой связи стока половодья с запасом воды в снеге; увеличение роли влажности почвы и глубины ее промерзания; выявлена большая роль скорости таяния снежного покрова в период непосредственно перед началом весеннего половодья. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения данной схемы исследования в других регионах.

Ключевые слова: сток весеннего половодья, реки бассейна Дона, динамические, квазипостоянные и антропогенные факторы

Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. II. Reassessment in modern conditions on the example of the Don basin rivers

N.A. Varentsova [1,2], M.B. Kireeva [2], M.A. Kharlamov [2], M.И. Varentsov [3], N.L. Frolova [2], E.S. Povalishnikova [2]

[1] Central Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Moscow, Russia;
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
[3] Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
kireeva_mb@mail.ru

The analysis of the formation of spring runoff on the rivers of the Russian Plain is presented. A brief review of the studies dealing with the dynamics of individual climate characteristics and river floods on the Russian Plain in the past 40 years is given. It was shown that as a result of climate change and anthropogenic impact on the formation of snowmelt runoff, not incoming but outgoing factors causing its loss have become decisive. The scheme of the spring flood formation factors was developed and verified for the rivers of the Don basin, which is the most complex one in terms of the spring flood formation. According to the verification for 11 catchments situated in the Don basin, three most significant factors of the spring flood formation were identified: the absence of the significant correlation between the spring flood runoff and snow water equivalent; an increasing role of soil moisture and freezing depth; a great role of the snowmelt rate during the period just before the spring flood. The results allow making a conclusion on a possibility of applying this research scheme in other regions.

Keywords: spring flood runoff, Don basin rivers, dynamic, quasi-permanent, and anthropogenic factors

Введение

Изучение весеннего половодья как основной фазы водного режима рек Русской равнины в последние годы становится все более актуальным. Данному аспекту посвящено огромное количество научно-исследовательских работ, анализ которых был приведен в первой части исследования, опубликованного в данном сборнике.

Сложность процесса формирования половодья связана с тем, что, с одной стороны, он сильно зависит от зональных факторов – распределения снежного покрова, морозности зим, характеристик промерзания почвы, которые в том числе подвергаются влиянию изменений климата, с другой стороны, в не меньшей степени на него влияют и азональные факторы, к которым можно отнести особенности пространственного распределения почвенного покрова, геологическое строение водосбора, степень сельскохозяйственной освоенности и прямого антропогенного воздействия.

Многофакторность, обусловленная всеми этими аспектами, приводит к тому, что изучение характеристик половодья чаще всего делается на региональном уровне, который позволяет снизить количество необходимых анализируемых показателей и упростить весьма сложные расчеты, исключив из них наименее важные для данного конкретного региона величины. Только понижение размерности вычислений и сужение спектра параметров позволяют подойти к вопросам выделения основных ключевых факторов, которые могут быть использованы в качестве потенциальных предикторов для составления прогнозных зависимостей. При этом даже методы физико-математического моделирования порой не могут дать исчерпывающий ответ относительно того, что именно влияет на формирование высоты и объема половодных пиков в наиболее сложных с точки зрения условий формирования половодья регионах. Именно к таким регионам относится бассейн Дона, примеры по которому приводятся в данном исследовании.

В первой части работы проводится анализ региональных и крупномасштабных исследований, посвященных динамике характеристик весеннего половодья для рек Русской равнины на основе литературных источников. Показано, что именно на юге Европейской территории России изменение характеристик весеннего половодья носит наиболее масштабный и беспрецедентный характер за всю историю гидрологических наблюдений. Объектом регионального исследования выбран бассейн Дона, в котором эта закономерность проявилась наиболее ярко. В рамках работы выдвинуто несколько гипотез относительно возможных процессов трансформации стокоформирования в период весеннего половодья, проведен анализ и проверка выдвинутых гипотез на региональном уровне на 11 частных водосборах в пределах Донского бассейна.

Материалы и методы исследования

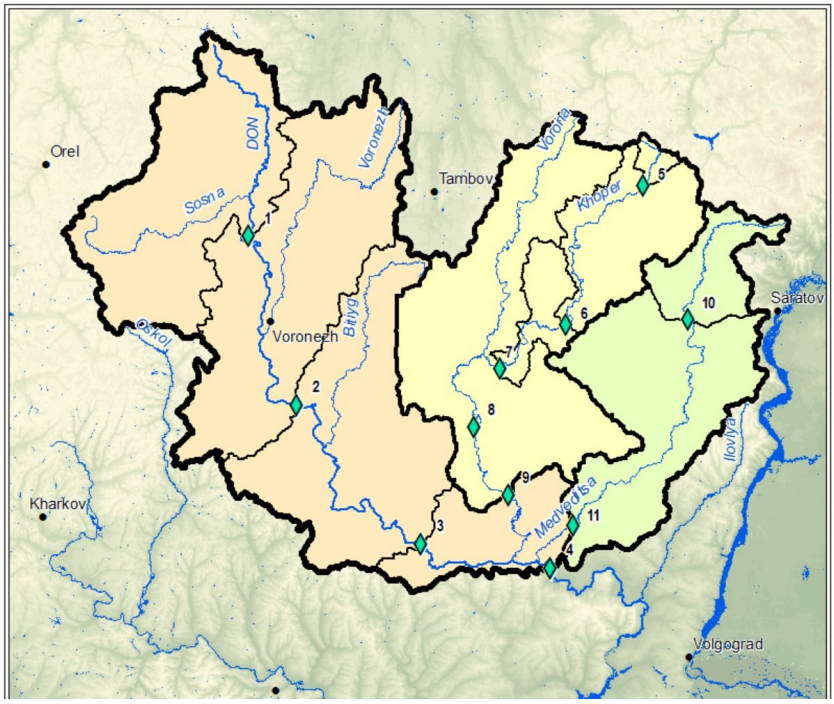
В основу исследования был положен традиционный в гидрологической практике региональный факторный анализ. На первом этапе с целью генерализации факторы формирования стока (ФФС) половодья были разделены на 17 групп. В качестве входной метеорологической информации использованы данные реанализа ERA-5 с шагом 0,25° по широте и долготе. На их основе сформирован массив более чем из 200 потенциальных характеристик ФФС половодья (табл. 1). Он включил в себя различные параметры режима температуры и осадков, тренды на выделенных интервалах времени, глубины промерзания почвы, влажности почвы и ее класса. Потенциальные ФФС охватывают период от предшествующего лета до окончания таяния снежного покрова.

Также был проведен сравнительный анализ ряда исследований, посвященных непосредственно изменению основных предиктантов – характеристик весеннего половодья. Исследования отбирались по географическому признаку и перечню изучаемых показателей – максимальных расходов воды и объемов стока весеннего половодья.

Для подтверждения сформулированных обобщений и выдвинутых гипотез в качестве регионального примера в данной работе на 11 водосборах в пределах бассейна Дона (зона недостаточного увлажнения) количественно исследовались особенности влияния различных факторов (запаса воды в снежном покрове, глубины промерзания и предзимней влажности почвы) на формирование стока половодья. В качестве тестовых бассейнов использованы посты на Дону и двух его главных притоках – Хопре и Медведице. На р. Дон взято четыре пункта – Задонск, Лиски, Казанская и Беляевский. На р. Хопер – Пановка, Балашов, Поворино, Бесплемяновский и Барминский, а на р. Медведице – Лысые Горы и Арчединская. Таким образом, в работе задействованы водосборы площадью от 932 до 204 000 км^2 (рис. 1). Кратность увеличения площадей от верховьев к низовьям рек изменялась от 4 до 61. Для анализа использовались данные о суммарном слое стока половодья за период с 1980 по 2017 год.

Таблица 1. Краткое описание потенциальных характеристик ФФС половодья, рассчитанных по данным ERA-5
Table 1. A brief description of the potential characteristics of the freshet FFF calculated according to ERA-5 data

№	Группа факторов формирования стока	Состав показателей
F1	Снежный покров	Характерные даты, средние и максимальные запасы воды в снежном покрове за выбранные периоды, их коэффициенты вариации
F2	Средние характеристики зимнего периода	Продолжительность периода, средняя температура воздуха, суммы осадков за различные интервалы времени, их коэффициенты вариации
F3	Зимние морозы	Продолжительность периодов, средняя температура, суммы осадков и их коэффициенты вариации
F4	Зимние оттепели	Продолжительность периодов, средняя температура, суммы осадков и их коэффициенты вариации
F5	Глубина промерзания	Продолжительность периода, максимальная и средняя за период глубина промерзания
F6	Период от максимального снегозапаса до его схода	Продолжительность периодов, суммы и средние значения температур воздуха, амплитуды температур, суммы осадков (по фазам и смешанных), коэффициенты вариации, средняя глубина снежного покрова, коэффициенты трендов
F7	Период от максимального снегозапаса до перехода температуры воздуха через 0ºС	
F8	Период от перехода температуры воздуха через 0ºС до схода снежного покрова	
F9	10 дней после схода снежного покрова	
F10	Последние 10 дней зимы	
F11	Первые 10 дней весны	
F12	Последние 10 дней зимы и первые 10 дней весны	
F13	Скорость таяния	Время, скорость и коэффициенты трендов периода таяния в общем и по фазам
F14	Летняя влажность почвы	Влажность почвы за различные периоды лета
F15	Предзимняя влажность почвы	Влажность почвы за различные периоды осени
F16	Влажность конца зимы	Влажность почвы за различные периоды февраля – марта
F17	Экстремумы влажности почвы	Наибольшие и наименьшие значения влажности почвы за цикл формирования половодья, даты



№	Река	Пост	Площадь водосбора, тыс. км^2	Высота нуля графика поста, м	Природная зона
1	Дон	г. Задонск	31,1	98,09	смешанные леса, лесостепь
2		г. Лиски	69,5	77,36	смешанные леса, лесостепь
3		ст. Казанская	102,0	57,98	смешанные леса, лесостепь
4		х. Беляевский	204,0	44,20	смешанные леса, лесостепь
5	Хопер	х. Пановка	1,12	152,62	лесостепь
6		г. Балашов	14,3	100,88	лесостепь
7		г. Поворино	19,1	89,29	смешанные леса, лесостепь
8		х. Бесплемяновский	44,9	69,11	смешанные леса, лесостепь
9		х. Барминский	57,3	60,60	смешанные леса, лесостепь
10	Медведица	пгт. Лысые Горы	7,61	126,62	лесостепь
11		ст. Арчединская	33,7	63,51	лесостепь, степь

Рис. 1. Обзорная карта района исследований. Бассейны: I – р. Дон; II – р. Хопер; III – р. Медведица. Арабскими цифрами указаны положения замыкающих створов частных водосборов, приведенных в таблице.
Fig. 1. Overview map of the research area. Watersheds: I – the Don River; II – the Hoper River; III – the Medveditsa River. Arabic numerals indicate the positions of the closing gates of private catchments shown in the table below.

Все метеорологические характеристики для выбранных водосборов рассчитаны за 1980–2017 гг. по данным реанализа ERA5 [45] и усреднены в границах водосборов.

Для определения наиболее весомых для половодья ФФС проведен статистический регрессионный анализ. Он включил в себя:

– определение парных коэффициентов корреляции между слоем стока половодья каждого водосбора и потенциальными ФФС;

– построение двух- и трехпараметрических уравнений линейной регрессии для определения комбинаций ФФС, наиболее точно описывающих сток половодья;

– определение для этих уравнений коэффициентов корреляции между предикторами для снижения неустойчивости решений;

– определение множественного коэффициента корреляции, среднеквадратической ошибки уравнения и уровня значимости полученной зависимости.

Кроме того, выделялись используемые ФФС и их принадлежность к назначенным группам.

Двухпараметрические уравнения составлялись для всех возможных комбинаций ФФС за исключением пар, на которые были наложены ограничения в силу их высокой скоррелированности. Построение трехпараметрических уравнений шло на основе 200 лучших двухпараметрических уравнений.

Все основные и вспомогательные программы для этого анализа написаны в средах Python и Matlab.

Изменение климата и его влияние на формирование стока половодья в XXI веке

Взгляд российских ученых

С течением времени сокращение гидрометеорологической сети и программ наблюдений в сочетании с изменением климата привели к невозможности использования установленных ранее статистических связей стока половодья и определяющих его факторов с первоначальным уровнем достоверности. Направленность, скорость изменения, а также степень их влияния на весеннее половодье оказались различны. Поэтому современное состояние и динамика основополагающих факторов формирования стока и происходящих процессов требуют краткого описания.

Циркуляция атмосферы. Практически все динамические факторы весеннего половодья связаны с атмосферной циркуляцией, которая, выступая первостепенным косвенным фактором, характеризует глобальные условия их формирования.

Восточно-Европейская равнина находится под действием Исландского и Алеутского минимумов, Азорского и Сибирского максимумов, для описания действия которых наиболее часто прибегают к использованию индексов циркуляции атмосферы: североатлантического

колебания или NAO, восточно-атлантического колебания или EA, арктического колебания или AO, колебания полярной области или Pol, Южного колебания, или SOI, тихоокеанского колебания или NPI [5, 27, 30].

В современных условиях в зимний период (в частности, в январе) NAO и EA оказывают наибольшее влияние на формирование стока практически со всей территории Восточно-Европейской равнины за исключением районов к югу от 50° с. ш. (Нижняя Волга, Средний Дон, устья Хопра и Медведицы). При одновременной положительной фазе NAO и EA траектории движения циклонов смещаются к северу от 50–52° с. ш., обуславливая развитие маловодья в бассейне Дона и Нижней Волги. Зимой это дополнительно приводит к развитию положительной аномалии температуры воздуха (более 3 °С).

В период отрицательной фазы NAO и EA траектории движения циклонов смещаются к югу с разной интенсивностью, что способствует росту влагозапасов в пределах водосборов центра и юга равнины. При отрицательных фазах NAO и EA наблюдается обратная тенденция с аномалией до –5 °С и усилением процессов блокирования западного переноса, что крайне важно для формирования устойчивого холодного периода в зимние месяцы [25].

В последние десятилетия наблюдается положительная фаза NAO в январе–марте начиная примерно с конца 1970-х гг., в апреле – с 1990-х гг. В среднем за зимние месяцы (декабрь–февраль) положительная аномалия индекса сохраняется с 1980-х гг. Одновременно с этим для октября отмечаются устойчивый отрицательный тренд интенсивности NAO и преобладание его отрицательной фазы начиная с 1980-х гг., а в зимний период наблюдаются преобладание и усиление положительной фазы EA [20].

С середины XX в. над Восточно-Европейской равниной значительно снизилось количество блокирующих антициклонов, которые обеспечивали формирование холодных зим и значительное промерзание почвы. Об этом также свидетельствует изменение приземного давления от +1 гПа в бассейне Нижней Волги до –5 гПа – на западе бассейнов Дона и Днепра [24].

Кроме того, в годы развития Эль-Ниньо на западе Восточно-Европейской равнины формируется положительная аномалия осадков, а в годы развития Ла-Нинья в центре и на юге равнины наблюдается отрицательная аномалия осадков на фоне отрицательной аномалии температуры преимущественно на юге и юго-востоке равнины.

На фоне изменений циркуляции атмосферы преимущественно в зимний и весенний сезоны в пределах Восточно-Европейской равнины снизилась скорость ветра. Наибольшие тренды характерны для северо-западных и центральных районов Европейской территории России: 11,8–16,5 %/10 лет, или на 39–54 % за 1977–2011 годы.

В зимние месяцы 1946–2012 гг. в пределах Восточно-Европейской равнины наблюдалось изменение приземного давления. Наибольшие градиенты этого тренда характерны для Дона, Оки и Нижней Волги, тогда как к северу они сглаживаются, а абсолютное значение аномалии давления уменьшается до –3 гПа.

Вышеописанные особенности атмосферной циркуляции указывают на ее изменение по сравнению с серединой XX в. как в целом за год, так и за период весеннего формирования стока в частности. По этой причине важным представляется сравнительный анализ факторов формирования стока в прошлом и настоящем, что необходимо не только для понимания текущих особенностей формирования половодья, но и для оценки рисков от климатических изменений в будущем.

Температура воздуха. Описанные изменения напрямую отразились на температуре воздуха – значимом опосредованно влияющем факторе формирования половодья. Для нее в пределах Восточно-Европейской равнины диагностированы положительные тренды в осенний, зимний и весенний периоды с коэффициентами 0,64, 0,43 и 0,41 °С/10 лет соответственно [5]. Тренд в зимние месяцы значим только на 18%-ном уровне достоверности, в остальные сезоны – менее чем при 1 %. Тем не менее изменение условий формирования стока в зимний период уже привело к серьезнейшим последствиям для речного стока: росту зимнего и сокращению талого стока на большей части Восточно-Европейской равнины, в особенности – в ее южной половине [22, 23, 29, 31, 53]. Эти изменения неравномерны: наибольшие зимние тренды характерны для северо-запада и запада Восточно-Европейской равнины, а наименьшие – для востока. В осенние месяцы распределение прямо противоположное, а в весенние – сравнительно равномерное с пиком лишь в нижнем течении р. Печоры.

Наблюдаемый тренд привел к увеличению числа и интенсивности зимних оттепелей, которые прежде рассматривались лишь в форме оговорок для бассейнов Оки и Дона [3, 10]. Следом сократилась продолжительность холодного периода. Так, в пределах бассейнов Волги и Дона она уменьшилась на 5–20 суток [13, 50].

Наблюдаемые тренды конца зимы – начала весны свидетельствуют о значительном снижение дружности весны на большей части Восточно-Европейской равнины, где диагностируется деградация половодья. В этих регионах увеличивается продолжительность периодов с внутрисуточным переходом температуры воздуха через 0 С. Например, коэффициент дружности половодья в бассейне Дона с 1970 г. снизился в 1,5–2 раза по сравнению с предшествующим периодом [10]. В результате увеличились доли испарения и фильтрации влаги в структуре формирования весеннего половодья.

Атмосферные осадки. Изменение температурного режима зимнего периода привело к существенным последствиям в режимах накопления атмосферных осадков, увлажнения и глубины промерзания почвы,

развития ледяной корки и испарения с поверхности снега и почвы. Примечательно, что первый фактор не всегда может быть отнесен к приходной части водного баланса. Выпадение атмосферных осадков в твердой фазе в зимние и весенние месяцы формирует приходную составляющую половодья. В то же время жидкие осадки весной в зависимости от их объема, интенсивности и типа поверхности, на которую они выпадают, могут относиться и к перераспределяющим факторам. Например, морось при определенных синоптических условиях может приводить к увеличению испарения и инфильтрации, обеспечивая постепенный сход снежной толщи без формирования ярко выраженной волны половодья.

В последние годы в пределах Восточно-Европейской равнины достоверный положительный тренд осадков диагностируется только для весенних месяцев, наиболее ярко выраженный в бассейнах рек Балтийского, Белого и Баренцева морей.

Для осенних и зимних месяцев положительный тренд незначителен, однако именно в эти периоды отмечаются наиболее серьезные изменения в структуре осадков. Количество твердых осадков на Восточно-Европейской равнине с 1936 г. сократилось на 22 %, количество смешанных осадков выросло на 35 %, а жидких – на 14 %. Примечательно, что в формировании весеннего половодья все большую роль начинают играть весенние осадки, так как отмечается рост паводковой составляющей в структуре формирования половодья [16, 17, 36, 49].

Согласно [21], твердая составляющая атмосферных осадков – запас воды в снежном покрове – по-прежнему остается основой формирования половодья. В современных климатических условиях в пределах Восточно-Европейской равнины средняя максимальная высота снежного покрова увеличивается от 10 см на юге до 80 см на севере и северо-востоке, а средний максимальный запас воды в снеге на полевых участках – от первых миллиметров на юге до 150–200 мм в бассейне Верхней и Средней Камы, низовьях Печоры и в Хибинах. На лесных участках средний максимальный запас воды в снеге составляет от 50 до 150 мм и характеризуется меньшей пространственной изменчивостью в сравнении с полевыми показателями [13].

По отношению к сумме зимних осадков максимальный снегозапас, как правило, составляет 50–70 %. В отдельные годы в южной половине ЕТР эта величина может сокращаться до 0 %, а в северной половине – увеличиваться до 90 % [22].

Ярко выражены тренды сокращения максимальных снегозапасов для бассейнов Дона и Нижней Волги [49, 50]. Для бассейнов Северной Двины, Мезени и Печоры значимые изменения в настоящее время не диагностируются. Однако стабильность роли снежного покрова как фактора в общем процессе формирования половодья не может быть доказана лишь отсутствием трендов непосредственно в рядах гидрометеорологических данных.

Ледяная корка. Изменениям подверглась и ледяная корка, характерная для регионов с частыми и интенсивными оттепелями. В XXI в. наибольшая повторяемость ее развития отмечается на Верхнем и Среднем Дону, Верхнем Днепре, а также в бассейнах рек, впадающих в Балтийское море.

В пределах Восточно-Европейской равнины средняя продолжительность залегания ледяной корки варьирует от 1,5–3,5 до 24 суток в бассейнах Кубани, Волги, Днепра, Нижнего Дона и верховьев Северной Двины в поле и до 4 суток в лесу в бассейнах Верхней Волги, Дона и Днепра. Средняя максимальная толщина ее при этом не превышает 8 мм в поле и 2 мм в лесу. На фоне современных климатических изменений отмечается повсеместное сокращение продолжительности залегания (на 25–45%/10 лет в поле и на 25–65%/10 лет в лесу) и толщины ледяной корки (в поле на 1–10 мм/10 лет или 20–35 %/10 лет в лесу в силу малых изначальных величин – на 1–5 мм/10 лет или 20–75 %/10 лет), что отчасти может сказываться на снижении коэффициента талого стока в весенний период. Наибольшие изменения зафиксированы в бассейнах Северной Двины и Печоры [5]. Изменение характеристик снежного покрова и ледяной корки отражается на процессах таяния весной и в зимние оттепели.

Снеготаяние. С середины XX в. для оценки интенсивности снеготаяния в статистических методах по-прежнему чаще всего прибегают к использованию коэффициентов стаивания, как это указывалось выше [33]. Подобное упрощение в современных условиях может приводить к значительным ошибкам. В [2] для степной и лесостепной зон бассейна Дона значения коэффициента стаивания при сумме осадков 0–10 мм за оттепель составляют 5–6 мм/°С. При выпадении во время оттепели интенсивных осадков оно повышается до 15–25 мм/°С, в отдельных случаях – до 40–50 мм/°С. Однако по материалам снегомерных съемок сокращение запаса воды до 62 мм происходит и при отрицательных среднесуточных температурах, вероятно, за счет положительных температур днем, что согласуется с [18]. Но диапазон полученных значений коэффициента стаивания для оттепелей варьирует в очень широких пределах (от 0,5 до 100 мм/(°С·сут)), что не позволяет произвести надежную оценку среднего значения [2].

Влажность и глубина промерзания почвы. Внимания требуют и изменения косвенных факторов потерь и перераспределения стока – влажности и глубины промерзания почвы. В текущих климатических условиях в пределах Восточно-Европейской равнины отмечается повсеместное снижение влажности почв в верхнем метровом слое со скоростью 0,4–1,2 мм/10 лет весной и 0,6–2,8 мм/10 лет в июле. Исключение составляют речные бассейны Северо-Кавказского федерального округа, где тренд слабоположительный. По данным [5], аридность климата Восточно-Европейской равнины растет, даже несмотря на положительный тренд суммы осенних осадков практически на всей территории равнины.

Такие тренды указывают на рост впитывающей способности водосборов в период формирования половодья. Примечательно, что отрицательный тренд весенней влажности почв наблюдается несмотря на учащение интенсивных зимних оттепелей, в течение которых на Восточно-Европейской равнине формируются условия для начала водоотдачи в почвогрунты.

Совокупное воздействие роста средней температуры воздуха в зимний период, сокращение продолжительности холодного периода и увеличение частоты и интенсивности оттепелей способствуют уменьшению глубины промерзания почвы и, следовательно, увеличению потерь талого стока на инфильтрацию. Так, по бассейну р. Волги она уменьшилась в среднем до 39–84 см, что на 24–49 % меньше, чем в первой половине XX в. Это сокращение произошло на фоне роста средней температуры зимы всего лишь на 1 °С [11, 29].

Взгляд зарубежных ученых

Работы зарубежных исследователей XXI в. и их обобщения [42, 55, 57] подтверждают практически все выводы, полученные нашими соотечественниками. Основные факторы формирования стока рассматриваются с точки зрения водного баланса и включают в себя приходные и расходные составляющие: твердые и жидкие осадки, испарение и эвапотранспирацию, влажность почвы и уровень грунтовых вод [37, 41, 46, 47].

Существенным отличием в зарубежных исследованиях в последние 30 лет является стремление к минимизации использования в качестве исходных данных результатов натурных наблюдений за всеми ФФС половодья. Так, в рекомендациях Всемирной метеорологической организации приводится целый перечень обоснований низкой точности результатов снегомерных съемок. В качестве альтернативных источников информации о запасе воды в снежном покрове и прочих потенциальных факторах рекомендованы результаты моделирования, данные реанализа и спутникового мониторинга, аэрофотосъемка [39, 54]. Испарение может быть оценено как прямыми методами, так и косвенно – через коротковолновую или длинноволновую радиацию, температуру воздуха и поверхности воды, влажность воздуха и давление водяного пара, скорость ветра. Для оценки влажности почвы на водосборе помимо прямых методов рекомендовано использование тензометрической съемки, съемки по методу электрического сопротивления (Porous blocks/electrical resistance blocks), спутниковой съемки в видимом и инфракрасном спектрах, микроволновой и гамма-съемок. В то же время для оценки потерь половодья ВМО рекомендует использование вероятностного или климатологического подходов [47, 48]. Тем не менее в отдельных работах отмечено привлечение данных полевых наблюдений [38].

В весенний период по аналогии с отечественными исследованиями для оценки скорости таяния снежного покрова чаще всего применяют

метод температурных коэффициентов, которые, например, для Северной Америки в среднем варьируют от 2–4 в апреле до 4–7 мм/ºС в июне в зависимости от залесенности водосбора.

В большом количестве зарубежных исследований подтверждается взаимосвязь между характеристиками половодья и динамикой атмосферной циркуляции. Так, в работах [38, 48, 56, 40] указывается на влияние тихоокеанской декадной осцилляции на развитие многоводного половодья и наводнений на севере США, в [34, 35] сделаны выводы о тесной связи характеристик половодья с положительной и отрицательной фазами NAO, AO, PDO, ENSO.

В части квазипостоянных ФФС половодья зарубежные исследователи чаще всего выделяют среднюю высоту водосбора, площадь оледенения и распространение вечной мерзлоты. Подтверждаются гипотезы отечественных исследователей о влиянии рельефа, залесенности и густоты лесного полога.

Влияние температуры воздуха и осадков на характеристики весеннего половодья показаны в [34, 48, 55] на примере крупнейших рек арктического бассейна и их притоков. Например, выделены как реки, для которых положительная аномалия температуры в весенний период ведет к увеличению продолжительности половодья, так и реки с противоположной реакцией. Аналогичные особенности выделены для сроков начала, объема и пика половодья с температурой воздуха и осадками в холодный период.

Определения вкладов каждого из ФФС в половодье также редки, как и в отечественной литературе, и в основном представляют собой качественные выводы [53]. Только в единичных публикациях присутствуют приближенные оценки: в [44] на основе статистического анализа установлено, что снегозапасы в бассейне р. Фрейзер (Канада) лишь на 20–40 % определяют риск высокого половодья, в то время как синоптические условия обеспечивают до 60–80 %.

В результате изменения климата и сохраняющейся антропогенной нагрузке на речные водосборы происходят драматические изменения в условиях формирования и режиме прохождения весеннего половодья. Вследствие роста температуры воздуха и жидких осадков отмечается сдвиг режимов рек умеренного и субарктического климатов с нивального на смешанный и плювиальный [39]. На более ранние сроки сдвигаются пики половодья на Аляске [40].

Значительно усложняется формы гидрографов рек со снеговым питанием: в них все чаще формируются наложенные дождевые и талодождевые [52]. Несмотря на повсеместный рост наводнений, вызванных жидкими осадками, локально в пределах умеренных и субарктических широт отмечается статистически значимый рост средней и максимальной высоты наводнений на реках со снеговым питанием, а также числа случаев и продолжительности наводнений на реках со смешанным питанием.

Изменение стока половодья рек Русской равнины в XXI веке

Современные оценки характеристик половодья и его приходных составляющих в пределах Восточно-Европейской равнины указывают не только на разную интенсивность их изменений, но и переменный знак тренда, что отражается в современной динамике характеристик стока – объеме и максимальных расходах весеннего половодья – даже в пределах крупных бассейнов [16, 31, 36, 49, 51].

Наиболее существенные тренды снижения половодного стока отмечаются в зоне недостаточного увлажнения южного склона ЕТР [49]. Например, в бассейнах Дона и Нижней Волги отмечается уменьшение максимальных расходов на 40–50 %, на Нижней Волге – до 70 %, а годовая амплитуда для суточных расходов воды уменьшилась в 2–3 раза [1, 8, 11, 22, 26, 31]. Сокращение весеннего стока в бассейнах Верхней Волги, Средней и Нижней Камы достигает 10–20% [45], а в бассейне Дона – до 50% [6, 7, 10]. Примечательно, что для Донского бассейна доля суммарного полезного объема водохранилищ составляет в среднем до 43–45 % от сокращения объема стока половодья, в бассейне Волги – до 70 %, что наглядно отражает последствия антропогенного воздействия на речные водосборы [1].

В [19] показано, что для всего бассейна Волги сокращение слоя стока половодья наблюдается на 70 % рек, а на 30 % диагностирован рост. В то же время лишь для трети из них тренды по состоянию на 2016 г. статистически значимы, в настоящее время их число удвоилось. Скорость изменений также выросла: по полученным в настоящее время оценкам сокращение объема половодья на реках с его отрицательной динамикой составило 40–60%, тогда как в 1978–2010 гг. эта величина составляла лишь порядка 10% [23].

Вслед за изменением объемных показателей половодья растет коэффициент естественной зарегулированности стока: до 0,6–0,7 на реках северного склона ЕТР и Урала, и более 0,7 – на реках бассейнов Оки, Дона и Кубани [31].

Рост слоя стока половодья наиболее часто диагностируется в горных и предгорных районах ЕТР, а также северо-западных районах и Карелии (рис. 2). На реках Северного Края и Верхней Камы статистически значимых трендов на сегодняшний день в литературе не выявлено [45, 51].

Реакция стока половодья на изменение климата и его составляющих наиболее выражена на малых водосборах. Так, на малых реках при сокращении глубины промерзания коэффициент талого стока снизился до 0,3–0,4, что подтверждается как наблюдениями на гидрологических постах, так и на воднобалансовых станциях.

Вследствие изменения климата нарушена однородность в рядах максимального стока рек южной и юго-западной частей ЕТР. В бассейнах Дона, Днепра, Оки и Нижней Волги с начала 1980-х гг. снижение максимальных расходов воды составило 40–60 %, сократилась и дисперсия

(рис. 3а). Статистически значимые отрицательные тренды диагностированы на более чем 90 % действующих стоковых постах (рис. 3б). В то же время положительные тренды выявлены для ряда рек северной части бассейна Волги и склонов Уральских гор [8, 23]. В других работах приводятся несколько отличные результаты.

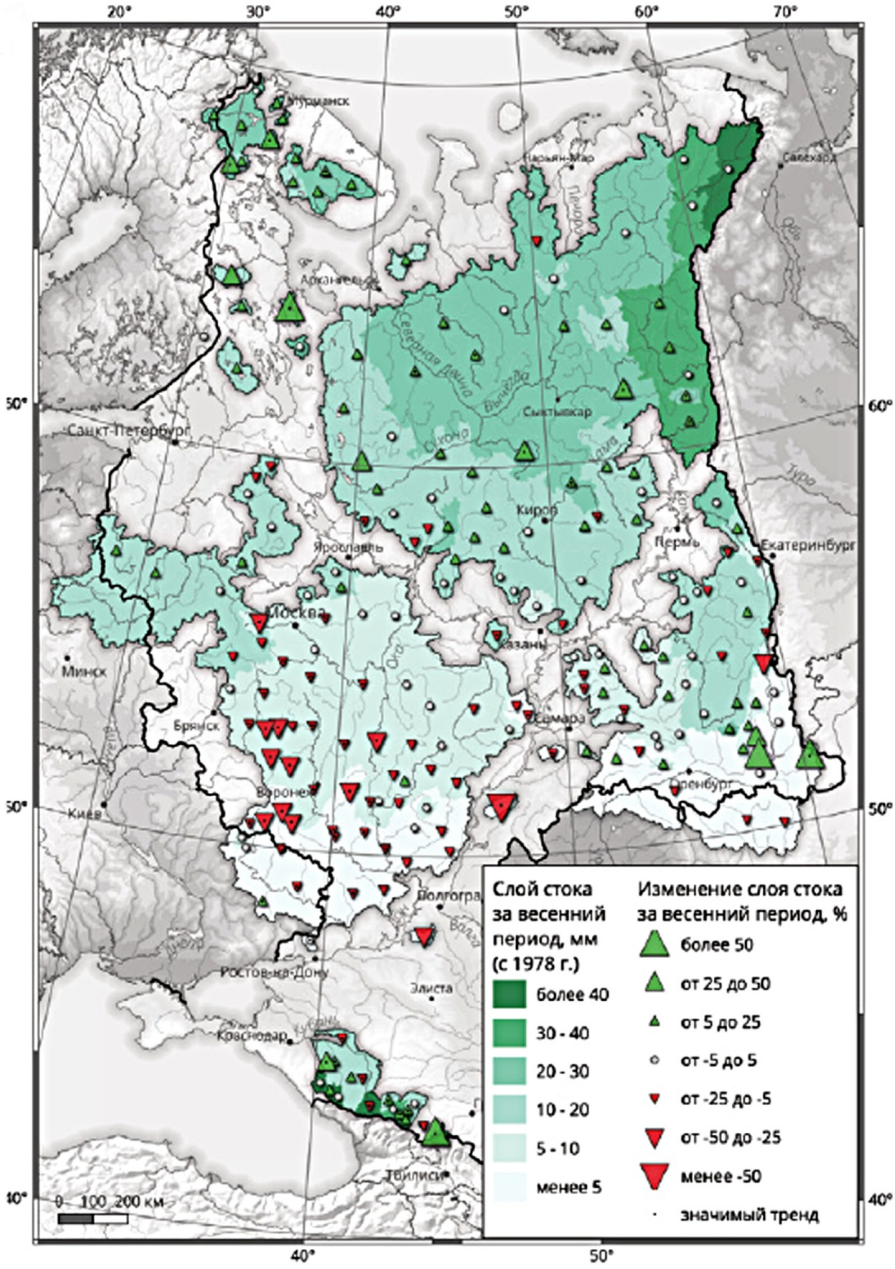


Рис. 2. Изменение слоя стока за весенний период [31].
Fig. 2. Changes in freshet flow (mm) during the spring period [31].

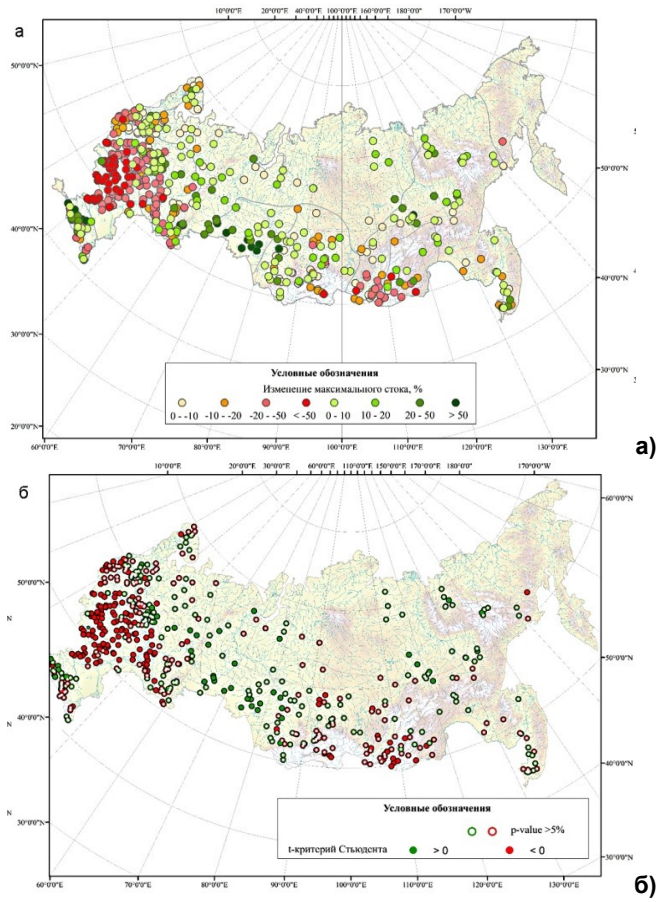


Рис. 3. Изменение максимального стока (а) и оценка его статистической значимости по критерию Стьюдента для p<5% (б) [32].
Fig. 3. Changes in the maximum flow (a) and the assessment of its statistical significance according to the Student's criterion for p<5% (б) [32].

Изменению подверглись и сроки развития весеннего половодья. Окончание половодья для южной половины ЕТР сместилось на июнь, что отмечается, например, на Медведице и Хопре, притоках Верхней и Средней Волги, Вятки и Белой. В то же время на северных реках половодье стало более растянутым: на Северной Двине, Онеге и Мезени оно теперь чаще завершается в июле.

Оценка вклада климатических и антропогенных изменений в наблюдаемую динамику стока половодья присутствует в работе [7]. Авторы указывают, что в бассейне Дона до 1980 г. вклад антропогенной составляющей в сокращение половодья превалировал, после – отошел на второй план. В то же время отмечается, что с 1930 г. по настоящее время масштабы изменения стока половодья были выше, чем межени.

Согласно проведенному анализу, бассейн Дона является регионом, для которого изменения стока половодья оказались наиболее яркими и критичными с точки зрения безопасности водообеспечения хозяйственных объектов и экономики. Поэтому именно этот регион выбран нами для подтверждения выдвинутых обобщенных тезисов и сформулированных гипотез относительно трансформации условий формирования стока половодья.

Региональный анализ формирования стока половодья в современных климатических условиях (на примере бассейна Дона)

По результатам проведенного статистического регрессионного анализа для 11 частных водосборов, расположенных в зоне недостаточного увлажнения на юге России, представления о главенствующих ФФС половодья, сформированные в середине XX в., подтвердились лишь частично. Если рассматривать отдельные парные коэффициенты корреляции стока с классическими факторами – снегозапасом на конец зимы, осенним увлажнением почвы и глубиной промерзания, то они могут быть довольно высоки. Однако при попытке построения множественной регрессии эти характеристики не попадают в уравнения с наиболее высокой теснотой связи. Максимальные коэффициенты для групп факторов, формирующих наилучшие комбинации для уравнений множественной регрессии, приведены в табл. 2.

Первая группа ФФС содержит в себе разнообразные характеристики снежного покрова и характерные даты его развития (схода, установления и проч.). Для стока половодья выбранных 11 водосборов наибольший коэффициент корреляции с величиной максимальных за год снегозапасов в большинстве случаев не превышает 0,3, и только для одного бассейна составляет 0,46.

Для второй группы факторов характерно более четкое разделение: для водосборов выше по течению связь стока половодья более тесная с суммами зимних температур (бассейны 1, 2, 5, 10 и 11), а к среднему и нижнему течению (бассейны 3, 4, 8, 9) более значимой оказывается связь с суммой осадков на конец зимы, в основном – с 10–20 февраля по дату схода снежного покрова +10 дней. Эта же зависимость полностью подтверждается для третьей группы (характеристики морозности зимы) (рис. 4).

Среди показателей оттепелей (группа 4) наиболее значимыми ФФС можно назвать число дней с оттепелями (посты 1 и 10) и его коэффициент вариации (посты 6, 8, 11), наибольшую продолжительность оттепели (2, 3, 9), а также среднюю температуру оттепели (пост 4). Особо выделяется в данном ряду пост у д. Пановка (№ 5), где наиболее весомым фактором диагностировано количество осадков за периоды оттепелей.

Таблица 2. Максимальные коэффициенты корреляций для групп определяющих факторов со стоком весеннего половодья на примере водосборов в бассейне Дона
Table 2. Maximum correlation coefficients for groups of determining factors with freshet flow on the example of the Don's watershed

Группа факторов	Бассейн Дона				Бассейн Хопра					Бассейн Медведицы	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F1	0,53	0,47	–0,5	0,43	0,33	0,23	0,3	0,35	0,37	0,33	0,26
F2	–0,61	–0,4	0,41	0,44	–0,4	0,39	0,44	0,49	0,47	–0,43	–0,32
F3	–0,59	0,51	0,56	0,48	0,44	0,28	0,28	0,45	0,43	–0,45	–0,38
F4	–0,42	–0,34	–0,26	–0,29	0,34	–0,33	–0,3	–0,42	0,31	–0,3	–0,28
F5	0,67	0,49	0,39	0,28	0,34	0,18	0,25	0,26	0,24	0,4	0,44
F6	–0,56	–0,32	0,34	0,31	0,31	0,45	0,35	0,34	0,46	–0,42	–0,39
F7	–0,61	–0,42	0,39	–0,36	0,25	0,37	0,35	0,34	0,46	–0,45	–0,29
F8	0,4	0,32	0,30	0,35	0,28	–0,39	0,3	0,31	0,3	0,36	0,3
F9	0,25	0,22	–0,36	–0,43	–0,25	–0,3	–0,34	0,37	0,34	0,3	0,28
F10	0,55	0,39	0,4	0,36	0,31	0,23	0,26	0,26	0,29	0,36	0,24
F11	0,46	0,25	0,3	0,3	0,18	–0,39	–0,26	–0,27	0,25	0,34	0,2
F12	0,54	0,36	0,38	0,35	0,23	0,23	0,18	0,26	0,28	0,36	0,24
F13	–0,65	–0,47	–0,45	–0,48	0,32	0,47	0,39	0,39	–0,5	–0,6	–0,5
F14	0,18	0,35	0,36	0,38	0,35	0,34	0,44	0,44	–0,4	–0,27	–0,24
F15	0,27	–0,33	–0,39	–0,42	0,35	0,36	0,43	0,41	0,39	0,39	0,41
F16	0,47	–0,43	–0,42	0,38	0,29	0,25	0,21	–0,42	–0,4	0,31	0,24
F17	0,45	0,45	0,54	0,54	0,43	0,5	0,57	0,47	0,54	0,48	0,38

Глубина промерзания (группа 4) значима лишь для верховий Дона (посты 1, 2, 3) и бассейна Медведицы (10, 11). При этом наиболее существенные связи отмечаются не для максимальных значений глубины промерзания, а для осредненных за декаду, как правило, незадолго до начала половодья и в начале его развития.

Во время таяния снежного покрова (группа 6) наибольшую значимость практически для всех водосборов играет продолжительность периода (посты 1, 2, 10, 11) и трендовый коэффициент температуры (3, 4, 6). Для среднего и нижнего течения р. Хопер значимую роль оказывают суммы отрицательных температур периода в силу высокой залесенности водосбора. Аналогичные результаты получены и для группы 7.

В период от перехода температуры через 0 ºС до момента схода снежного покрова (группа 8) наиболее значимы средний снегозапас (посты 1, 3, 8–11), диапазон температур (посты 2, 4), среднеквадратическое отклонение температуры (10, 7), суммы отрицательных температур (6). Схожие результаты получены для групп 9–12, однако их значимость высока в силу разного по времени охвата периодов таяния и стекания вод.

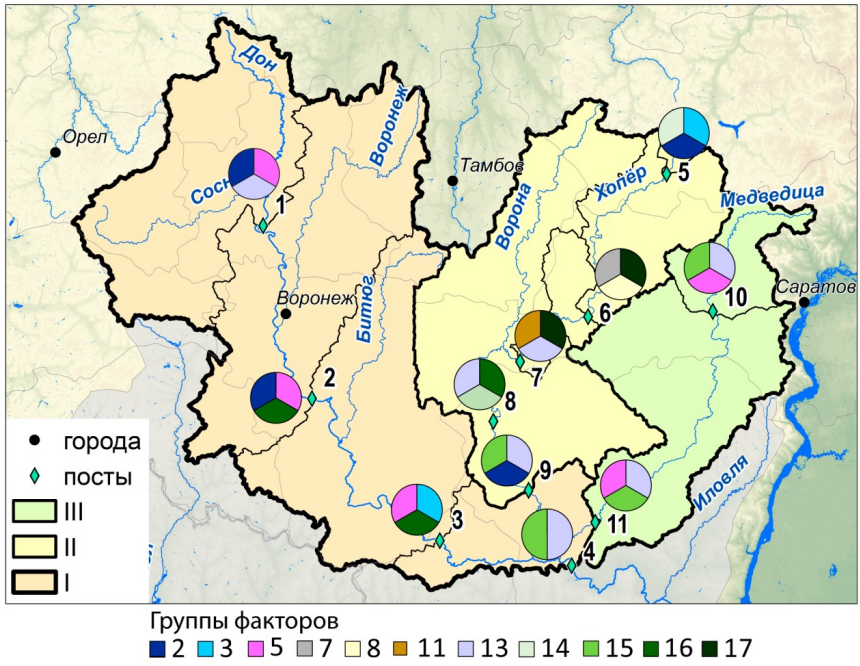


Рис. 4. ФФС половодья на исследуемых водосборах. Группы факторов соответствуют табл. 1, номера постов см. на рис. 1
Fig. 4. FFF freshet in the studied catchments. The groups of factors correspond to Table 1, see the numbers of posts in Fig. 1

В группе 13 наибольшим весом характеризуются характеристики пассивного таяния (посты 1–4), характеристики активного таяния (посты 10–11) и общая скорость стаивания (5–9).

Среди групп 14–17 наиболее выделяются характеристики типа состояния почвы на конец августа и октября (R_{max} = –0,42…–0,18), максимальная и минимальная 10-дневная влажность почвы за период формирования условий половодья (R_{max} = 0,35–0,54 и 0,08–0,57 соответственно), а также их типы (–0,53...–0,11 и –0,17…–0,47 соответственно).

Обсуждение результатов

Максимальный запас воды в снеге, традиционно рассматриваемый как ведущий фактор формирования стока половодья, утратил свою главенствующую роль в построении прогнозных методик. Для анализируемых гидрологических постов коэффициенты корреляции снегозапаса и слоя весеннего стока составили от –0,19 до 0,46. Согласно проведенным расчетам, ни для одного из 11 постов в уравнения с наиболее высокими коэффициентами множественной регрессии не вошли параметры, характеризующие максимальные или характерные снегозапасы (F1). Это чисто

статистический результат, бесспорно при построении прогнозных уравнений, в основе которых лежит метод водного баланса, этот показатель следует учитывать. На первом месте в статистически формируемых уравнениях множественной регрессии для водосборов Дона стоят либо характеристики глубины промерзания (F5), либо зимних морозов (F3). В замыкающих створах р. Дон – х. Беляевский (пост 4) и р. Хопер – х. Барминский (пост 9) и для водосборов (10, 11) на р. Медведице первый предиктор – характеристика скорости таяния (F13). В альтернативных уравнениях с чуть более низкими коэффициентами на первое место могут выходить суммы осадков с 1 ноября до конца зимы (F2) (см. табл. 2, табл. 3).

Полученный результат созвучен с тезисами, приведенными в [12, 14]. В них анализируется динамика поверхностного склонового стока и показано его заметное уменьшение в степных и лесостепных районах Русской равнины, в том числе в бассейне Дона, к которому принадлежат анализируемые в наших расчетах водосборы. В качестве приходной составляющей сейчас целесообразно рассматривать осадки холодного периода, выпадающие при различных температурах, но и они не всегда в достаточной степени могут определить формирование весеннего слоя стока. Тем не менее при составлении прогнозных зависимостей, безусловно, необходимо тем или иным образом учитывать приходную часть уравнения водного баланса для слоя стока половодья. Полученные чисто статистически уравнения множественной регрессии, имеющие наиболее высокие коэффициенты корреляции (табл. 3), показывают, что приходные компоненты в первых трех ФФС либо отсутствуют, либо могут быть представлены самыми различными параметрами. В большинстве случаев значимость приходных компонент ниже или сопоставима с иными параметрами – сроками установления снежного покрова и суммами отрицательных температур воздуха.

В то же время влажность почвы (F14 – F17), ранее считавшаяся незначимой для формирования половодья в бассейнах степных и лесостепных рек [4], на трех из четырех донских водосборах за исключением самого верхнего (г. Задонск – №1) входит в тройку ФФС, образующих наиболее тесные связи, а на Хопре и Медведице она значима для всех водосборов. Однозначного доминирующего сезона для определения влажности почвы нет – ранее считалось, что определяющим является предзимнее увлажнение почвы [4]. В бассейне Медведицы наиболее значима влажность почвы в октябре – ноябре (предзимний период), в бассейне Дона – в предзимний и предвесенний (февраль – март) периоды, а в бассейне Хопра можно рассматривать любые характеристики влажности почвы, включая ее экстремальные величины. Это созвучно с результатами, полученными в работах [12, 14]. В том числе, изменения влажности почвы и глубины промерзания носят весьма существенный характер в последние 40 лет [15–17].

Таблица 3. Примеры полученных статистическим образом зависимостей для стока половодья бассейнов № 1–11 (согласно табл.1), множественный коэффициент корреляции MR и среднеквадратическая ошибка уравнения RMSE
Table 3. Examples of statistically obtained dependencies for the flood runoff of basins No. 1-11 (according to Table. 1), multiple correlation coefficient MR and the RMSE

№	MR	RMSE	ФФС 1	ФФС 2	ФФС 3
1	0.82	11.1	*fr_depth max*	*melt_time %*	*TPsum 01.11-SP*
2	0.78	13	*fr_depth 21-31.03*	*21-28.02 swvl_type*	*TPsum 01.11-SP*
3	0.76	11	*SnowTP*	*21-31.03 swvl*	*fr_depth 21-31.03*
4	0.77	9.4	*melt_passive trend_coef*	*31.10 swvl_type*	*swvl_lin 10d_before_sd_end*
5	0.71	24.2	*subzero_temp_mean*	*TPsum 01.11-SP*	*21-31.07 swvl*
6	0.76	14.4	*min 10rollmean swvl*	*frozen_temp T0-S0*	*frozen_temp Smax-T0*
7	0.74	19.1	*min_10rollmean swvl*	*melt_time*	*frozen_temp sp-10d*
8	0.82	11.6	*swvl_lin 10d_after_sd_end*	*31.10 swvl*	*melt_speed active*
9	0.81	8.1	*melt_speed*	*TPsum 10.02-SP10*	*swvl 10d_before_sd_start*
10	0.76	11.9	*melt_trend_coef*	*fr_depth_max*	*31.10 swvl_type*
11	0.73	14.1	*melt_trend_coef*	*swvl 10d_before_sd_start*	*fr_depth 21-31.01*

Примечание к табл. 3. **F2**: *TPsum 01.11-SP* (сумма осадков с 01 ноября по конец зимы) и *TPsum 10.02-SP10* (сумма осадков с 10 февраля по конец зимы + 10 дней). **F3**: *SnowTP* (сумма твердых осадков) и *subzero_temp_mean* (средняя отрицательная температура). **F5**: *fr_depth_max* (максимальная глубина промерзания почвы), *fr_depth 21-31.03* (средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду марта), *fr_depth 21-31.01* (средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду января). **F7**: *frozen_temp Smax-T0* (сумма отрицательных температур периода). **F8**: *frozen_temp T0-S0* (сумма отрицательных температур периода). **F11**: *frozen_temp sp-10d* (сумма отрицательных температур периода). **F13**: *melt_passive trend_coef* (трендовый коэффициент пассивного стаивания), *melt_speed* (скорость стаивания в мм/день), *melt_trend_coef* (трендовый коэффициент стаивания), *melt_time %* (время стаивания в процентах от количества дней со снежным покровом), *melt_time* (время стаивания), *melt_speed active* (скорость активного стаивания в мм/день). **F14**: 21-31.07 swvl (влажность почвы последней декады июля). **F15**: *31.10 swvl_type* (тип влажности почвы на 31.10), *31.10 swvl* (влажность почвы на 31.10), *swvl 10d_before_sd_start* (влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова). **F16**: *swvl_lin 10d_after_sd_end* (линейная влажность почвы за 10 дней после схода снежного покрова), *21-28.02 swvl_type* (влажность почвы последней декады февраля), *21-31.03 swvl* (влажность почвы последней декады марта), *swvl_lin 10d_before_sd_end* (линейная влажность почвы за 10 дней до схода снежного покрова). **F17**: *min_10rollmean swvl* (минимальная 10 дневная влажнотсь почвы).

Глубину промерзания почвы в России сейчас, как и ранее, определяют по данным вытяжных термометров, установленных на разную глубину (20–320 см) на сети метеорологических станций, а вот контактные измерения влажности почвы проводятся крайне редко [3, 4, 28]. Причиной тому до сих пор является низкая плотность агрометеорологической сети, ограничения по синоптическим условиям и высокая трудоемкость измерений. Поэтому увлажненность водосборов, т. е. способность впитывать дополнительную влагу, оценивается в основном косвенно по температуре и осадкам, измеряемым на метеостанциях. В зарубежной практике чаще используют данные дистанционного зондирования земли, в том числе данные эксперимента GRACE [9, 55, 57], но пока в прогнозировании весеннего стока рек Русской равнины эта информация практически не применяется. Между тем изменения глубины промерзания и ее влияние на формирование слоя стока половодья – значительны. Так, например, считающаяся исключительно значимой для Хопра [4] глубина промерзания почвы сейчас не оказывает существенное влияние на половодье в этом регионе. Она попадает в тройку значимых ФФС в бассейне Верхнего Дона (посты 1, 2), а также в бассейне Медведицы (посты 10, 11) с коэффициентами корреляции до 0,57.

Одновременно с этим крайне важную роль в последние три десятилетия стали играть параметры группы скорости таяния снежного покрова (F13) с коэффициентом корреляции от –0,65 до 0,55, входящие в первые три ФФС для 7 из 11 водосборов.

Основные причины роста потерь стока в весенний период авторы видят как в климатических изменениях характеристик зимнего периода, так и в трансформации ландшафта, а именно в изменениях методов культивации полей. В частности, в различных работах подчеркивается увеличение распашки полей осенью с 25 до 50 % от 1950-х до 1960–1970 гг. [12, 14]. Позднее, в 1978–2013 гг., осенью распахивалось в среднем 36,5 %, а после 2013 г. – 25–28 % пахотных земель.

Примечательно, что сформированный в 1950–1960-х гг. вид зависимости стока половодья от суммы максимального снегозапаса с осадками в период половодья, влажности почвы и глубины ее промерзания продолжает рассматриваться как основной и в современной практике. Согласно полученным нами расчетам по частным водосборам вид этой зависимости существенно трансформировался, как с точки зрения корреляционных связей, так и с точки зрения перечня параметров и периодов их определения. Так, например, для водосборов р. Хопер выше Балашова и Поворино влажность почвы характеризуется вдвое большим коэффициентом корреляции со стоком половодья, чем снежный покров. Коллективом авторов была предпринята попытка точного воспроизводства методики прогноза половодья 1972 г. [4]. Результаты показали, что вид прогнозной зависимости для замыкающего створа крупной реки (р. Дон – х. Беляевский, F= 204 000 км^2), протекающей по югу Русской равнины в зоне недостаточного увлажнения, существенно изменился [2]. На первый план вышли факторы, определяющие потери и перераспределение стока. Хотя и отказываться от приходных составляющих в уравнении в любом случае не следует, но обязательным является переоценка их значимости и индивидуальный подбор наиболее адекватных предикторов.

Выводы

К настоящему моменту представления о главенствующей роли приходных составляющих в формировании слоя стока весеннего половодья частично утратили свою актуальность. В результате климатических изменений и антропогенного влияния на процессы формирования талого стока определяющими стали не приходные, а расходные факторы, обуславливающие его потери. В этих условиях бесспорно учет приходных составляющих должен также использоваться в составлении прогнозных зависимостей, но именно степень его влияния должна быть переоценена. На современном этапе при построении прогнозных уравнений необходимо максимально расширить перечень анализируемых показателей. Частные случаи прогнозов требуют тщательного и индивидуального подбора предикторов прогнозных уравнений, групповой анализ ограниченного перечня характеристик снижает качество зависимостей. Следует так же рассматривать различные временные отрезки для их расчета.

По результатам статистического регрессионного анализа формирования весеннего стока на частных водосборах в зоне недостаточного

увлажнения юга ЕТР определены три наиболее значимые ФФС. Установлено отсутствие значимой связи стока половодья с запасом воды в снеге (коэффициенты корреляции от –0,19 до 0,46) и увеличение роли влажности почвы и глубины ее промерзания (коэффициенты корреляции выросли соответственно до 0,4–0,57 и локально до 0,67). В то же время выявлена большая роль скорости таяния снежного покрова в период непосредственно перед началом весеннего половодья. Это не значит отказ от учета приходной составляющей при составлении уравнений, но доказывает необходимость ее переоценки.

Установлено, что главенствующие группы ФФС претерпевают изменения с увеличением площади водосбора. На небольших водосборах в бассейне Дона (посты 1–4) и Хопра (посты 5–9) основную роль играют глубины промерзания и зимние морозы, в нижнем течении на первый план выходят влажность почвы и скорость стаивания снежного покрова. В бассейне Медведицы с ростом площади водосбора группы факторов остаются прежними, однако значимость параметров внутри групп меняется. Это важный результат, поскольку масштабные эффекты ФФС в принципе не рассматривались ранее в работах гидрологов XX века.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 19-77-10032 в части методов и подходов и № 21-47-00008 (корреляционный анализ).

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 19-77-10032.

Список литературы

1. *Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л.* Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91-100.

2. *Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А.* Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 694-709. DOI: 10.31857/S0321059620060152

3. *Вершинина Л.К.* Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // Труды ГГИ. 1977. Вып. 223. С. 52-65.

4. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И.* Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // Труды ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 3-30.

5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Основной том. М.: Изд-во ААНИИ, 2014. 1018 с.

6. *Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М.* Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36-79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79

7. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А.* Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1

8. *Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б.* Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6-8.

9. *Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г.* Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 36-47.

10. *Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л.* Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

11. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А.* Особенности формирования современных ресурсов подземных вод европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 457-466. DOI: 10.7868/S0321059615050065

12. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А.* Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 6. С. 674-685. DOI: 10.31857/S032105962006005X

13. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лёд и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220

14. *Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И.* Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 1. С. 37-46. DOI: 10.31857/S2587556620010100

15. *Киреева М.Б., Фролова Н.Л.* Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60-76.

16. *Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е.* Водный режим рек европейской территории России и его трансформация в XXI веке под влиянием меняющегося климата // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. Новочеркасск: ЛИК, 2018б. С. 49-55.

17. *Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Телегина Е.А., Харламов М.А., Езерова Н.Н., Пахомова О.М.* Паводочный сток на реках европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 48-68.

18. *Комаров В.Д.* Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеоиздат, 1959. 259 с.

19. *Лавров С.А., Калюжный И.Л.* Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России. № 6. 2016. С. 42-60.

20. *Михайлова Н.В., Юровский А.В.* Восточноатлантическое колебание: механизм и влияние на климат Европы в зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 27-37.

21. *Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И.* Гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне Верхнего Дона // Экология бассейна Дона. Воронеж, 2005. С. 74-75.

22. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / под ред. М.Л. Маркова. СПб.: РИАЛ, 2021. 202 с.

23. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: РИАЛ, 2021. 190 с.

24. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие: справочная монография / под ред. Р.М. Вильфанда, А.И. Неушкина. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 123 с.

25. *Нестеров Е.С.* Особенности состояния океана и атмосферы в разных фазах северо-атлантического колебания // Метеорология и гидрология. 1998. № 8. С. 74–82.

26. *Осипова Н.В., Болгов М.В.* Оценка характеристик максимального стока весеннего половодья в бассейне р. Дон в нестационарных условиях // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 686-693. DOI: 10.31857/S0321059620060103

27. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. 289 с.

28. РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть I. Основные агрометеорологические наблюдения. Книга 1. М.: Росгидромет, 2000. 87 с.

29. *Сафина Г.Р., Голосов В.Н.* Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского ун-та. Серия Естественные науки. 2018. № 1. С. 111-125.

30. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. и др.; науч. ред. Э.П. Наумов. Казань: Казанский ун-т, 2013. 224 с.

31. *Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К.* Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 14-26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26

32. *Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И.* Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Том 49, № 3. С. 251-269. DOI: 10.31857/S032105962203004X

33. *Шихов А.Н., Абдуллин Р.К.* Мониторинг формирования и прохождения весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища в 2014 г. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: https://science-education.ru /ru/article/view?id=13834 (дата обращения 12.03.2022).

34. *Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B.* Eeffects of climatic drivers and teleconnections on late 20th century trends in spring freshet of four major arctic-draining rivers // Water. 2021. Vol. 13. P. 179. DOI: 10.3390/w13020179

35. *Assani A.A.* Analysis of the Influence of the 2007–2008 La Niña Events, Land Use, and Dam Management Modes on the 2008 Spring Freshet Characteristics in Quebec, Cana // Flood Risk Management. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68646

36. *Blöschl G. Hall J., Viglione A. et al.* Changing climate both increases and decreases European river floods // Nature. 2019. Vol. 573. P. 108-111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6

37. *Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al.* Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. Vol. 357. P. 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506

38. *Burn D.H., Cunderlik J.M., Pietroniro A.* Hydrological trends and variability in the Liard River basin. Tendances hydrologiques et variabilité dans le basin de la rivière Liard // Hydrological Sciences Journal. 2004. Vol. 49:1. P. 53-67. DOI: 10.1623/hysj.49.1.53.53994

39. *Burn D.H., Whitfield P.H.* Changes in flood events inferred from centennial length streamflow data records // Advances in Water Resources. 2018. Vol. 121. P. 333–349. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.08.017

40. *Curran J.H., Biles F.E.* Identification of seasonal streamflow regimes and streamflow drivers for daily and peak flows in Alaska // Water Resources Research. 2021. Vol. 57. E2020WR028425. DOI: 10.1029/2020WR028425

41. *Davie T.* Fundamentals of hydrology. Second edition. Taylor & Francis. London; New York, 2008. 221 pp.

42. *Dery S.J., Stahl K., Moore R.D., Whitfield P.H., Menounos B., Burford J.E.* Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada // Water Resources Research. 2009. Vol. 45. W04426. DOI: 10.1029/2008WR006975

43. ERA5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5 (дата обращения 15.05.2020).

44. Flow Forecasting for the Lower Fraser River (from Hope to the Ocean, River Forecast Centre B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations Water Management

Branch. 2012. 5 p. URL: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow_forecasting_lower_fraser.pdf (дата обращения 12.03.2022).

45. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V. et al.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // Natural Hazards. 2017. Vol. 88. P. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2

46. Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No.168. Sixth Edition. 2008. URL: https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO_Guide_168_Vol_I_en.pdf (дата обращения 22.03.2022).

47. Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and other Applications WMO-No.168. Fifth Edition. 1994. URL: https://www.slideshare.net/indiawrm/guide-to-hydrological-practices-data-acquisition-and-processing-analysis-forecasting-and-other-applications-wmono168-fifth-edition-1994 (дата обращения 22.03.2022).

48. *Jones N.E., Petreman I.C., Schmidt B.J.* High flows and freshet timing in Canada: observed trends. 42 climate change research report (CCRR-42). Ministry of Natural resources and forestry. Ontario, 2015. 24 p.

49. *Kharlamov M., Kireeva M., Varentsova N.* Spring freshet on East European plain: changes in drivers and conditions during last three decades. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021. 2021. EGU21-13477. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-13477

50. *Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G.* Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016 // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12(2). P. 62-77. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.

51. *Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M.* Long-term Changes of River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector // Polarforschung. 2018. Vol. 87(2). P. 177–194. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177

52. *Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W.* Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? // Hydrological Processes. 2017. Vol. 31. P. 4354-4370. DOI: 10.1002/hyp.11365

53. *Naikm P.K., Jay D.A.* Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: changes in the disturbance processes. Cold Region Hydrology in a Changing Climate, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 346. 2011. P. 21-26.

54. *Partasenok I.S., Groisman P.Y., Chekan G.S., Melnik V.I.* Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus // Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9(9). 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005

55. *Prowse T.D., Wrona F.J., Reist J.D., Gibson J.J., Hobbie J.E., Le´vesque L.M.J., Warwick F.V.* Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems // Royal Swedish Academy of Sciences. 2006. Vol. 35, No. 7. P. 347-358.

56. *Rood S.B., Foster S.G., Hillman E.J., Luek A., Zanewich K.P.* Flood moderation: Declining peak flows along some Rocky Mountain rivers and the underlying mechanism // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 536. P. 174-182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.043

57. *Walker B.J., Marsh P.Dr.* High resolution spatial variability in spring snowmelt for an Arctic shrub-tundra watershed 2019. Theses and Dissertations (Comprehensive). 2116. https://scholars.wlu.ca/etd/2116

References

1. *Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L.* Vliyanie klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Climatic and anthropogenic impacts on spring runoff in the Don River basin]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr*. [Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography], 2021, no. 5, pp. 91-100. [in Russ.].

2. *Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A.* Prognoz pritoka vody k Tsimlyanskomu vodokhranilishchu v period polovod'ya v sovremennykh

kli-maticheskikh usloviyakh: problemy i vosproizvodimost' [Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility]. *Water resources*. 2020, vol. 47, no. 6, pp. 953-967. DOI: 10.1134/S0097807820060159

3. *Vershinina L.K.* Metodika rascheta i prognoza ob"ema stoka vesennego polovod'ya v basseine r. Dona [Methodology for calculating and forecasting the volume of spring flood runoff in the basin of the Don river]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1977, is. 223, pp. 52-65. [in Russ.].

4. *Vershinina L.K., Krestovskii O.I.* Uchet vodopoglotitel'noi sposobnosti vodosborov pri prognozakh stoka vesennego polovod'ya [Accounting for the water absorption capacity of watersheds in forecasting spring flood runoff]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI], 1980, is 265, pp. 3-30. [in Russ.].

5. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Osnovnoi tom [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Main volume]. Moscow: AANII Publ., 2014, 1018 p. [in Russ.].

6. *Gel'fan A.N., Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M.* Vliyanie izmeneniya klimata na godovoi i maksimal'nyi stok rek Rossii: otsenka i prognoz [The impact of climate change on the annual and maximum runoff of Russian rivers: assessment and forecast]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36-79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79 [in Russ.].

7. *Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Kashutina E.A.* Sovremennye i stsenarnye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Modern and scenario changes in the flow of the Volga and Don]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2017, no. 3, pp. 6-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1 [in Russ.].

8. *Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B.* Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v basseine verkhnei Volgi pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenii [Transformation of Spring Flood Runoff and Floods in the Upper Volga Basin Under the Influence of Climate Change]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2021, no. 4, pp. 6-8. [in Russ.].

9. *Grigor'ev V.Yu., Frolova N.L., Dzhamalov R.G.* Izmenenie vodnogo balansa krupnykh rechnykh basseinov evropeiskoi chasti Rossii [Changes in the water balance of large river basins in the European part of Russia]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2018, no. 4, pp. 36-47. [in Russ.].

10. *Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Rets E.P., Bugrov A.A.* Osobennosti formirovaniya sovremennykh resursov podzemnykh vod evropeiskoi chasti Rossii [Formation of current groundwater resources in European Russia]. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 5, pp. 563-571. DOI: 10.1134/S009780781505005X

11. *Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L.* Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie [Water resources of the Don basin and their ecological state]. Moscow: GEOS Publ., 2017, 204 p. [in Russ.].

12. *Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A.* Landscape-hydrological changes in the Don basin. *Water Resources*. 2020, vol. 47, no. 6, pp. 934-944. DOI: 10.1134/S0097807820060056

13. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na glubinu promerzaniya pochv v basseine r. Volga [Influence of climatic changes on the depth of soil freezing in the basin of the river. Volga]. *Led i sneg* [Ice and snow]. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220. [in Russ.].

14. *Kashutina E.A., Yasinskii S.V., Koronkevich N.I.* Vesennii poverkhnostnyi sklonovyi stok na Russkoi ravnine v gody razlichnoi vodnosti [Spring slope runoff on the Russian plain in years of different water content]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [News of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]. 2020, no. 1, pp. 37-46. DOI: 10.31857/S2587556620010100. [in Russ.].

15. *Kireeva M.B., Frolova N.L.* Sovremennye osobennosti vesennego polovod'ya rek basseina Dona [Modern Features of the Spring Flood in the Rivers of the Don Basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2013, no. 1, pp. 60-76. [in Russ.].

16. *Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P., Samsonov T.E.* Vodnyi rezhim rek evropeiskoi territorii Rossii i ego transformatsiya v XXI veke pod vliyaniem menyayushchegosya klimata [The water regime of the rivers of the European territory of Russia and its transformation in the 21st century under the influence of a changing climate]. *Vodnye resursy Rossii: sovremennoe sostoyanie i upravlenie: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Water resources of Russia: current state and management: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Vol. 1. Novocherkassk, LIK, 2018, pp. 49-55| [in Russ.].

17. *Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P., Samsonov T.E., Telegina E.A., Kharlamov M.A., Ezerova N.N., Pakhomova O.M.* Pavodochnyi stok na rekakh evropeiskoi territorii Rossii i ego rol' v formirovanii sovremennogo vodnogo rezhima [Flood runoff on the rivers of the European territory of Russia and its role in the formation of the modern water regime]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2018, no. 4, pp. 48-68. [in Russ.].

18. *Komarov V.D.* Vesennii stok ravninnykh rek evropeiskoi chasti SSSR, usloviya ego formirovaniya i metody prognozov [Spring Runoff of Plain Rivers in the European Part of the USSR, Conditions for Its Formation and Methods of Forecasting], Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1959, 259 p. [in Russ.].

19. *Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L.* Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na stok vesennego polovod'ya i faktory ego formirovaniya v basseine Volgi [Influence of climate change on spring flood runoff and factors of its formation in the Volga basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia], 2016, no. 6, pp. 42-60. [in Russ.].

20. *Mikhailova N.V., Yurovskii A.V.* Vostochnoatlanticheskoe kolebanie: mekhanizm i vliyanie na klimat Evropy v zimnii period [East Atlantic Oscillation: mechanism and influence on the European climate in winter]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 2016, no. 4, pp. 27-37[in Russ.].

21. *Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I.* Gidrologicheskoe obosnovanie vodokhozyaistven-nykh meropriyatii v basseine Verkhnego Dona [Hydrological substantiation of water management activities in the Upper Don basin]. *Ekologiya basseina Dona* [Ecology of the Don basin]. Voronezh, 2005, pp. 74-75. [in Russ.].

22. Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobalansovykh i bolotnykh stantsiyakh: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term changes in water balance elements at water balance and bog stations: scientific and applied reference book]. M.L. Markova (Ed.). Saint-Petersburg.: RIAL Publ., 2021, 202 p. [in Russ.].

23. Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation: scientific and applied reference book]. V.Yu. Georgievskogo (Ed.), Saint-Petersburg: RIAL Publ., 2021, 190 p. [in Russ.].

24. Monitoring obshchei tsirkulyatsii atmosfery. Severnoe polusharie: spravochnaya monografiya, R.M. Vil'fanda, A.I. Neushkina (Ed.), Obninsk: VNIIGMI-MTsD Publ., 2012, 123 p. [in Russ.].

25. *Nesterov E.S.* Osobennosti sostoyaniya okeana i atmosfery v raznykh fazakh severo-atlanticheskogo kolebaniya [Peculiarities of the State of the Ocean and the Atmosphere in Different Phases of the North Atlantic Oscillation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1998, no. 8, pp. 74-82. [in Russ.].

26. *Osipova N.V., Bolgov M.V.* Assessing the characteristics of the maximal spring flood runoff in the Don basin under nonstationary conditions. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 945-952. DOI: 10.1134/S009780782006010X

27. Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Tom II. Posledstviya izmenenii klimata [Assessment report on climate

change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Volume II. The consequences of climate change]. Moscow: Rosgidromet, 2008, 289 pp. [in Russ.].

28. RD 52.33.217-99. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 11. Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh i postakh. Chast' I. Osnovnye agrometeorologicheskie nablyudeniya. Kniga 1 [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 11. Agrometeorological observations at stations and posts. Part I. Basic agrometeorological observations]. Moscow: Rosgidromet, 2000, 87 p. [in Russ.].

29. *Safina G.R., Golosov V.N.* Vliyanie izmenenii klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka malykh rek yuzhnoi poloviny Evropeiskoi territorii Rossii [The impact of climate change on the intra-annual distribution of runoff of small rivers in the southern half of the European territory of Russia]. *Uchenye zapiski Ka-zanskogo un-ta. Seriya Estestvennye nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences]. 2018, no. 1, pp. 111-125. [in Russ.].

30. Teoriya obshchei tsirkulyatsii atmosfery: uchebnoe posobie [The Theory of General Circulation of the Atmosphere: A Study Guide]. E.P. Naumov (Ed.), Kazan': Kazanskii un-t Publ., 2013, 224 p[in Russ.].

31. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lur'e I.K.* Kartografirovanie sovremennogo sostoyaniya i transformatsii vodnogo rezhima rek Evropeiskoi territorii Rossii [Mapping the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 2020, no. 7, pp. 14–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26 [in Russ.].

32. *Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I.* Stok rek Rossii pri proiskhodyashchikh i prognoziruemykh izmeneniyakh klimata: obzor publikatsii. 1. Otsenka izmenenii vodnogo rezhima rek Rossii po dannym nablyudenii [Runoff of Russian rivers under ongoing and predicted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers based on observational data]. *Water resources*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 251-269. DOI: 10.31857/S032105962203004X [in Russ.].

33. *Shikhov A.N., Abdullin R.K.* Monitoring formirovaniya i prokhozhdeniya vesennego polovod'ya na rekakh vodosbora Votkinskogo vodokhranilishcha v 2014 g [Monitoring of the formation and passage of the spring flood on the rivers of the watershed of the Votkinsk reservoir in 2014]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 4, available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=13834. [in Russ.].

34. *Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B.* Eeffects of climatic drivers and teleconnections on late 20th century trends in spring freshet of four major arctic-draining rivers. *Water*, 2021, vol. 13, pp. 179. DOI: 10.3390/w13020179

35. *Assani A.A.* Analysis of the Influence of the 2007–2008 La Niña Events, Land Use, and Dam Management Modes on the 2008 Spring Freshet Characteristics in Quebec, Cana. *Flood Risk Management*, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68646

36. *Blöschl G. Hall J., Viglione A. et al.* Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature*, 2019, vol. 573, pp. 108–111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6

37. *Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al.* Changing climate shifts timing of European floods, *Science*, 2017, vol. 357, pp. 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506

38. *Burn D.H., Cunderlik J.M., Pietroniro A.* Hydrological trends and variability in the Liard River basin. Tendances hydrologiques et variabilité dans le basin de la rivière Liard. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, vol. 49:1, pp. 53–67. DOI: 10.1623/hysj.49.1.53.53994

39. *Burn D.H., Whitfield P.H.* Changes in flood events inferred from centennial length streamflow data records. *Advances in Water Resources*, 2018, vol. 121, pp. 333-349. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.08.017

40. *Curran J.H., Biles F.E.* Identification of seasonal streamflow regimes and streamflow drivers for daily and peak flows in Alaska, *Water Resources Research*, 2021, vol. 57, E2020WR028425. DOI: 10.1029/2020WR028425

41. *Davie T.* Fundamentals of hydrology. Second edition. Taylor & Francis. London, New York, 2008. 221 p.

42. *Dery S.J., Stahl K., Moore R.D., Whitfield P.H., Menounos B., Burford J.E.* Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W04426. DOI: 10.1029/2008WR006975

43. ERA5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), available at: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5.

44. Flow Forecasting for the Lower Fraser River (from Hope to the Ocean, River Forecast Centre B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations Water Management Branch. 2012, 5 p., available at: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow_forecasting_lower_fraser.pdf.

45. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V. et al.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, pp. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2

46. Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No.168. Sixth Edition. 2008, available at: https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO_Guide_168_Vol_I_en.pdf.

47. Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and other Applications WMO-No.168. Fifth Edition. 1994. available at: https://www.slideshare.net/indiawrm/guide-to-hydrological-practices-data-acquisition-and-processing-analysis-forecasting-and-other-applications-wmono168-fifth-edition-1994.

48. *Jones N.E., Petreman I.C., Schmidt B.J.* High flows and freshet timing in Canada: observed trends. 42 climate change research report (CCRR-42). Ministry of Natural resources and forestry. Ontario, 2015, 24 p.

49. *Kharlamov M., Kireeva M., Varentsova N.* Spring freshet on East European plain: changes in drivers and conditions during last three decades. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, 2021, EGU21-13477. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-13477

50. *Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G.* Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12(2), pp. 62-77. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.

51. *Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M.* Long-term Changes of River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector. *Polarforschung*, 2018, vol. 87(2), pp. 177-194. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177

52. *Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W.* Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? *Hydrological Processes*, 2017, vol. 31, pp. 4354-4370. DOI: 10.1002/hyp.11365

53. *Naikm P.K., Jay D.A.* Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: changes in the disturbance processes. Cold Region Hydrology in a Changing Climate, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, IAHS Publ., 346. 2011, pp. 21–26.

54. *Partasenok I.S., Groisman P.Y., Chekan G.S., Melnik V.I.* Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9(9), 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005

55. *Prowse T.D., Wrona F.J., Reist J.D., Gibson J.J., Hobbie J.E., Le´vesque L.M.J., Warwick F.V.* Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems, *Royal Swedish Academy of Sciences*, 2006, vol. 35, no. 7, pp. 347-358.

56. *Rood S.B., Foster S.G., Hillman E.J., Luek A., Zanewich K.P.* Flood moderation: Declining peak flows along some Rocky Mountain rivers and the underlying mechanism. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 536, pp. 174–182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.043

57. *Walker B.J., Marsh P.Dr.* High resolution spatial variability in spring snowmelt for an Arctic shrub-tundra watershed 2019. Theses and Dissertations (Comprehensive). 2116, available at: https://scholars.wlu.ca/etd/2116

Поступила 28.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 28.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-147-167
УДК 632.112:633.1+551.85

Агрометеорологические условия возделывания зерновых и зернобобовых культур и возможности использования спутниковой информации для прогнозирования их урожайности в субъектах Северо-Кавказского федерального округа

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

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

Приведены результаты исследований влияния агрометеорологических условий и культуры земледелия на урожайность зерновых и зернобобовых культур в субъектах Северо-Кавказского федерального округа. Рассчитана средняя многолетняя динамика индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) с 12 по 29 недели вегетации за период 2001–2020 гг., что позволяет на качественном уровне оценивать состояние посевов и их возможную продуктивность в конкретном году по сравнению со средними многолетними показателями. С использованием корреляционного и графического анализа установлены связи урожайности с метеопараметрами и NDVI, выявлены периоды наиболее тесных связей. Показана возможность и особенности использования NDVI в прогностических моделях урожайности в республиках Северного Кавказа, где преобладающие в посевах озимые зерновые культуры в условиях наблюдающегося потепления часто вегетируют и в зимний период. Представлены разработанные регрессионные модели для прогнозирования урожайности на основе комплексирования наземных и спутниковых данных.

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

Agrometeorological conditions for cultivation of grain and leguminous crops and a possibility of using satellite information to predict their yield in the subjects of the North Caucasian Federal District

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

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

The results of studying the influence of agrometeorological conditions and farming standards on the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the North Caucasian Federal District are presented. Average long-term dynamics of the Normalized Dif-

ference Vegetation Index (NDVI) from the 12th to the 29th vegetation weeks for the period of 2001–2020 is calculated, which makes it possible to qualitatively assess crop conditions and possible crop productivity in a particular year as compared to the multiyear means. Using the correlation and graphical analysis, the relationships between the yield and meteorological parameters and NDVI were found, the periods of the highest correlations were revealed. The possibility and features of using NDVI in prognostic yield models in the republics of the North Caucasus, where winter crops prevailing in the region often vegetate in winter under conditions of the observed warming, are demonstrated. The developed regression models for the yield forecasting based on the integration of ground and satellite data are presented.

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

Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО), образованный в 2010 году в составе: Республика Дагестан, Республика Ингушетия, Республика Северная Осетия – Алания, Ставропольский край, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская и Чеченская республики является важным аграрным регионом Российской Федерации. В степных и предгорных районах округа природные условия благоприятны для ведения сельского хозяйства. Этому способствуют хорошая теплообеспеченность, достаточное количество выпадающих осадков, равнинный и слабо расчлененный рельеф, плодородные почвы. В то же время значительную часть округа на востоке и северо-востоке занимают сухостепные, горные и полупустынные территории, где земледельческая деятельность существенно затруднена.

Основные посевные площади пахотных земель в округе заняты зерновыми и зернобобовыми культурами (далее – зерновыми). По данным Росстата, по производству зерна округ занимает пятое место в Российской Федерации, обеспечивая до 10–11 % общего валового сбора зерна в стране. Основная доля (более 63 %) валового сбора приходится на озимую пшеницу, занимающую в округе наибольшие площади.

Зерно пшеницы, а также озимого ячменя (в основном из Ставропольского края, где производится 75–76 % валового сбора зерна от его общего сбора в округе) используется не только для самообеспечения округа, но и частично для обеспечения других регионов и экспортных целей. 8–10 % валового сбора зерна производится в Кабардино-Балкарской республике, 8–7 % в Республике Северная Осетия – Алания, до 3,5 % в Карачаево-Черкесской Республике, примерно столько же в Республике Дагестан и около 5 % зерна собирают в Чеченской Республике. В Республике Ингушетия валовой сбор зерна незначителен (менее 1 %). Средний за последние 5 лет валовой сбор зерна в округе составил 11,7 млн т. За период с начала образования округа (2010 г.) по 2020 год самый большой валовой сбор зерна (13,27 млн т) получен в благоприятном по условиям увлажнения 2016 г., а самый низкий (6,67 млн т) в 2012 г., когда на значительной части территории округа (в северных и восточных районах) наблюдалась сильная атмосферная засуха. Средняя по округу урожайность зерновых

культур в 2012 г. составила 25,8 ц/га, тогда как в 2016 г. она была максимальной за указанный период и достигла 42,7 ц/га; отметим, что максимальной в этом году была урожайность и в большинстве субъектов округа.

Анализ временных рядов урожайности зерновых культур в субъектах СКФО за период 2001–2020 гг. (данные Росстата) показал хорошо выраженную тенденцию роста урожайности вследствие повышения культуры земледелия (использования новых наиболее продуктивных сортов, внесения большего количества удобрений, применения новых технологий возделывания), особенно после 2010 года. Скорость роста урожайности в ряде субъектов округа, например в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках (1,51 ц/га и 1,84 ц/га при коэффициентах детерминации линейных трендов R^2, соответственно, 0,788 и 0,739), была даже выше, чем в Краснодарском крае, где средний погодичный прирост урожайности за этот же период составлял 0,94 ц/га [15]. В то же время в Ставропольском крае, где восточные и северо-восточные районы засушливые, погодичный прирост урожайности был самым низким из всех субъектов округа и составлял 0,39 ц/га, а R^2= 0,164, что указывает на медленный рост культуры земледелия и значительные колебания урожайности вследствие погодных условий. Расчеты показывают, что в ряде субъектов за счет погодных условий разница в урожайности даже в смежные годы (когда культура земледелия не менялась) достигала 5–6 ц/га, в отдельных субъектах до 10 ц/га и более. В связи с этим оценки и прогнозы урожайности и валовых сборов зерна, составляемые с большой заблаговременностью, являются весьма актуальными [4, 5, 8, 10, 13–15].

В то же время в СКФО методы прогноза средней по субъекту урожайности зерновых культур на основе наземных данных наблюдений гидрометстанций (ГМС) Росгидромета были разработаны только для Ставропольского края в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия [6]. В связи с изменением агротехники, уменьшением количества данных наблюдений ГМС и в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями [2] оправдываемость их в отдельные годы бывает низкой. В остальных субъектах округа были разработаны методы прогнозов лишь по отдельным (основным) культурам (озимая пшеница, кукуруза), но они также устарели. Поэтому для всех субъектов СКФО возникла необходимость разработки новых методов.

В настоящее время, в связи с возможностью использования ставших доступными в режиме реального времени с недельной частотой данных спутникового мониторинга посевов сельскохозяйственных культур практически во всех земледельческих районах (в том числе на предгорной территории юга России), была поставлена задача исследовать возможность применения этих данных (в том числе архивных) для разработки методов прогноза урожайности зерновых культур в субъектах СКФО на основе комплексирования спутниковых данных и наземных наблюдений

гидрометстанций. С этой целью за период 2001–2020 гг. была сформирована база метеорологических данных: средняя температура воздуха T, количество осадков R, дефицит влажности воздуха d, гидротермические коэффициенты увлажнения ГТК по месяцам основного вегетационного периода зерновых культур (апрель – июль): T_4, T_5, T_6, T_7; R_4, R_5, R_6, R_7; d_5, d_6; $ГТК_5$, $ГТК_6$, $ГТК_7$ и ГТК по отдельным отрезкам этого периода. Для характеристики состояния посевов по данным спутниковых измерений, как и в [12, 13, 15], использовался наиболее распространенной спутниковый индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по неделям вегетации, доступный на сервисе ВЕГА PRO [1, 7, 16]. Средняя по субъектам урожайность зерновых культур (в весе после доработки с убранной площади) использовалась по данным Росстата.

Как указывалось выше, фактически во всех субъектах рост урожайности за период 2001–2020 гг. был значительным. Изменение урожайности, рассчитанное на основе линейных трендов, показано в табл. 1, где для сравнения также приведены аналогичные данные и за предшествующие 20 лет (1981–2000 гг.).

Таблица 1. Изменение урожайности зерновых культур в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)
Table 1. Variability of grain crop yields in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Урожайность (ц/га)		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
1981–2000 гг.			
Республика Дагестан	21,06	12,53	-8,53
Кабардино-Балкарская Республика	35,61	23,12	-12,49
Карачаево-Черкесская Республика	24,78	18,54	-6,23
Республика Северная Осетия – Алания	33,89	20,87	-13,03
Ставропольский край	22,95	22,86	0,09
2001–2020 гг.			
Республика Дагестан	17,29	27,99	10,70
Кабардино-Балкарская Республика	26,51	56,84	30,32
Карачаево-Черкесская Республика	13,12	50,05	36,93
Республика Северная Осетия – Алания	24,23	59,37	35,47
Ставропольский край	29,43	36,86	7,43
1981–2020 гг.			
Республика Дагестан			9,10
Кабардино-Балкарская Республика			22,58
Карачаево-Черкесская Республика			22,57
Республика Северная Осетия – Алания			27,09
Ставропольский край			16,86

Вторая половина периода 1991–1999 гг. пришлась на годы структурной перестройки в аграрной отрасли, которые характеризовались снижением материально-технической базы хозяйств, особенно в республиках Северного Кавказа и, как следствие, значительным снижением урожайности. Кроме того, крайне неблагоприятными в этот период в большинстве субъектов СКФО были сильные и обширные засухи, которые случались чаще, чем в период 2001–2020 гг. (наблюдались в 1991 г, 1995 г, 1998 г. и 1999 г.). В период 2001–2020 гг. сильные, но менее обширные засухи наблюдались только в 2003 и 2012 гг.; в 2010 г, а также в 2020 г. кратковременные засухи наблюдались лишь в ряде северо-восточных районов округа. Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об ухудшении условий увлажнения в период 1981–2000 годов.

Таблица 2. Изменение условий увлажнения ($ГТК_{5-7}$) в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)
Table 2. Change in humidification conditions (GTK_{5-6}) in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Значения $ГТК_{5-7}$		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
1981–2000 гг.			
Республика Дагестан	0,73	0,44	-0,29
Кабардино-Балкарская Республика	1,72	1,19	-0,52
Карачаево-Черкесская Республика	-	-	-
Республика Северная Осетия – Алания	-	-	-
Ставропольский край	1,34	1,10	-0,23
2001–2020 гг.			
Республика Дагестан	0,67	0,93	0,26
Кабардино-Балкарская Республика	1,36	1,31	-0,05
Карачаево-Черкесская Республика	2,40	1,90	-0,50
Республика Северная Осетия – Алания	1,32	1,94	0,62
Ставропольский край	1,22	1,07	-0,14
1981–2020 гг.			
Республика Дагестан			0,31
Кабардино-Балкарская Республика			-0,15
Карачаево-Черкесская Республика			-
Республика Северная Осетия – Алания			-
Ставропольский край			-0,21

Рассчитанные нами ГТК (табл. 2) за период май–июль уменьшились от начала к концу периода на 0,23–0,52, т. е. можно констатировать, что снижение урожайности в этот период было обусловлено не только

ухудшением материально-технической базы хозяйств в субъектах округа, но и ухудшением условий увлажнения.

В 2001–2020 гг. при значительном росте урожайности вследствие улучшения культуры земледелия (в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках, например, урожайность увеличилась от начала к концу периода в среднем, соответственно, на 30,32 и 36,93 ц/га) условия увлажнения менялись (ухудшались) незначительно: значения $ГТК_{5-7}$ на большей части территории округа уменьшились на 0,05–0,14, (лишь в Карачаево-Черкесской республике на 0,50), а в республиках Дагестан и Северная Осетия – Алания условия даже улучшались ($ГТК_{5-7}$ увеличился на 0,26–0,62). Таким образом, в этот период более значимым фактором роста урожайности на преобладающей территории округа было улучшение культуры земледелия.

Можно отметить также, что в целом за период 1981–2020 гг. (40 лет) условия увлажнения на большей части территории возделывания зерновых культур (Ставропольский край и Кабардино-Балкарская Республика) ухудшились незначительно (значения $ГТК_{5-7}$ уменьшились лишь на 0,15–0,21), а в Республике Дагестан они даже улучшились ($ГТК_{5-7}$ в среднем увеличился на 0,31). Рост средней температуры воздуха за май–июль ($Т_{5-7}$) был характерен как для периода 1981–2000 гг. (табл. 3), так и для 2001–2020 гг., при этом более интенсивным он был в 2001–2020 гг., когда увеличение температуры от начала к концу периода составляло 2,17–2,73 °С. В целом за 1981–2020 гг. средняя $Т_{5-7}$ в субъектах увеличилась в основном на 2,17–2,46 °С.

Для более полной характеристики условий увлажнения в субъектах СКФО в период 2001–2020 гг. нами по принятым в Росгидромете критериям [3, 17, 18] была рассчитана повторяемость сильных (ГТК≤0,60) и средних (ГТК=0,61–0,80) засух, а также общего их количества (ГТК≤0,80) в наиболее важный период для формирования урожая зерновых культур (май и июнь). Полученные данные приведены в табл. 4.

Анализируя таблицу, можно отметить, что в засушливых северо-восточных районах округа (Ставропольский край, Республика Дагестан) повторяемость, а следовательно, и риски сильных и средних засух в июне были больше, чем в мае, что отрицательно сказывалось на формировании урожая как ранних, так и поздних зерновых культур. В остальных районах повторяемость таких засух в мае и июне была почти одинаковой. Так, например, в Ставропольском крае, где сосредоточены основные площади зерновых культур, и в Республике Дагестан повторяемость сильных и средних засух в июне составляла 35–45 %, т. е. засухи такой интенсивности, а следовательно, и риски значительного недобора урожая [19] наблюдались в среднем в 4–5 годах из 10, а в мае повторяемость таких засух составляла 20–25 %. В остальных субъектах повторяемости засух как в мае, так и в июне была небольшой (5–10 %).

Таблица 3. Изменение средней за май–июль температуры воздуха (T_{5-7},°С) в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)
Table 3. Change in the average May-July air temperature (T_{5-7},°C) in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Значения T_{5-7},°С		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
1981–2000 гг.			
Республика Дагестан	19,37	20,06	0,69
Кабардино-Балкарская Республика	18,20	20,26	1,06
Карачаево-Черкесская Республика	–	–	–
Республика Северная Осетия – Алания	–	–	–
Ставропольский край	18,76	20,67	1,91
2001–2020 гг.			
Республика Дагестан	19,10	21,83	2,73
Кабардино-Балкарская Республика	19,50	21,68	2,17
Карачаево-Черкесская Республика	17,69	18,03	0,34
Республика Северная Осетия – Алания	20,45	22,82	2,37
Ставропольский край	20,13	22,37	2,24
1981–2020 гг.			
Республика Дагестан			2,17
Кабардино-Балкарская Республика			2,27
Карачаево-Черкесская Республика			–
Республика Северная Осетия – Алания			–
Ставропольский край			2,46

Таблица 4. Повторяемость сильных (ГТК ≤ 0,60), средних (ГТК = 61–0,80) атмосферных засух и общего их количества (ГТК ≤ 0,80) в мае и июне в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (2001–2020 гг.)
Table 4. Repeatability of strong (GTK ≤ 0,60), medium (GTK = 0,60-0,80) and strong and medium (GTK ≤ 0,80) air droughts in May-June in the subjects of the North Caucasian Federal District (2001–2020)

Территория	ГТК≤0,60				ГТК=0,61–0,80				ГТК≤0,80			
	май		июнь		май		июнь		май		июнь	
	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл	%	ч.сл.	%
Республика Дагестан	2	10	5	25	3	15	4	20	5	25	9	45
Кабардино-Балкарская Республика	1	5	1	5	1	5	1	5	2	10	2	10
Карачаево-Черкесская Республика	0	0	2	10	2	10	0	0	2	10	2	10
Республика Северная Осетия – Алания	0	0	0	0	2	10	1	5	2	10	1	5
Ставропольский край	1	5	2	10	3	15	5	25	4	20	7	35

Выше отмечалось, что в Ставропольском крае валовой сбор зерна составляет до 75–76 % от его общего валового сбора в округе. Наши исследования показали, что связь между валовым сбором зерна и урожайностью в этом субъекте и валовым сбором и урожайностью в СКФО за период его выделения из Южного федерального округа (т. е. за 2010–2020 гг.), была очень тесная (R^2 равен, соответственно, 0,955 и 0,951). На рис. 1 в качестве иллюстрации показана динамика (1) урожайности зерновых культур (У) в СКФО и Ставропольском крае, для которой характерна хорошо выраженная синхронность урожайности во временном ходе. Следует отметить, что тренды урожайности, описанные полиномом первой степени вида $y=ax+c$ (2), показывают лишь увеличение урожайности за рассматриваемый период, тогда как уравнения полиномов третьей степени вида $y=a_1x^3+a_2x^2+a_3x+c$ (3) достаточно адекватно описывают флуктуации урожайности внутри временного ряда. Так, от начала периода до засушливого 2012 г. урожайность снижалась, затем наблюдался ее рост до благоприятного по условиям увлажнения 2016 г., а в конце периода урожайность вновь снижалась (2019 год и в значительно большей степени 2020 год были засушливыми). Отметим, что такой анализ динамики (У) весьма полезен и для территорий других земледельческих районов Российской Федерации для определения периодов роста/снижения урожайности в определенные временные отрезки, а также оценки способствующих этому условий.

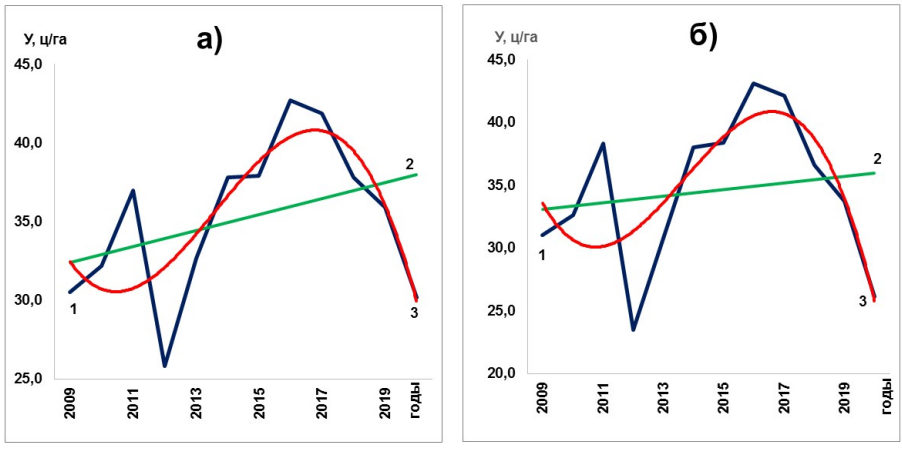


Рис. 1. Динамика урожайности (У, ц/га) зерновых культур в Северо-Кавказском федеральном округе (а) и Ставропольском крае (б) – 1; тренды первой и третьей степени – 2, 3.
Fig. 1. Dynamic of grain crop yields (c/ha) in the subjects of the North Caucasian Federal District (a) and in Stavropol Krai (б) – 1; first and third degree trends – 2, 3.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур в субъектах СКФО использовался подход, примененный нами ранее в работе [15]. На первом этапе исследовались связи урожайности этих культур с метеорологическими факторами. На основе построенных корреляционных матриц определялась теснота связей этих факторов не только с урожайностью (У), но и с (ΔУ), т. е. с аномалией урожайности (отклонениями урожайности от построенных по субъектам линейных трендов). Определялась теснота связей (У) и (ΔУ) со средней температурой воздуха (Т), количеством осадков (R), дефицитом влажности воздуха (d), гидротермическими коэффициентами (ГТК) по месяцам вегетационного периода зерновых культур (апрель, май, июнь, июль), а также ГТК по отдельным отрезкам этого периода ($ГТК_{5\text{-}6}$ и $ГТК_{5\text{-}7}$). Оказалось, что в северных и восточных районах округа (Ставропольский край, Республика Дагестан), где значительная часть территорий подвержена частым засухам (табл. 4), наиболее тесные прямые связи наблюдались с показателями влагообеспеченности посевов – количеством осадков, гидротермическим коэффициентом увлажнения в апреле, мае, июне и в значительно меньшей степени – в июле. Коэффициенты корреляции урожайности (У) и аномалии урожайности (ΔУ) с этими показателями колебались в основном от 0,350 до 0,510. Тесные, но обратно пропорциональные связи наблюдались с температурой и дефицитом влажности воздуха в эти месяцы (кроме июля). Повышение температуры воздуха ускоряет процессы формирования колоса, количество колосков в колосе зерновых культур уменьшается, и урожайность их снижается [11, 17, 18]. При увеличении дефицита влажности воздуха увеличивается количество дней с суховеями, в условиях повышенной температуры усиливается их интенсивность, что негативно сказывается на формировании зерна и может вызывать щуплость зерен, что также приводит к снижению урожайности. Коэффициенты корреляции урожайности с этими показателями составляли в основном от -0,420 до -0,560. На юго-западе округа, например в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках, связи урожайности с указанными показателями выражены слабее. Основной причиной этого, на наш взгляд, является тот факт, что в большинстве лет в этих республиках при преобладании умеренного термического режима влагообеспеченность зерновых культур в основной период вегетации бывает вполне достаточной, суховейные явления редки. Необходимо отметить, что почти во всех субъектах теснота связей большинства метеорологических параметров проявлялась более четко с ΔУ, чем с У. Типичная для большинства субъектов зависимость ΔУ от средней за май температуры воздуха по Ставропольскому краю и Республике Дагестан показана на рис. 2а, от среднего гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь ($ГТК_{5\text{-}6}$) – на рис. 2б. Необходимо отметить, что в июле связь урожайности зерновых культур практически со всеми метеопараметрами выражена слабо, так как в этот период преобладающие в округе озимые культуры уже созрели,

а на многих полях убраны, начинается созревание и уборка ранних яровых зерновых культур. Для поздних зерновых (например, кукурузы и проса) июль является критическим периодом по отношению к тепло- и влагообеспеченности, однако их доля в формировании средней по субъектам урожайности невелика и, как следствие, коэффициенты корреляции У и ΔУ с метеофакторами в этом месяце в основном были ниже уровня значимых.

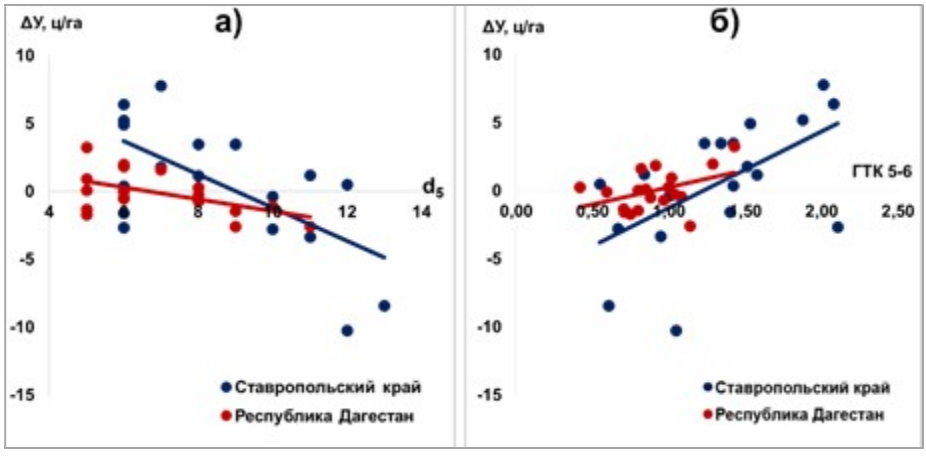


Рис. 2. Зависимость аномалии урожайности зерновых культур (ΔУ, ц/га) от среднего за май дефицита влажности (d_5) (а) и от среднего за май–июнь ГТК ($ГТК_{5-6}$) (б) по Ставропольскому краю и Республике Дагестан.
Fig. 2. Dependence of yield anomaly of grain crop yields (ΔY, c/ha) from average for May moisture deficit (d5) (a) and from average for May-June GTK (GTK_{5-6}) (б) in Stavropol Krai and in the Republic of Dagestan.

При исследовании возможности использования данных спутникового мониторинга посевов зерновых культур для разработки метода прогноза урожайности нами были рассчитаны среднемноголетние значения NDVI по неделям вегетации за период 2001–2020 гг. по всем субъектам округа (кроме Республики Ингушетия, где посевные площади зерновых незначительные). При этом использовались значения NDVI по преобладающим в округе озимым культурам ($NDVI_{оз}$). По алгоритму, предложенному в ИКИ РАН [16], в большинстве районов со сравнительно однотипной растительностью по отклонениям текущих (в конкретном году) значений NDVI от средних многолетних значений можно на качественном уровне оценить состояние (хуже/лучше) и ожидаемую возможную продуктивность посевов в текущем году по сравнению со средней многолетней. Такая оценка оказалась полезной и для субъектов СКФО, особенно в аномальные по погодным условиям годы.

На рис. 3 показана динамика рассчитанных нами средних многолетних значений $NDVI_{o3}$ в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и в Ставропольском крае с 12 по 29-ю недели вегетации. Можно видеть, что значение NDVI различаются не только по времени достижения максимальных значений, но и в еще большей степени по их величине, т. е. ход и величина NDVI связаны с большим разнообразием почвенно-климатических и других условий, характерных для каждого конкретного субъекта. На востоке округа – в Республике Дагестан, например, максимальное значение NDVI наблюдается в 19-ю неделю, тогда как в Карачаево-Черкесской Республике (юго-запад территории) – в 21-ю неделю. Еще более значимая разница прослеживается по максимальным значениям этого показателя. Так, в Республике Дагестан максимальное среднее за 20 лет значение NDVI составило 0,66, а в Карачаево-Черкесской Республике – 0,80. Отметим, что средняя урожайность зерновых культур за рассматриваемый нами период (2001–2020 гг.) в этих субъектах составляет, соответственно, 22,6 и 31,6 ц/га, т. е. можно констатировать, что максимальное среднее многолетнее значение NDVI в определенной степени указывает на различия в средней продуктивности посевов в субъектах.

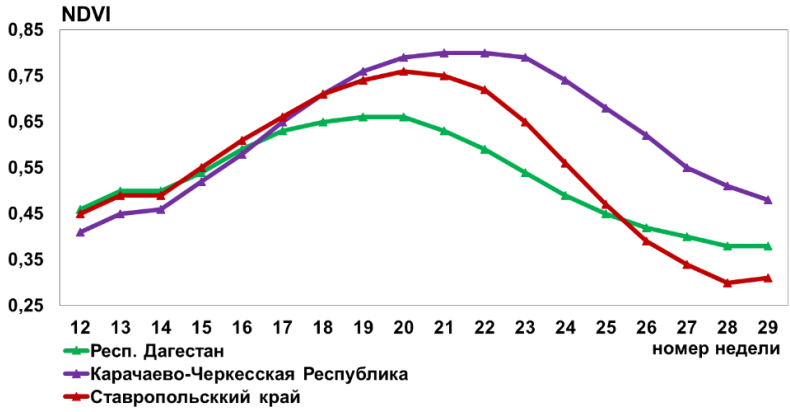


Рис. 3. Динамика средних многолетних значений NDVI в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и в Ставропольском крае по неделям вегетации (2001–2020 гг.).
Fig. 3. Dynamic of multi-year averages of NDVI in the Republic of Dagestan, in the Karachay-Cherkess Republic and in Stavropol Krai on the vegetation weeks (2001-2020).

Покажем на конкретных примерах различие в отклонениях NDVI в разные по условиям влагообеспеченности зерновых культур годы и отклонения урожайности в эти годы от средней многолетней урожайности. На рис. 4 показаны средние многолетние значения NDVI в Ставропольском крае и Республике Дагестан (где часто наблюдаются засухи различ-

ной интенсивности) в недели наблюдаемых тесных связей NDVI с урожайностью (соответственно, 18 и 15-ю недели). Так, в Ставропольском крае, например, где среднее многолетнее значение NDVI в 18 неделю составляет 0,71, в засушливом 2012 г. значение NDVI в эту неделю составило 0,65, или 91 % от среднего NDVI, а в достаточно влажном 2016 г. – 0,79, или 111% от среднего многолетнего. Урожайность в 2012 г. составила 23,5 ц/га, или 71 % от средней многолетней, равной 33,1 ц/га, а в 2016 г. – 43,1 ц/га, т. е. 130 % от средней многолетней. Так же ярко проявилось различие в значениях NDVI в 2012 и 2016 гг. в Республике Дагестан.

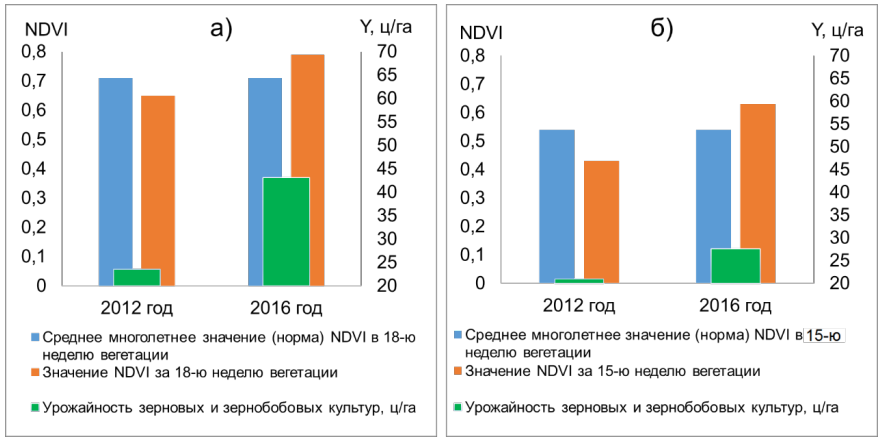


Рис. 4. Значение NDVI в 18-ю неделю вегетации по сравнению с $NDVI_{18}$ (норма); NDVI в 15-ю неделю по сравнению с $NDVI_{15}$ (норма) и урожайность зерновых культур в Ставропольском крае (а) и Республике Дагестан (б).
Fig. 4. Value of NDVI on the 18th vegetation Week compared with $NDVI_{18}$ (Norm); NDVI on the 15th vegetation Week compared with $NDVI_{15}$ (Norm) and grain crop yields in Stavropol Krai (a) and in the Republic of Dagestan (б).

В засушливом 2012 г. значение NDVI в 15-ю неделю составило 0,43 (79,5 % от среднего многолетнего NDVI в эту неделю, равного 0,54), при этом в достаточно влажном 2016 г. оно составило 0,63, т. е. 116,5 % от среднего многолетнего, при этом урожайность составила, соответственно, 20,9 ц/га и 27,6 ц/га. Это, разумеется, ориентировочная оценка состояния посевов по NDVI, но она весьма полезна для предварительной оценки ожидаемой урожайности в определенные, выявленные нами периоды (когда связь NDVI с урожайностью значима) в конкретном субъекте. Для более точной оценки, как показано в [13, 15], необходимо привлекать метеорологические данные, особенно в годы с неблагоприятными погодными условиями. На северо-востоке территории, например, чаще всего это годы засух.

Для определения периодов, когда связь урожайности зерновых культур в субъектах с NDVI становится значимой и, следовательно, этот показатель (индекс NDVI) можно использовать в прогностических моделях урожайности, нами рассчитывались матрицы парных коэффициентов корреляции между средней урожайностью в субъектах и значениями NDVI по неделям вегетации (в основном с 12 по 25-ю недели).

Анализ построенных на их основе временно-корреляционных функций позволил выявить периоды значимых и наиболее тесных связей урожайности с NDVI. В качестве примера такие функции (динамика коэффициентов корреляции, r для разных по агроклиматическим условиям территорий: Республика Дагестан, Ставропольский край и Карачаево-Черкесская Республика) приведены на рис. 5, где горизонтальной линией выделены периоды тесных (значимых на 5%-ном уровне) связей NDVI с урожайностью. Это позволило при разработке прогностической модели урожайности выбрать период (определенную неделю), когда эта связь наиболее тесная. Можно отметить, что в Республике Дагестан, например, значимая связь NDVI с урожайностью ($r \geq 0{,}43$) проявляется уже в конце марта (в 12-ю неделю), т. е. даже раньше средней даты фазы «выход в трубку», что, по-видимому, можно объяснить особенностями фенологического развития преобладающих здесь озимых культур, которые часто при наблюдающемся потеплении в южных районах СКФО зимой возобновляют вегетацию, особенно в последние десятилетия.

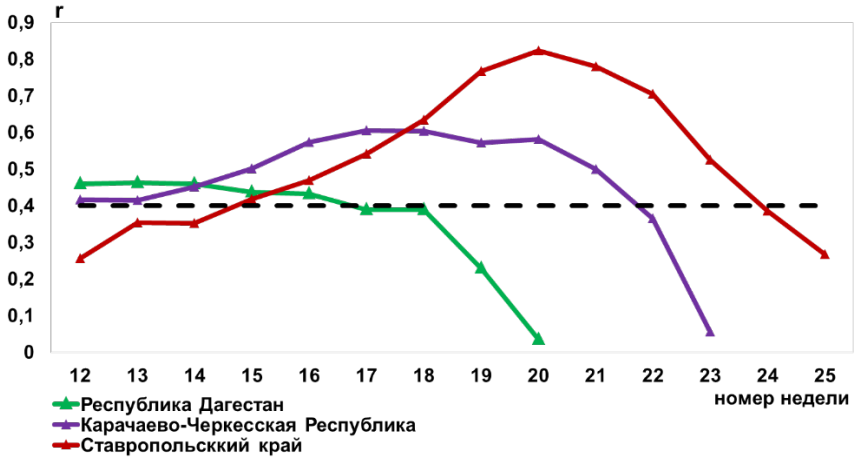


Рис. 5. Связь урожайности зерновых культур (У, ц/га) с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) по неделям вегетации в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и Ставропольском крае (2001–2020 гг.).

Fig. 5. Relationship between grain yield (Y, c/ha) and NDVI (dynamic of correlation coefficients r) for the vegetation weeks in the Republic of Dagestan, in the Karachay-Cherkess Republic and in Stavropol Krai (2001–2020).

Анализ данных фенологических наблюдений ГМС показывает, что в этих районах растения, вегетируя в продолжительные периоды потеплений в зимний период, могут проходить в это время дополнительно 1–2 фазы развития. Так, наиболее тесная (значимая) связь NDVI с урожайностью в этой республике наблюдалась, по данным мониторинга посевов за период 2001–2020 гг., уже в 12–14-ю неделю (r=0,46), в Карачаево-Черкесской Республике – в 17–18-ю недели, тогда как в Ставропольском крае – в 20-ю неделю, что близко к средней дате фазы «колошение» или лишь несколько раньше. На наиболее тесную связь урожайности зерновых культур с NDVI в фазу колошения указывают и другие авторы [4, 5, 8, 9].

Наглядно теснота связей урожайности зерновых культур (У) и аномалии урожайности (ΔУ) с NDVI в 17-ю неделю вегетации по Карачаево-Черкесской Республике показана на рис. 6.

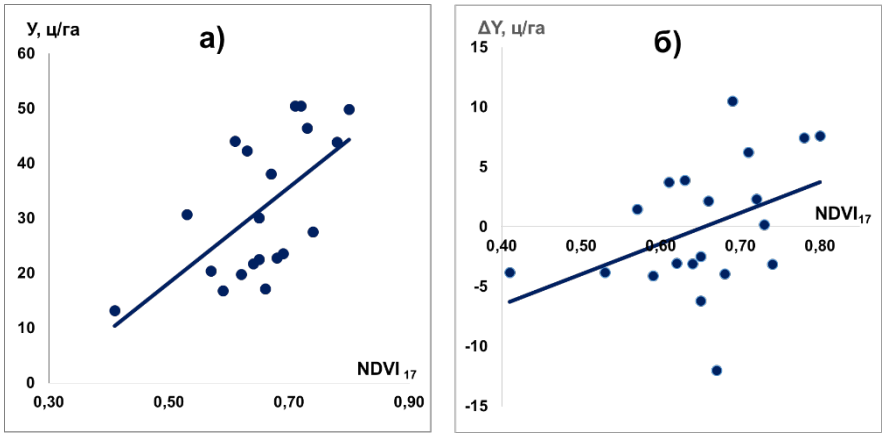


Рис. 6. Связь урожайности (У, ц/га) (а) и аномалии урожайности (ΔУ, ц/га) зерновых культур (б) с NDVI в 17-ю неделю вегетации в Карачаево-Черкесской Республике.
Fig. 6. Relationship of yield (Y, c/ha) (a) and grain yield anomalies (ΔУ, c/ha) (б) with NDVI on the 17th vegetation Week in the Karachay-Cherkess Republic.

Можно отметить, что в Ставропольском крае теснота связей $NDVI_{20}$ с урожайностью У характеризовалась достаточно высоким коэффициентом корреляции (r=0,82), с аномалией урожайности ΔУ она была несколько слабее (r=0,75). В Карачаево-Черкесской Республике связи $NDVI_{17}$ с урожайностью и с аномалией урожайности были менее тесными, но значимыми (соответственно, r=0,60 и r=0,42), что, по-видимому, связано со значительно меньшей изменчивостью NDVI в этой республике. Необходимо также отметить, что в Ставропольском крае, где площади зерновых культур большие, связи NDVI с У и ΔУ были более тесные, чем во всех

остальных субъектах СКФО, где площади зерновых культур (по сравнению со Ставропольским краем) небольшие. На значение размеров площади для детектируемых посевов указывалось в [5, 16]. По-видимому, нельзя исключить и некоторые трудности детектирования полей зерновых культур в условиях предгорных территорий в отдельных республиках округа. Однако полученные нами по фактическим данным мониторинга посевов устойчивые коэффициенты корреляции средней по субъектам урожайности зерновых культур с NDVI, значимые на 5%-ном уровне в выявленные определенные периоды (рис. 5), позволили использовать этот показатель для разработки прогностических моделей урожайности в эти периоды.

При разработке метода прогноза урожайности зерновых культур в использованном нами подходе прогностическая урожайность ($У_{пр}$), как и в [13–15], рассматривалась как сумма двух составляющих $У_{пр} = У_{тр} + \Delta У$, где $У_{тр}$ – детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия.

В нашем случае эта составляющая описывалась в основном уравнениями полинома первой степени вида $y = ax + c$, реже – полиномом второй степени, так как они хорошо отражают рост урожайности в этих субъектах. Автоматизированный расчет трендовой составляющей урожайности $У_{тр}$ входит в состав алгоритма, имеющегося на рабочем месте агрометеоролога-прогнозиста для расчета прогностической величины урожайности. $\Delta У$ – случайная величина, зависящая главным образом от складывающихся агрометеорологических условий и состояния посевов по данным спутниковых измерений в текущем году (год прогноза).

При этом метеорологические параметры прогностической модели для расчета $\Delta У$, как и значения NDVI, отбирались с учетом тесноты их связей с урожайностью и в основном в декады (недели), близкие к срокам составления прогноза. Однако использование NDVI во многих республиках СКФО имело свои особенности. Их значения использовались не в сроки, близкие к датам составления прогнозов, а существенно раньше. Так, например, в республиках Дагестан, Северная Осетия – Алания и в Кабардино-Балкарской Республике для первого прогноза, срок которого (принятый в Росгидромете) третья декада июня, использовались NDVI первой декады апреля, т. е. 14–15-я недели вегетации, когда связь их с урожайностью была достаточно тесной и наиболее значимой. То же можно сказать и об отдельных метеорологических параметрах, использованных для построения модели.

Разработанные нами регрессионные прогностические модели, основанные на комплексировании наземных и спутниковых данных для прогнозов урожайности зерновых культур в отклонениях от трендов $\Delta У$ представлены в табл. 5.

Табл. 5. Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности (ΔУ) и множественные коэффициенты корреляции: I – июнь; II – июль

Table 5. – Values of regression coefficients in the prognostic yield models (ΔY) and multiple correlation coefficients: I - June; II – July

Субъекты		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	C	R
Республика Дагестан	I		-0,326				0,447			$0,933_{14}$	4,44	0,49
	II			-0,249					-0,2326	3,47416	5,144	0,506
	II			-0,281			1,8873			4,76714	2,04	0,59
Кабардино-Балкарская Республика	I			-1,067	0,042					21,81515	9,87	0,48
	II			-1,030		0,0281				20,12215	9,58	0,49
	II			-1,626		0,0722				22,16216	17,99	0,63
Карачаево-Черкесская Республика	I	0,879			0,069					28,12117	-30,57	0,62
	II	0,834				0,013				18,20917	-20,56	0,50
	II			-1,521		0,013				33,94218	2,64	0,56
Республика Северная Осетия - Алания	I		1,005						-0,756	21,03815	-25,31	0,47
	II			-1,2101*		0,022				23,83316	13,16	0,49
	II			-1,1131*			0,1474			23,84915	13,89	0,48
Ставропольский край	I				0,070				-0,389	62,92719	-46,95	0,82
	I		-0,663			0,024				63,07619	-38,21	0,80
	II		-0,040					4,656		68,81420	-64,28	0,83
	II							4,453	0,173	69,27620	-60,05	0,83

Примечание. a_1 – коэффициент регрессии при средней температуре воздуха в апреле (С°); a_2 – в мае, a_3 – в июне, (*) – в июле; a_4 – при количестве осадков в апреле; a_5 – в мае, (1) – в июне, (2) – в июле; a_6 – при ГТК в мае, (3) – в июне, (4) – в июле; a_7 – при ГТК5-6; a_8 – при дефиците влажности воздуха в мае; a_9 – при NDVI по неделям вегетации; С – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Проверка разработанных моделей урожайности на зависимых материалах, проведенная в соответствии с «Инструкцией по проверке оправдываемости агрометеорологических прогнозов» 1983 г., показала их достаточную, а в большинстве субъектов высокую надежность. Ошибки прогнозов урожайности, рассчитанных с учетом двух слагаемых – трендовой составляющей $У_{тр}$, которая вносит большой вклад в прогностическую величину урожайности (значения R^2 в уравнениях трендов составляли в основном 0,65–0,80), и аномалии урожайности ΔУ были в пределах 5–14 %, лишь в отдельные годы до 16 %. На рис. 7 приведены расчетные прогностические значения урожайности $У_{пр}$ в сравнении с фактической урожайностью по данным Росстата по Ставропольскому краю и Республике Дагестан. Коэффициенты корреляции между фактической и расчетной урожайностью составляли 0,86 и 0,94 соответственно.

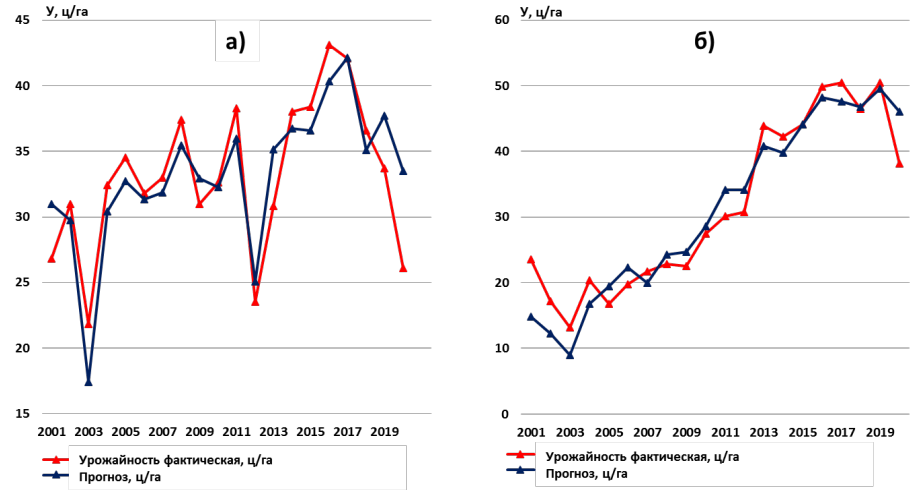


Рис. 7. Прогностические значения урожайности $У_{пр}$ в сравнении с фактической урожайностью по данным Росстата по Ставропольскому краю (а) и Республике Дагестан (б).
Fig. 7. The prognostic grain yield values (У пр) compared with actual grain yield according to Federal State Statistic Service for Stavropol Krai (a) and for the Republic of Dagestan (б).

Заключение

Проведенные исследования агрометеорологических условий вегетации зерновых и зернобобовых культур в весенне-летний период выявили тенденции их изменения в 2001–2020 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. и влияние этих условий на урожайность. Определены риски атмосферных засух сильной и средней интенсивности в мае и июне и показано, что они значительны лишь на севере и востоке округа (Ставропольский край

и Республика Дагестан), где урожайность сильно колеблется по годам, а тенденции роста урожайности выражены слабо, тогда как в остальных республиках округа рост урожайности в 2001–2020 гг. был весьма значительным, особенно с 2010 г., что связано в основном с ростом культуры земледелия. Показано, что рассчитанные для всех субъектов округа за период 2001–2020 гг. средние многолетние значения NDVI по неделям вегетации позволяют на качественном уровне проводить сравнительный анализ состояния посевов в текущем году, а в аномальные годы и их продуктивность, по сравнению со средними многолетними данными. С использованием корреляционного анализа установлены связи средней по субъектам урожайности зерновых и зернобобовых культур с NDVI по неделям вегетации (с 12 по 25-ю недели), определены периоды наиболее тесной связи урожайности с NDVI. Показана целесообразность использования спутниковой информации (NDVI) в разрабатываемых прогностических моделях урожайности в определенные, выявленные в результате исследований периоды, не только в Ставропольском крае, где эти культуры возделываются на больших площадях, но и в Республиках Северного Кавказа, где посевные площади невелики, а преобладающие озимые культуры часто вегетируют и в зимний период, в связи с чем использование NDVI в республиках имеет свои особенности. Разработанные для субъектов СКФО статистические регрессионные модели (для республик Северного Кавказа впервые), основанные на комплексировании наземной и спутниковой информации, позволяют прогнозировать урожайность зерновых и зернобобовых культур в принятые в Росгидромете сроки – третья декада июня и третья декада июля. Проверка моделей на зависимых материалах за период 2001–2020 гг. показала, что расчетные прогностические значения урожайности были близки к фактической урожайности по данным Росстата. Относительные ошибки прогнозов изменялись в основном в пределах 5–14 %.

Данная работа выполнена в рамках 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.

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. *Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Павлова А.Н.* Региональные и отраслевые проблемы опустынивания, деградации земель и засух в Российской Федерации // Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)». Том 2. Раздел 4. м.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с. С 183-312.

3. *Грингоф И.Г., Клещенко А.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.

4. *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, № 14. С. 99-112.

5. *Клещенко А.Д., Савицкая О.В.* Оценка урожайности озимой пшеницы с использованием метода главных компонент на основе комплексирования спутниковой и наземной информации. // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 127-136.

6. *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.

7. *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.

8. *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.

9. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.

10. *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.

11. *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.

12. *Страшная А.И., Береза О.В., Павлова А.В.* Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Приволжского федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 71-91.

13. *Страшная А.И., Береза О.В., Максименкова Т.А.* Прогнозирование урожайности озимой пшеницы по субъектам европейской части России на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Вклад агрофизики в решение функциональных задач сельскохозяйственной науки», Санкт-Петербург, 1–2 октября 2020 г. С. 722-743.

14. *Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С.* О возможности использования данных спутниковых измерений для прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах Уральского федерального округа и Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского института. 2021. № 107. С. 78-91.

15. *Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С.* Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 111-137.

16. *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.

17. *Уланова Е.С., Страшная А.И.* Засухи в России и их влияние на производство зерна // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 32. С. 64-83.

18. *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.

19. *Якушев В.П., Жуковский Е.Е.* Анализ последствий изменения климата в земледелии как задача оценки и сравнения рисков // Агрофизика. 2011. № 4. С. 24-39.

References

1. *Bartalev S.A., Loupyan E.A., Neishtadt I.A., Savin I. Yu.* Gropland area classification in south regions of Russia using modis satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [*Earth research from space*], 2006, no. 6, pp. 68-75 [in Russ.].

2. *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.].

3. *Gringof I.G., Kleshchenko A.D.* Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. T. 1. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2011, 808 p. [in Russ.].

4. *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.].

5. *Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V.* Estimation of winter wheat yield using the principal component analysis based on the integration of satellite and ground information. *Russ. Meteorol. Hydrol*., 2021, vol. 46, no. 12, pp. 881-887.

6. *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.].

7. *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.].

8. *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.].

9. *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.].

10. *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.].

11. *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.].

12. *Strashnaya A.I., Bereza O.V., Pavlova A.A.* Agrometeorological conditions and forecasting of grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Volga Federal District *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2020, no. 3 (377) , pp. 71-91. [in Russ.].

13. *Strashnaya A.I., Bereza O.V., Maksimenkova T.A.* Prognozirovanie urozhajnosti ozimoj pshenicy po sub"ektam evropejskoj chasti Rossii na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyh dannyh. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «*Vklad agrofiziki v reshenie funkcional'nyh zadach sel'skohozyajstvennoj nauki*», Sankt-Peterburg, 1–2 oktyabrya 2020 g, pp. 722-743. [in Russ.].

14. *Strashnaya A.I., Beryoza O. V., Klang P.S.* The use of satellite measurement data to predict the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the Ural Federal District and Western Siberia. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta [Proceedings of the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute]*. 2021, no. 107, pp. 78-91. [in Russ.].

15. *Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S.* Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2021, no. 4 (382) , pp. 111-137. [in Russ.].

16. *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.].

17. *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.].

18. *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.].

19. *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 13.05.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 13.05.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-168-180
УДК 551.510:41

Мониторинг приземного озона в природном заповеднике «Карадагский» в период 2017–2021 гг.

В.А. Лапченко[1], И.Н. Кузнецова[2]

[1] Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, пгт Курортное, Республика Крым, Россия
[2] Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия
labmuza@mecom.ru

Станция фонового экологического мониторинга (СФЭМ) в природном заповеднике «Карадагский» – единственный пункт регулярных измерений (с 2010 года) приземных концентраций озона (ПКО) на Черноморском побережье Российской Федерации. Обсуждаются наблюдения ПКО на СФЭМ в последние пять лет; показана незначительная межгодовая изменчивость ПКО по сравнению с предыдущими годами. Осредненный за период 2017–2021 гг. сезонный и суточный ход ПКО в общих чертах совпадает с предыдущим периодом и сравним с типовым ходом на зарубежных средиземноморских станциях. Для режима ПКО на СФЭМ характерна незначительная суточная амплитуда: зимой она составляет около 5 мкг $м^{-3}$, в теплый сезон увеличивается почти в 3–4 раза, но из-за повышенного ночного озона остается значительно меньше, чем на равнинных станциях. В темное время суток зимой и осенью ПКО составляет 50–55 мкг $м^{-3}$, весной и летом – около 70 мкг $м^{-3}$. На режим ПКО существенное влияние оказывает бризовая циркуляция, в ночное время – склоновые ветры, обеспечивающие приток озона из свободной тропосферы. На станции фонового мониторинга временами фиксируются ПКО, приближающиеся к максимально разовой предельно допустимой концентрации озона ($ПДК_{м.р.}$). Весной такие события связаны с перемещением над регионом высотной фронтальной зоны. Имевшие место случаи превышения $ПДК_{м.р.}$ озона фиксировались в распространяющихся на Крым шлейфах загрязненного в удаленных районах воздуха.

Ключевые слова: приземный озон, природный заповедник «Карадагский», сезонный и суточный ход, предельно допустимая концентрация озона

Monitoring of surface ozone in the Karadag Nature Reserve in 2017–2021

V.A. Lapchenko[1], I.N. Kuznetsova[2]

[1] T.I. Vyazemsky Kara Dag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS, – Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Republic of Crimea, Russia;
[2] Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
labmuza@mecom.ru

The background environmental monitoring station in the Karadag Nature Reserve is the only point for routine measurements (since 2010) of surface ozone on the Black Sea coast of the Russian Federation. Surface ozone observations at the station over the past five years are discussed. An insignificant interannual variability of surface ozone is shown as compared to the previous years. Seasonal and diurnal variations in surface ozone averaged over the period of 2017–2021 generally coincide with the previous period and are comparable with the typical variations at foreign Mediterranean stations. The surface ozone regime at the analyzed station is characterized by an insignificant diurnal amplitude: it is about 5 μg/m^3 in winter and increases by almost 3–4 times in the warm season. However, due to increased nighttime ozone, it remains significantly smaller than at lowland stations. In the dark time of the day, surface ozone is 50–55 μg/m^3 in winter and autumn and about 70 μg/m^3 in spring and summer. The surface ozone regime is significantly affected by the breeze circulation and, at night, by slope winds providing the influx of ozone from the free troposphere. At the background monitoring station, surface ozone values approaching the maximum single permissible concentration of ozone (MPCm.s.) are occasionally recorded. In spring, such events are associated with the movement of the upper-level frontal zone over the region. The registered cases of exceeding MPCm.s. were observed in the plumes of air polluted in remote areas and spreading to Crimea.

Keywords: surface ozone, Karadag Nature Reserve, seasonal and diurnal variation, maximum permissible concentration of ozone

Озон – важнейший газовый компонент атмосферы; озон (O_3) является одним из сильнейших атмосферных окислителей и относится к вредным веществам наивысшего класса опасности [2, 5]. Озон относится к парниковым газам, оказывает существенное влияние на климат, экосистемы и здоровье населения [12, 18]; увеличение его в тропосфере способствует потеплению климата [17]. В приземный слой озон поступает из более высоких слоев атмосферы; в урбанизированных регионах O_3 может образовываться под воздействием солнечной радиации в фотохимических реакциях при участии газов-предшественников [2]. На территориях с малой антропогенной нагрузкой колебания уровня O_3 определяются природными процессами [5, 12, 19], но временами и на фоновых территориях фиксируются резкие возрастания приземных концентраций озона (ПКО), связанные, в основном, с приходом загрязненного в промышленных районах воздуха [9, 10, 14]. Такие опасные для здоровья и экосистем озоновые эпизоды с повышением приземной концентрации озона до критических значений неоднократно фиксировались в ряде стран на Средиземноморском побережье, в том числе и на юго-восточном побережье Крымского полуострова [9, 13, 16, 20].

Наблюдения приземного озона в Крыму проводятся в Государственном природном заповеднике «Карадагский», который расположен на значительном расстоянии от источников промышленного загрязнения атмосферы. В 1986 году на территории заповедника на склоне горы Святая на высоте 180 метров над уровнем моря была установлена автоматическая станция контроля окружающей среды (44°94' N, 35°23' E). С момента создания на станции проводились метеорологические наблюдения

и измерения загрязнения атмосферного воздуха: СО – в 1988–1992 гг., озона – в 1993–2000 гг. С декабря 2005 г. возобновился инструментальный контроль приземного озона [11, 14]. В настоящее время регулярный мониторинг приземного озона проводится на территории Карадагской научно-исследовательской станции им. Т.И. Вяземского РАН, имеющей статус фонового экологического мониторинга (СФЭМ). Станции фонового мониторинга рассматриваются в качестве составной части национальной и международной (глобальной) сети мониторинга окружающей среды, а полученные результаты могут служить региональными стандартами и характеристиками условно чистых территорий.

Результаты обобщенного анализа приземного озона на станции в 2008–2018 гг. представлены в ряде научных публикаций [11, 14], анализ в отдельные годы – в [1, 5]. Приземные концентрации озона в природном заповеднике «Карадагский» характерны для широтного пояса 40–50º с. ш. на отдаленных и сельских (remote and rural) станциях мира и не имеют прямых признаков, характерных для городских и пригородных (urban and suburban) станций, где отчетливо проявляется влияние местных загрязнений [7, 10, 21].

Учитывая важность фонового мониторинга приземного озона, а также то, что СФЭМ является единственной станцией на Черноморском побережье страны в месте массового отдыха, в настоящей работе проводится анализ тенденций и режима озона в последние годы.

Материалы и методы исследований

Измерения ПКО на СФЭМ проводятся оптическим методом с помощью автоматического газоанализатора APOA 370 (HORIBA). Отбор проб осуществляется с использованием фторопластовых трубок на высоте 2 метра от поверхности земли. Использование фторопласта при отборе проб воздуха существенно снижает погрешности измерений, вызванные адсорбцией озона на внутренней поверхности воздухозаборных устройств. Данные непрерывной регистрации озона усредняются за часовой интервал наблюдений с сохранением информации в регистраторе – I/O – EXPANDER (HORIBA). Калибровка газоанализатора проводится один раз в две недели с помощью генератора APMC-370; прибор проходит ежегодную поверку во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в г. Санкт-Петербурге. Метеорологические измерения (температура воздуха, относительная влажность, давление, направление и скорость ветра, количество и интенсивность осадков) проводятся с помощью метеостанций «WS – 600» и «ТРОПОСФЕРА – Н».

Осредненные за час ПКО использованы для расчетов средней за сутки, среднемесячной и сезонной характеристик озона, а также для анализа озоновых эпизодов – случаев увеличения ПКО до критических значений в период 2017–2021 годов.

Результаты исследований

Особый интерес представляет наличие многолетнего тренда ПКО на Черноморском побережье Крыма в период непрерывных измерений [11, 14]. Такой ряд по имеющимся репрезентативным данным представлен периодом 2010–2021 гг.; очевидно, на этой выборке установить статистически достоверный тренд не представляется возможным. Вместе с тем можно отметить относительно ровный ход средней годовой ПКО на СФЭМ в последние пять лет и незначительную межгодовую ее изменчивость в диапазоне значений 63–69 мкг м$^{-3}$ (рис. 1). Это отличает рассматриваемый период (2017–2021 гг.) от предыдущих лет с большими значениями ПКО в 2011 и 2016 гг., так же как и от лет с пониженным содержанием озона в заповеднике в 2013–2015 гг. [14].

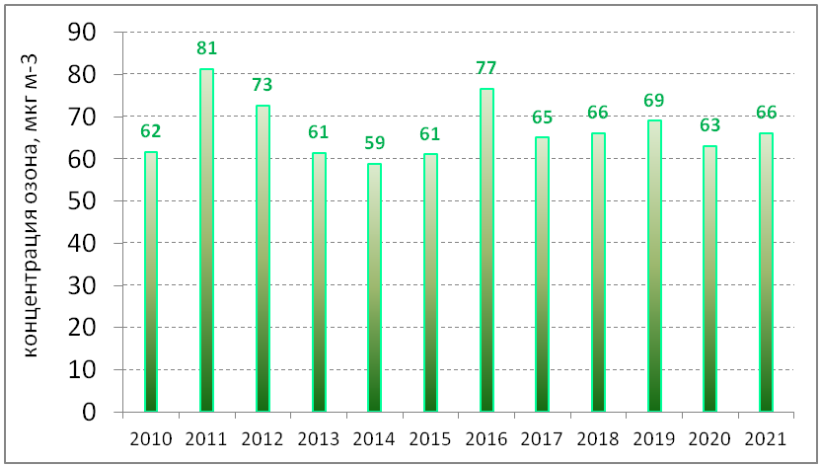


Рис. 1. Средняя годовая приземная концентрация озона в природном заповеднике «Карадагский».
Fig. 1. The average annual surface concentration of ozone in the Karadag Nature Reserve.

Сезонный ход приземной концентрации озона на СФЭМ, рассчитанный по данным за 2017–2021 гг., в общих чертах совпадает с полученным ранее [14]. По осредненным за месяц значениям ПКО четко проявляется бимодальный вид годового хода с весенним и летним максимумами; годовой минимум ПКО приходится на ноябрь-декабрь (рис. 2).

Весенний (чаще всего апрельский) максимум, как и на других прибрежных и материковых равнинных станциях [3, 7, 8], обусловлен усилением вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной тропосферой, увеличением интенсивности стратосферно-тропосферного обмена на фоне годового максимума ОСО [13, 14]. Выраженный июньский «провал» – в среднем на 10 мкг м$^{-3}$ – является следствием

влияния на содержание озона в приземном воздухе аномальных погодных условий с частыми дождями и в среднем более низкой температурой воздуха в отдельные годы. В частности, такими были условия в 2017 и 2021 гг. В 2020 г. июньский минимум не наблюдался, а в 2018 и 2019 гг. пришелся на май.

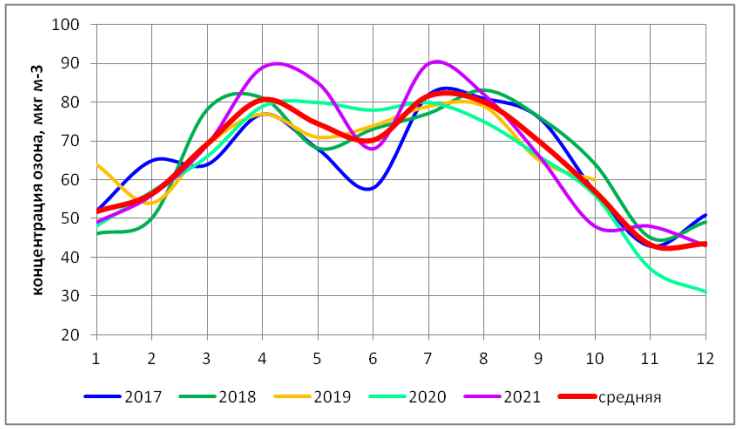


Рис. 2. Средняя месячная приземная концентрация озона в природном заповеднике «Карадагский», 2017–2021 гг.
Fig. 2. The average monthly surface concentration of ozone in the nature reserve "Karadag", 2017–2021 гг.

Летний максимум обусловлен фотохимическим образованием озона, происходящим с участием антропогенных источников загрязнения атмосферы. Согласно классификации, приведенной в [21], сезонный ход концентрации озона в природном заповеднике «Карадагский» отражает взаимосвязь летнего максимума озона с максимальной фотохимической генерацией озона при максимальном прогреве воздуха.

По осредненным данным, в период 2017–2021 гг. весенний максимум (80 мкг $м^{-3}$) на СФЭМ практически совпал с летним (83 мкг $м^{-3}$) при СКО 5–10 мкг $м^{-3}$. Годовая амплитуда средних за месяц ПКО в рассматриваемой пятилетке близка к 40 мкг $м^{-3}$, т. е. имеет место двухкратное увеличение ПКО от холодного сезона к теплому. Типичное для СФЭМ время наступления сезонных экстремумов ПКО характерно для южных регионов Западной Европы, в т. ч. средиземноморских [7, 16, 20]. Отметим также, что в 2018 г. наблюдалось смещение весеннего максимума на март-апрель. Особенностью 2021 г. стало превышение сезонных максимумов почти на 10 мкг $м^{-3}$ в апреле и июле. Такие отклонения от средних величин и времени наступления сезонных максимумов, очевидно, связаны с особенностями крупномасштабных процессов в атмосфере и преобладанием аномального характера погоды. Отметим, что осредненные за рассматриваемый период среднемесячные величины ПКО в первые пять

месяцев оказались на 6–9 % больше, а в летние месяцы – на 2–6 % меньше, чем средние за предыдущие годы [14]. В осенние месяцы с наименьшей изменчивостью ПКО существенных отклонений от средних многолетних величин ПКО не обнаружено.

Суточный ход озона определяется интенсивностью вертикального перемешивания и скоростью фотохимических процессов в атмосфере. Как правило, после ночного минимума рост ПКО начинается после восхода солнца и достигает максимума в послеполуденные часы, затем снижается. На рис. 3 представлен осредненный по сезонам суточный ход ПКО на СФЭМ. Обращает на себя внимание практически отсутствие суточной амплитуды ПКО зимой (около 5 мкг $м^{-3}$) и ее наличие большую часть года: весной и осенью она составляет около 15 мкг $м^{-3}$, летом 20 мкг $м^{-3}$. Такие сезонные характеристики устойчивы, в рассматриваемом периоде они совпали с данными, полученными ранее [1, 14].

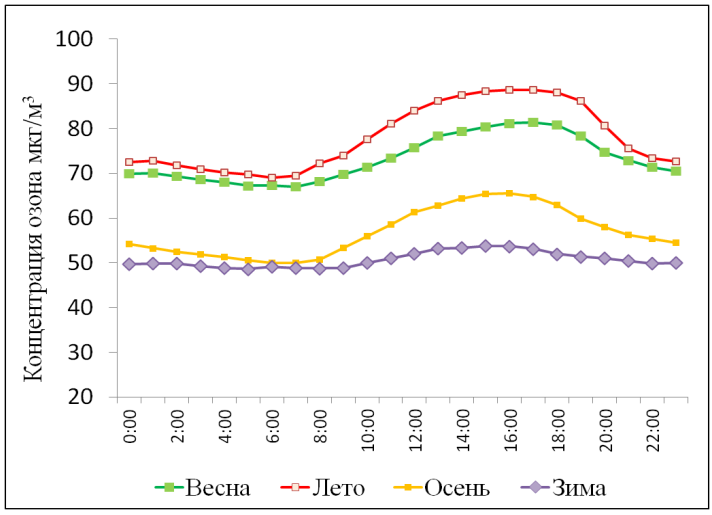


Рис. 3. Средний сезонный суточный ход ПКО на СФЭМ, 2017–2021 гг.
Fig. 3. Average seasonal daily course of SOC on BEMS (Background Environmental Monitoring Station), 2017–2021 гг.

Второй отличительной особенностью ПКО на СФЭМ является стабильность содержания озона в приземном воздухе в темное время суток: осенью и зимой на уровне 50–55 мкг $м^{-3}$, весной и летом около 70 мкг $м^{-3}$. Ночной ветер на СЭФМ, которая находится на склоне горы Святая на высоте 180 м, чаще всего является склоновым, обеспечивающим поступление воздуха из свободной тропосферы с характерными для ее нижней части концентрациями озона [8, 15]. Кроме того, как отмечается в [6], в восточной части Крымского полуострова ночная циркуляция находится под совместным влиянием Черного и Азовского морей. Дневной озон

чаще всего формируется под влиянием бризовой циркуляции, обеспечивающей поступление воздуха с моря, где озона больше, чем в приземном воздухе над побережьем. Дневной бриз, в общем, представляет собой гравитационное течение более холодного морского воздуха, оно занимает нижнюю часть атмосферного пограничного слоя. Отметим, по данным многолетних наблюдений в летнее время днем наиболее часто на СФЭМ фиксируется юго-восточный ветер. Местные ветры проявляются при ослаблении крупномасштабного переноса; при этом можно заметить, что ночной бриз из-за меньшего контраста между сушей и морем развивается слабее [6].

При выраженной форме осредненного суточного цикла ПКО в отдельные дни под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов (прохождение фронта, резкая смена воздушных масс, затяжные дожди, туманы и т. п.) типовая внутрисуточная динамика ПКО может существенно нарушаться. Выборка наибольших в году в каждый час суток величин ПКО в период 2017–2021 гг. отображена на рис. 4. Как видно, экстремально большие величины ПКО, превышающие 160 мкг м$^{-3}$ (ПДК$_{м.р.}$ озона), фиксировались на СФЭМ в 15–19 часов. Меньшие, но также аномальные всплески ПКО (0,8–0,9 ПДК$_{м.р.}$) были отмечены на станции и в ночное время, и ранним утром (2021 год).

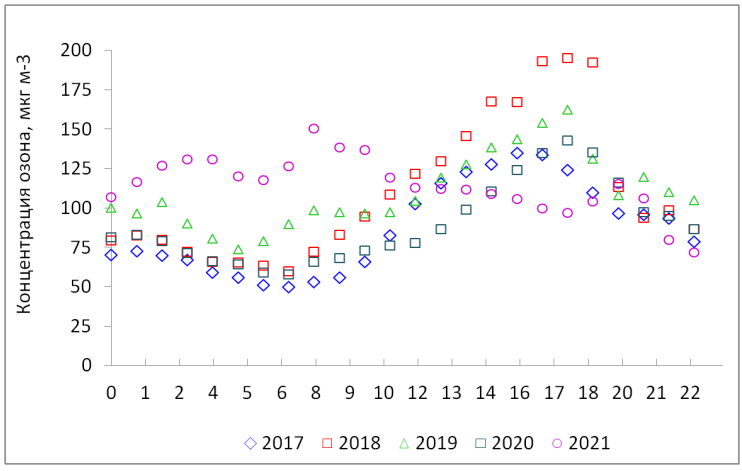


Рис. 4. Максимальная в году часовая ПКО, 2017–2021 гг.
Fig. 4. The maximum per year hourly SOC, 2017–2021.

Повышенные ночные величины и небольшая амплитуда суточной цикличности ПКО отличают режим приземного озона на фоновой СФЭМ от материковых станций [3, 5, 7]. На СФЭМ ночные концентрации примерно в 2 раза больше, чем в одном широтном поясе на равнинных станциях «сельского типа» в Европе [7], в 3–4 раза больше, чем в пригороде

Москвы [3, 8]. Вопрос – на каком удалении от прибрежной полосы данные СФЭМ являются репрезентативными – пока остается открытым. Получить ответ на этот вопрос, очевидно, можно было бы при проведении экспериментальных измерений ПКО на удалении от побережья, например в степной зоне полуострова.

Озоновые эпизоды. Случаи превышения ПКО предельно допустимой разовой концентрации озона ($ПДК_{м.р.}$), в соответствии с российскими стандартами равной 160 мкг $м^{-3}$ [4], принято называть озоновыми эпизодами. На фоновой станции в природном заповеднике озоновые эпизоды имеют адвективную природу и связаны с приходом загрязненных воздушных масс из удаленных районов. В [9, 10, 13, 14] подробно описаны случаи зафиксированных на СФЭМ озоновых эпизодов в предшествующие годы, среди которых выделяется 2011 год с 12 случаями превышениям $ПДК_{м.р.}$ В рассматриваемый период (2017–2021 гг.) превышения $ПДК_{м.р.}$ зафиксированы в 2018 году 24 августа (суточный максимум ПКО около 170 мкг $м^{-3}$) и 25 августа, когда ПКО увеличивалась до 195 мкг $м^{-3}$ и превысила информационный порог для населения (180 мкг $м^{-3}$), принятый для Европейского Союза. Аномальное увеличение ПКО в августе 2018 г., возможно, связано с активным образованием антропогенного озона в шлейфе воздуха с повышенным содержанием углеводородов, источником которых могли стать дорожное строительство на полуострове и возросшая на пике курортного сезона интенсивность транспортного потока.

Другой случай превышения $ПДК_{м.р.}$ наблюдался 26 апреля 2019 г.: в 18 ч концентрация озона в этот день повышалась на станции до 162 мкг $м^{-3}$, а с 14 до 19 ч ПКО превышала 0,8 $ПДК_{м.р.}$ (табл. 1). Аналогов в истории наблюдений на СФЭМ этот весенний эпизод не имеет. В этот день в Крыму в малоградиентном барическом поле наблюдалась сухая умеренно теплая погода с повышением приземной температуры на станции до 15 °С, недостаточная для локальной генерации озона с образованием высоких концентраций [8]. Как показал траекторный анализ (рис. 5а), в этот день с юго-востока пришла воздушная масса, накануне прошедшая над новороссийской агломерацией, где много источников углеводородов. Там эти предшественники озона могли поступить в атмосферу и обеспечить в распространявшемся на Крым шлейфе загрязненного воздуха значительную генерацию озона. Не исключено, что определенную роль могли сыграть загрязнения, поступавшие в воздух в районе строительства крымской автомагистрали.

Большинство весенних случаев аномального повышения ПКО на Карадаге связано с поступлением богатого озоном воздуха из верхней тропосферы при прохождении через регион планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ); типичная синоптическая ситуация смещения в субтропические широты ПФВЗ представлена на рис. 5б. Подчеркнем, что в эпизодах такого рода ПКО на СФЭМ ни разу не превышала $ПДК_{м.р.}$

(таблица). Наиболее продолжительный эпизод вторжения субстратосферного воздуха наблюдался в марте 2018 г.; 18 марта ночью, 23 марта вечером ПКО увеличивалась до 130–134 мкг $м^{-3}$ (рис. 5б и 5г). Под воздействием ПВФЗ 23 марта повышенный уровень озона сохранялся дольше, чем во всех других эпизодах в рассматриваемом периоде 2017–2021 гг. – почти 13 ч, достигнув в максимуме 0,83 $ПДК_{м.р.}$

Таблица. Приземная концентрация озона (мкг $м^{-3}$) в эпизодах повышенного и высокого уровня озона на СФЭМ в период 2017–2021 гг.
Table. Surface concentration of ozone (μg m-3) in episodes of high ozone levels in the Karadag Nature Reserve in the period 2017-2021

Год	Дата	Время, ч	Длительность, ч	ПКО
2017	5 августа	21–23	3	129–138
	13 августа	15–20	6	128–135
	17 сентября	20	1	128
2018	18 марта	3–5	3	129–132
	23 марта	7–19	13	128–134
	4 августа	15–19	5	130–149
	5 августа	12–23	12	134–140
	24 августа	16–21	6	130–150
		18–19 ч	3	170
	25 августа	13–14	2	130–146
		15–19	5	168–192
	26 августа	12–20	9	131–152
	4 сентября	15	1	134
	22 сентября	17	1	128
2019	26 апреля	14–19	6	128–154
		18	1	162
	14 августа	14–21	8	128–155
2020	16 мая	1	1	142
	10 июня	15	1	136
	31 августа	17–19	3	133–136
2021	23 апреля	4–6	3	131–133
	2 мая	11	1	132
	6 мая	16–17	2	129–130
	7 мая	14–16	3	129–132
	8 мая	3–4	2	131
		8–10	3	137–150
	19 июля	4	1	131
	6 августа	15–16	2	139–141

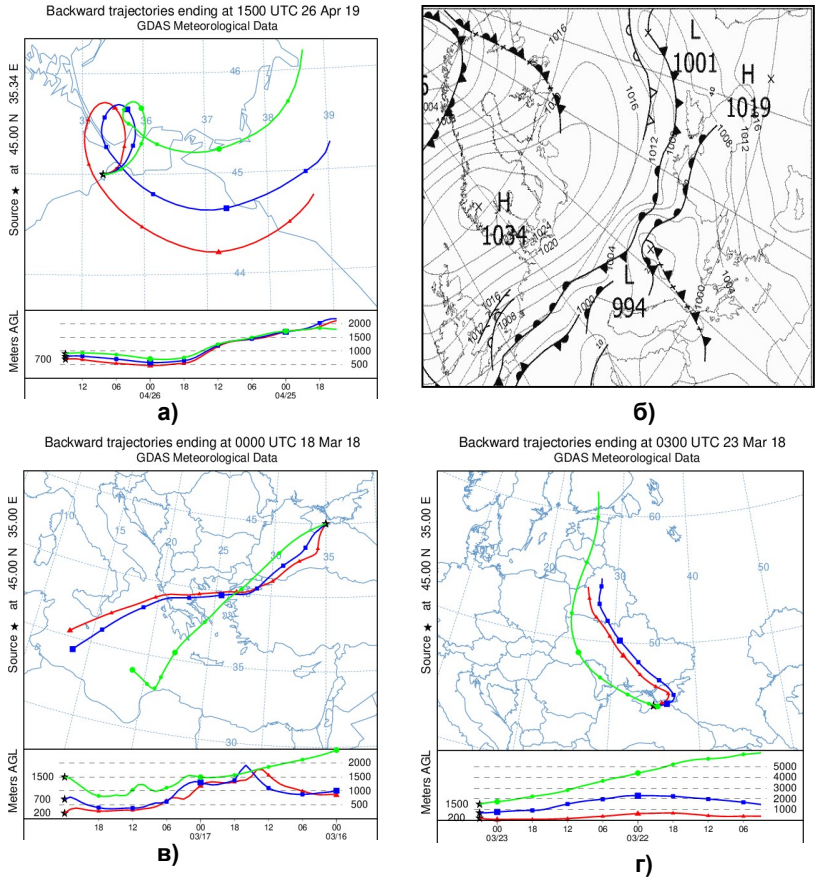


Рис. 5. Обратные траектории частиц, поступавших на Крымское побережье: 24 апреля 2019 г. (а); 18 марта 2018 г. (в); 23 марта 2018 г. (г); поле приземного атмосферного давления с фронтальными зонами 18 марта 2018 г. (б) (https://www.ready.noaa.gov/).
Pic. 5. Reverse trajectories of particles arriving at the Crimean coast: April 24, 2019 (a); March 18, 2018 (в); March 23, 2018(г); surface atmospheric pressure field with frontal zones on March 18, 2018 (б) (https://www.ready.noaa.gov/).

При том, что озоновые эпизоды на СФЭМ – явление редкое, приближение к критическим значениям (от 0,8 до 1,0 $ПДК_{м.р.}$) наблюдается несколько дней в году. В 2017 г. такие события фиксировались 3 дня (август, сентябрь), в 2018 г. – 9 дней (март, август, сентябрь), в 2019 г. – 2 дня (апрель, август), в 2020 г. – 3 дня (май, июнь, август). Как видно, август является месяцем с самой большой вероятностью повышения концентрации озона в приземном воздухе до критических значений. Заметим, что только 1 раз в рассматриваемом периоде ПКО превышала $ПДК_{м.р.}$ два дня подряд, а высокий уровень озона удерживался в течение 2–5 часов.

Выводы

Важность мониторинга приземного озона в природном заповеднике «Карадагский» определяется не только статусом станции фонового экологического мониторинга, но тем, что СФЭМ является единственным пунктом регулярных измерений ПКО на Черноморском побережье страны.

Данными измерений часовых концентраций приземного озона в 2017–2021 гг. подтверждена стабильность режима ПКО на фоновой станции с незначительной межгодовой изменчивостью ПКО в последние годы. Осредненные за рассматриваемый период среднемесячные величины ПКО в январе–мае оказались всего на 6–9 % больше, а в летние месяцы лишь на 2–6 % меньше, чем в предыдущие годы. В осенние месяцы значимых отклонений от средних многолетних величин ПКО не обнаружено.

К особенностям режима ПКО на СФЭМ относится повышенный уровень озона по сравнению с равнинными станциями в темное время суток: в среднем за 2017–2021 гг. ночные ПКО изменялись осенью и зимой в диапазоне 50–55 мкг $м^{-3}$, весной и летом – около 70 мкг $м^{-3}$. Средние за сезон суточные максимумы мало отличаются от предыдущих лет и составили 55, 65, 80 и 90 мкг $м^{-3}$, соответственно, зимой, осенью, весной и летом.

Режим ПКО в 2017–2021 гг. оставался характерным для фоновых станций, влияние антропогенных источников обнаруживается крайне редко. В рассматриваемый период зафиксированы всего три озоновых эпизода: 24 и 25 августа 2018 г. с повышением ПКО до 170–195 мкг $м^{-3}$, 24 апреля 2019 г. с увеличением концентрации до 162 мкг $м^{-3}$. Такие экстремально высокие уровни озона наблюдались при поступлении загрязненного воздуха из удаленных районов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность инженерам станции фонового экологического мониторинга Д.Н. Давидовичу, А.Н. Родионову, Л.А. Столярову, В.Г. Медведеву за обеспечение устойчивой работы приборов и участие в сборе первичной информации.

Научный сотрудник ФГБУН «КНС-ПЗ РАН» В.А. Лапченко принял участие в написании статьи в рамках темы Гос. задания №121032300023-7 «Изучение особенностей структуры и динамики сухопутных экосистем в различных климатических зонах»; научный сотрудник ФГБУ «Гидрометцентр России» И.Н. Кузнецова приняла участие в написании статьи в рамках Гос. задания № 169-00039-22-01.

Список литературы

1. *Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б. и др.* Концентрация тропосферного озона на территории России в 2020 году // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. В печати.

2. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: изд-во ИОА СО РАН, 2010. 525 с.

3. *Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.* Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 122-135.

4. ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

5. *Еланский Н.Ф.* Российские исследования атмосферного озона в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 2. С. 141-155.

6. *Ефимов В.В., Крупин А.В.* Бризовая циркуляция в районе Черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 18-26.

7. *Звягинцев А.М.* Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 46-55.

8. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И.* Исследования и мониторинг приземного озона в России // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 56-70.

9. *Звягинцев А.М, Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А., Брусова Н.Е., Архангельская А.А., Теребе Н.В., Лезина Е.А.* Причины и факторы положительных аномалий концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 493-502.

10. *Лапченко В.А., Звягинцев А.М.* Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 178–181.

11. *Лапченко В.А., Звягинцев А.М.* Приземный озон в Крыму // Пространство и время. 2014. № 2 (16). С. 254-257.

12. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2019 г. М.: ИГКЭ, 2020. 100 с.

13. *Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А.* Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 515-523.

14. *Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А.* Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям 2009–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 102-113.

15. *Angevine W.M., Senff C.J., White A.B., Williams E.J., Koermer J., Miller S.T.K., Talbot R., Johnston P.E., Mckeen S.A., Downs T.* Coastal boundary layer influence on pollutant transport in New England // J. Appl. Meteor. 2004. Vol. 43. P. 1425-1437.

16. *Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Carretero J., Liger E.* Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast // The Science of the Total Environment. 2002. Vol. 299. P. 97-113.

17. EEA, 2010. The European environment. State and outlook 2010. Synthesis. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 228 p.

18. *Harucha M.J., Legohn A.S.* Nonlinearity in human heath response to ozone: Experimental laboratory consideration // Atmos.Environ. 2007. Vol. 41, no. 22. P. 4559-4570.

19. *Martins D.K., Stauffer R.M., Thompson A.M., Knepp T.N., Pippin M.* Surface ozone at a coastal suburban site in 2009 and 2010: Relationships to chemical and meteorological processes // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117 (D5). DOI: 10.1029/2011JD016828.

20. *Ribas A., Penuelas J.* Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin // Atmos. Environ. 2004. Vol. 38. P. 985-992.

21. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I.* A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results // Atmos. Chem. Phys. 2007. Vol. 7. P. 6099-6117.

References

1. *Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B. et al.* Tropospheric ozone content over the Russian Federation in 2020. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2022, Vol. 35, no. 6. In print.

2. *Belan B. D.* Ozon v troposfere. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2010, 525 p. [in Russ.].

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

4. GN 2.1.6.1338-03. Gigienicheskie normativy. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernom vozduhe naselennyh mest. [in Russ.].

5. *Elansky N.F.* Russian studies of atmospheric ozone and its precursors in 2015–2018. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2020, vol. 56, no. 2, pp. 141-155.

6. Efimov V.V., Krupin A.V. Breeze circulation in the Black Sea Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2016, no. 4, pp. 18-26.

7. *Zvyagintsev A. M.* Basic Characteristics of Tropospheric Ozone Variations over Europe. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2004, no. 10, pp. 36-45.

8. *Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I.* Investigation and monitoring of surface ozone in Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2017, vol. 365, pp. 56-70. [in Russ.].

9. *Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I. N., Shalygina I.Yu., Lapchenko V.A., Brusova N.E., Arkhangelskaya A.A., Tereb N.V., Lezina E.A.* Causes and Factors of Positive Surface Ozone Anomalies in the Moscow Region and on the Southeastern Coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, vol. 29, no. 05, pp. 551-560.

10. *Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M.* Trace Atmospheric Gases in the Karadag Nature Reserve in Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, vol. 28, no. 04, pp. 308-311.

11. *Lapchenko V. A., Zvyagintev A. M.* Surface Ozone in Crimea. *Prostranstvo I Vremya* [*Space and time*], 2014, no. 2(16). pp. 254-257. [in Russ.].

12. Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchej prirodnoj sredy na territorii stran SNG za 2019 g. M.: IGKE Publ, 2020. 100 p. [in Russ.].

13. *Shalygina I. Yu., Kuznetsova I. N., Zvyagintsev A. M., Lapchenko V. A*. Surface ozone at coasts of the Balkans and the Crimea. *Optika Atmosfery i Okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2017, vol. 30, no. 6, pp. 515–523 [in Russi].

14. *Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A.* Surface ozone regime at Kara Dag station in Crimea according to observations in 2009-2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, no. 2 (372), pp. 102-113. [in Russ.].

15. *Angevine W.M., Senff C.J., White A.B., Williams E.J., Koermer J., Miller S.T.K., Talbot R., Johnston P.E., Mckeen S.A., Downs T.* Coastal boundary layer influence on pollutant transport in New England. *J. Appl. Meteor*., 2004, vol. 43, pp. 1425-1437.

16. *Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Carretero J., Liger E.* Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast. *The Science of the Total Environment*. 2002, vol. 299, pp. 97-113.

17. EEA, 2010. The European environment. State and outlook 2010. Synthesis. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 228 p.

18. *Harucha M.J., Legohn A.S.* Nonlinearity in human heath response to ozone: Experimental laboratory consideration. *Atmos.Environ*. 2007, vol. 41, no. 22, pp. 4559-4570.

19. *Martins D.K., Stauffer R.M., Thompson A.M., Knepp T.N., Pippin M.* Surface ozone at a coastal suburban site in 2009 and 2010: Relationships to chemical and meteorological processes. *J. Geophys. Res*, 2012, vol. 117 (D5). DOI: 10.1029/2011JD016828.

20. *Ribas A., Penuelas J.* Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin. *Atmos. Environ.* 2004, vol. 38, pp. 985-992.

21. *Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I.* A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results. *Atmos. Chem. Phys.,* 2007, vol. 7, pp. 6099-6117.

Поступила 28.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;
принята в печать 08.06.2022.
Submitted 28.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;
accepted for publication 08.06.2022.

DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-181-184
УДК 551.5

Двадцать вторая сессия Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22)

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

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

Приводятся основные результаты работы 22-й сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22), проведенного в формате видеоконференции в мае 2022 г. В СЕАКОФ-22 приняли участие специалисты НИУ и УГМС Росгидромета, эксперты из метеослужб и исследовательских центров стран СНГ, а также ученые, преподаватели, аспиранты и студенты высших учебных заведений со специализацией в области метеорологии и климатологии и другие заинтересованные лица. Всего на форуме были зарегистрированы 112 участников из 9 стран.

Ключевые слова: Северо-Евразийский климатический форум, Северо-Евразийский климатический центр, климатическая модель, атмосферная циркуляция, консенсусный прогноз, среднесезонная аномалии температуры воздуха и осадков

Twenty-second session of North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-22)

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

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

The main results of the 22th session of the North Eurasian Climate Forum (NEACOF-22) in videoconference mode on May 26, 2022 are presented. Specialists from the research institutes and forecast organizations of Roshydromet, experts from meteorological services and research centers of the CIS countries, as well as scientists, teachers, graduate students and students of higher educational institutions with a specialization in meteorology and climatology, and other interested persons took part in NEACOF-22. In total, 112 participants from 9 countries were registered.

Keywords: North Eurasian Climate Forum, North Eurasian Climate Center, climate model, atmospheric circulation, consensus forecast, seasonal air temperature and precipitation anomaly

26 мая 2022 года Северо-Евразийский климатический центр (СЕАКЦ) провел 22-ю сессию Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22) в формате видеоконференции.

В ходе работы были представлены: обзор научно-оперативной деятельности СЕАКЦ в 2021 году; анализ успешности консенсусного прогноза на зиму 2021/2022 гг.; результаты воспроизведения атмосферной циркуляции усовершенствованной моделью ПЛАВ072L96; предварительные разработки технологии оценки урожайности яровых культур с использованием имитационных моделей урожайности и прогноза климатической модели ИВМ РАН; затрагивались вопросы, связанные с управлением водными ресурсами Санкт-Петербурга в условиях меняющегося климата.

В практической части программы обсуждались результаты мониторинга циркуляционных условий в стратосфере и тропосфере прошедшей зимой 2021/2022 гг.; анализировались сезонные прогнозы на лето 2022 г. по результатам ведущих мировых прогностических центров. Во время сессии также состоялась дискуссия по оперативно-прогностическим вопросам, включая переход на новые климатические нормы 1991–2020 гг. Представители национальных метеослужб стран СНГ представили данные климатического мониторинга и сезонного прогнозирования по оценкам своей метеослужбы.

Отдельный доклад был посвящен обсуждению возможных последствий воздействия ожидаемых аномалий метеопараметров на сферы экономики и социальной жизни.

Все пункты программы СЕАКОФ-22 и поставленная основная задача выполнены, составлен консенсусный прогноз в вероятностной форме для температуры воздуха и осадков на предстоящий летний сезон 2022 года по территории Северной Евразии.

По заключению участников СЕАКОФ-22 и согласно консенсусному прогнозу, лето 2022 года ожидается теплее нормы на большей части Северной Евразии (рис. 1). В Тюменской области и на севере Красноярского края положительные аномалии температуры прогнозируются с наиболее высокой вероятностью 60–80 %. На юге и западе ЕТР, в Белоруссии, на территории Молдавии, в республиках Закавказья вероятность градации температуры выше нормы составляет 45–55 %. В южной половине Сибирского федерального округа и на северо-востоке Дальневосточного федерального округа отмечается высокая несогласованность прогнозов. На территории Дальнего Востока Российской Федерации температура ожидается выше нормы с вероятностью 40–50 %.

В Центральной Азии температурный фон прогнозируется выше нормы с умеренной вероятностью 40–45 %, неопределенность в прогнозе увеличивается к северо-востоку Казахстана.

Избыточное увлажнение с вероятностью до 45 % ожидается в северо-западной и центральной частях ЕТР (рис. 2), на юге Западной Сибири и в

северо-восточных районах Казахстана, в отдельных северных районах Сибири, в Чукотке, Магаданской области, на Камчатке, юге Сахалина, в Амурской области, Забайкальском крае, Хабаровском крае (вероятность 30–35 %). Дефицит осадков возможен (вероятность 35–45 %) в центре и на востоке Украины, в Молдавии, Крыму, Краснодарском крае, Ростовской области, Северо-Кавказском федеральном округе, а также в республиках Закавказья с вероятностью 35–45 %. Ниже нормы осадков прогнозируется (вероятность до 65 %) в центральных районах Тюменской области, центральных и северных районах Красноярского края, центральной части Якутии. На территории Центральной Азии, за исключением северо-востока Казахстана, в прогнозе присутствует высокая степень неопределенности.

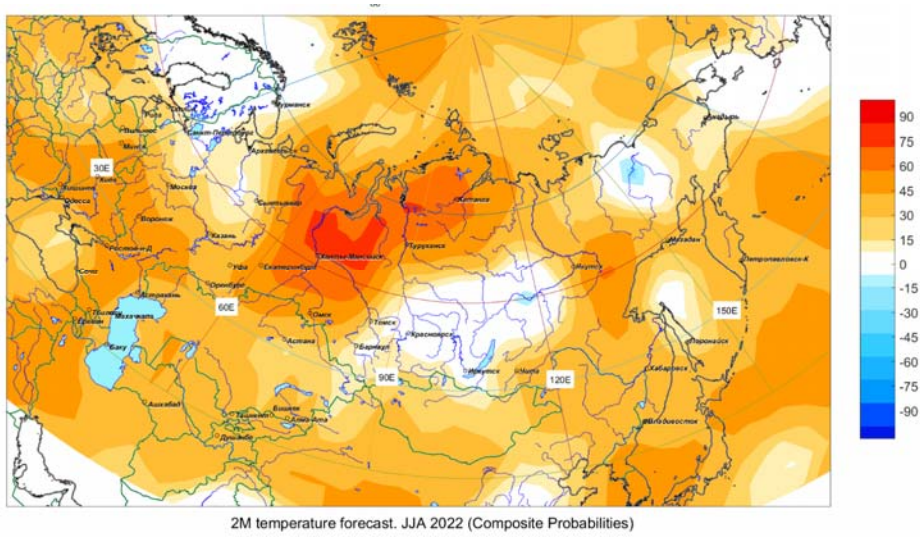


Рис. 1. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии температуры воздуха на лето 2022 г. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 6 моделей (INM, ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены красным, а отрицательные – синим цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 1. Consensus forecast map of the mean seasonal air temperature anomaly for the summer of 2022 in a probabilistic form, calculated based on the interpretation of data from 6 models (INM, PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are shown in red, and negative ones in blue, the color saturation corresponds to the probability of an anomaly.

Консенсусный прогноз носит консультативный характер и может применяться к конкретным регионам с учетом предсказуемости атмосферных процессов, региональных климатических особенностей и качества современных гидродинамических моделей.

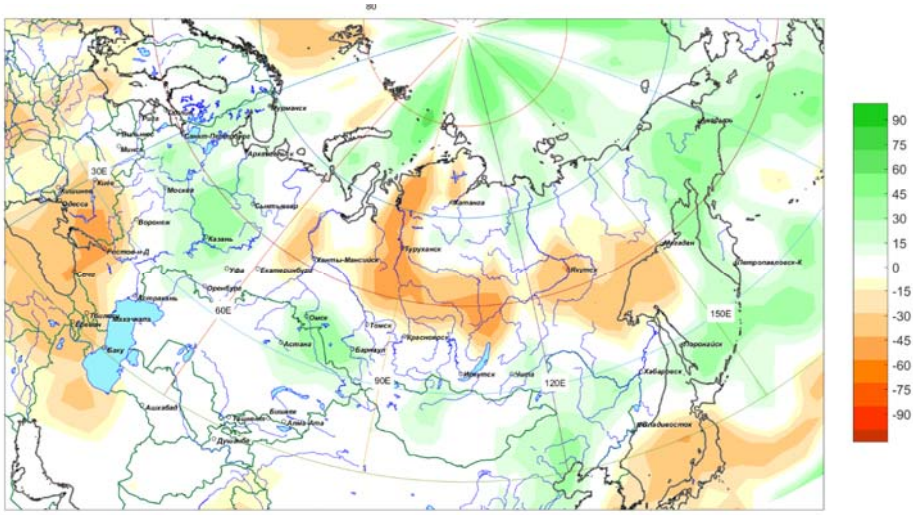


Рис. 2. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии осадков на лето 2022 г. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 6 моделей (INM, ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены зеленым, а отрицательные – красным цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 2. Consensus forecast map of the mean seasonal precipitation anomaly in summer 2022 in a probabilistic form, calculated based on the interpretation of data from 6 models (INM, SLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are shown in green, and negative ones in red, the color saturation corresponds to the probability of the anomaly.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект №22-17-00247).

Правила для авторов размещены на сайте журнала:
https://meteoinfo.ru/images/misc/proceedings/rules-for-authors-2020new.pdf

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 2 (384)

Под редакцией
канд геогр. наук А.А. Алексеевой

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 08.06.2022. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 300 экз. Заказ № 1947
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3