

УДК: 551.58/ 528.88

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-120-135

А.Н. Шихов¹, Р.К. Абдуллин¹, А.В. Чернокульский², И.О. Ажигов¹, Ю.И. Ярынич^{2,3},
А.А. Спрыгин⁴, Д.П. Корнев⁵

СОЗДАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ И ВЕБ-СЕРВИСА «КОНВЕКТИВНЫЕ ОПАСНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА»

АННОТАЦИЯ

Конвективные опасные явления погоды (КОЯП), такие как сильные ливни, крупный град, шквалы и смерчи, являются одним из значимых источников возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера на территории России. Территория Центрального Федерального округа (ЦФО) отличается максимальной в России плотностью населения, что с одной стороны создает наибольшие риски, связанные с конвективными явлениями, а с другой стороны – обеспечивает условия для сбора максимально подробной о них (включая случаи, пропущенные наблюдательной сетью и зафиксированные по факту нанесенного ущерба). В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографической базы данных о случаях КОЯП для территории ЦФО. Основным отличием разработанной базы данных от существующих аналогов является ее структура, включающая сведения как о самих явлениях и их последствиях, так и об условиях их возникновения. К последним относятся, в частности, характеристики мезомасштабных конвективных систем (конвективных штормов) по данным с метеорологических спутников и диагностические переменные, характеризующие состояние атмосферы по данным систем реанализа CFS и ERA-5. Также реализованы связи с ранее опубликованными базами данных смерчей в Северной Евразии и крупных ветровалов в Европейской части России. В настоящее время собраны данные о более чем 2 тыс. случаях КОЯП на территории ЦФО за период 2001–2020 гг., большинство из которых были зафиксированы по факту нанесенного ущерба. Для управления базой данных и ее редактирования используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL, а обеспечение открытого доступа к базе данных в сети Интернет реализовано путем создания картографического веб-приложения, доступного по адресу <http://convective-storms.psu.ru/>.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конвективные опасные метеорологические явления, шквалы, смерчи, крупный град, сильные ливни, картографическая база данных, картографический веб-сервис, Центральный федеральный округ.

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, ул. Букирева, 15, Пермь, Россия, *e-mail*: gis@psu.ru

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Пыжевский пер. 3, Москва, Россия, *e-mail*: a.chernokulsky@ifaran.ru

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 1, Москва, Россия, *e-mail*: julia.yarinich@yandex.ru

⁴ Научно-производственное объединение «Тайфун», 249038, ул. Победы, 4, г. Обнинск, Калужская область, Россия, *e-mail*: spralexandr@gmail.com

⁵ Центральная аэрологическая обсерватория, 141707, ул. Первомайская, д. 3, г. Долгопрудный, Московская область, Россия, *e-mail*: kdan1@yandex.ru

Andrey N. Shikhov¹, Rinat K. Abdullin¹, Alexander V. Chernokulsky², Igor O. Azhigov¹, Yulia I. Yarinich^{2,3}, Alexander A. Sprygin⁴ and Daniil P. Korenev⁵

DEVELOPMENT OF A GIS DATABASE AND WEB SERVICE "HAZARDOUS CONVECTIVE WEATHER EVENTS ON THE TERRITORY OF CENTRAL FEDERAL DISTRICT"

ABSTRACT

Hazardous convective weather events (HCWE), such as heavy rainfall, large hail, squalls and tornadoes, are one of the substantial sources of natural emergencies in Russia. The territory of the Central Federal District (CFD) is characterized by the highest population density in Russia. On the one hand, this leads to increased risks associated with HCWE, but on the other hand, it provides the possibilities for collecting the most detailed information on them (including the events missed by the observation network and reported based on damage assessment). In this study, we consider the structure and information content of the GIS database of HCWE for the territory of the CFD. The main advantage of the developed database comparing with existing analogues is its structure, which includes information on both the events themselves and their consequences, and the conditions of their occurrence. This includes, in particular, the characteristics of meso-scale convective systems (convective storms) based on the images from meteorological satellites and diagnostic variables characterizing the atmospheric environments according to the data from ERA-5 and CFS reanalysis systems. Also, the developed database is associated with previously published databases on tornadoes in Northern Eurasia and large-scale windthrow events in European Russia. At present, we compiled the data on more than 2.000 cases of HCWE in the CFD for the period 2001-2020, most of which were reported based on damage assessment. The open-source PostgreSQL DBMS is used to manage and edit the database. Open access to the database on the Internet is implemented through an online web map service available at <http://convective-storms.psu.ru/>.

KEYWORDS: hazardous convective weather events, squalls, tornadoes, large hail, heavy rainfalls, GIS database, online web map service, Central Federal District.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно на территории России фиксируется множество случаев конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) – сильных ливней, шквалов, крупного града и смерчей, которые отличаются внезапностью возникновения и сложностью прогнозирования, наносят значительный ущерб и могут приводить к гибели людей. Ряд исследований показывает, что на фоне современного изменения климата условия для развития глубокой конвекции и соответственно, связанных с ней КОЯП могут стать более благоприятными [*Diffenbaugh et al.*, 2013; *Meredith et al.*, 2015; *Pucik et al.*, 2017; *Radler et al.*, 2019]. Однако подтвердить или опровергнуть эту гипотезу применительно к конкретному региону часто не позволяет отсутствие многолетней и репрезентативной (независимой от плотности населения и

¹ Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; e-mail: gis@psu.ru

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky 3, 119017, Moscow, Russia; e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

³ M.V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia; e-mail: julia.yarinich@yandex.ru

⁴ Typhoon Research and Production Association, Pobedy str 4, 249038, Obninsk, Kaluga region, Russia, e-mail: spralexandr@gmail.com

⁵ Central Aerological Observatory, Pervomaiskaya str. 3, 141707, Dolgoprudny, Moscow region, Russia, e-mail: kdan1@yandex.ru

наблюдательной сети) информации о случаях КОЯП. Закономерности пространственно-временного распределения КОЯП остаются сравнительно малоизученными по причине ограниченности выборки, обусловленной локальным характером этих явлений.

В последние годы в мире существует тенденция к более детальному документированию случаев КОЯП, в том числе пропущенных метеостанциями. Важнейшим источником информации о них становятся наблюдения очевидцами самих явлений и отчеты о нанесенном ущербе, имеющие географическую и временную привязку. Такие отчеты могут быть проверены по спутниковым и радиолокационным данным. Наибольший опыт систематизации данных о случаях КОЯП накоплен в США, где национальным центром климатических данных (National Climatic Data Center, NCDC) создана база данных опасных явлений погоды (Storm Events Database). В нее включаются явления, зафиксированные метеостанциями национальной метеослужбы, либо нанесшие социально-экономический ущерб, а также прочие аномальные метеорологические явления. Всего база данных включает 1,2 млн. записей за период с 1950 г. до настоящего времени [Edwards et al., 2013].

В Европе данные очевидцев и отчеты об ущербе составляют основу информационного наполнения Европейской базы данных опасных явлений погоды ESWD¹, разработанной Европейской лабораторией интенсивных штормов (ESSL) [Dotzek et al., 2009; Groenemeijer et al., 2017]. Однако для Европейской территории России (ЕТР) в ESWD публиковались данные далеко не о всех случаях КОЯП, даже нанесших значительный ущерб, кроме того, база содержит множество ошибок [Chernokulsky et al., 2020]. Таким образом, данные ESWD для ЕТР нельзя считать репрезентативными.

Для территории России в настоящее время доступны следующие официальные источники данных о случаях КОЯП:

- Данные метеостанций: срочные наблюдения², а также отдельно наблюдения за характеристиками погоды³.
- Ежемесячные обзоры аномальных гидрометеорологических явлений на территории РФ в журнале «Метеорология и гидрология»⁴.
- База данных ЕСИМО об опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социально-экономический ущерб⁵.

Перечисленные информационные ресурсы также не являются репрезентативными. Большое количество явлений, в том числе вызвавших значительный ущерб, пропускается из-за редкой метеорологической сети, также в ряде случаев некорректно определяется тип явления (например, шквал или смерч). Это определяет актуальность систематизации данных о случаях КОЯП для территории России и их публикации на открытых сервисах. В последние годы важным источником данных о случаях КОЯП, помимо официальных сведений, анализа сообщений очевидцев и информации о нанесенном ущербе, является

¹ European Severe Weather Database. Электронный ресурс: <https://eswd.eu/> (дата обращения 03.04.2021).

² Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коршунова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/345-atmosfernyeyavleniya-sroki#описание-массива-данных> (дата обращения 03.04.2021).

³ Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения 03.04.2021).

⁴ Научно-технический журнал «Метеорология и гидрология». Электронный ресурс: <http://mijournal.ru/archive> (дата обращения 03.04.2021).

⁵ Стихийные бедствия. Электронный ресурс: <http://data.oceaninfo.ru/applications/disaster/index.jsp> (дата обращения 03.04.2021).

также идентификация нарушений лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами по спутниковым снимкам [Shikhov, Chernokulsky, 2018; Shikhov et al., 2020].

Создание репрезентативных баз данных о случаях КОЯП на основе интеграции сведений, полученных из множества источников, имеет значение не только для оценки пространственно-временного распределения явлений, но и для последующего изучения условий их возникновения, а также для верификации моделей прогноза [Groenemeijer, Kuhne, 2014; Groenemeijer et al., 2017]. В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографической базы данных КОЯП, разрабатываемой авторами для территории Центрального Федерального округа (ЦФО). Выбор данной территории обусловлен тем, что она отличается наибольшей в России плотностью населения, относительно высокой полностью наблюдательной сети, полностью попадает в зону обзора доплеровских радиолокаторов, а также метеорологических спутников (с наличием архива данных за длительный период времени). Это обеспечивает возможность сбора максимально полной базы данных о случаях КОЯП, а также взаимной верификации данных наземных, радиолокационных и спутниковых наблюдений. Наполнение базы данных производится за период с 2001 г. по н.в., что обусловлено возможностью получения информации из ряда источников, прежде всего электронных СМИ и социальных сетей, только за этот период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура базы данных и основные источники информации

Структура базы данных о случаях КОЯП должна учитывать природу самих явлений, а также особенности источников информации о них. Основной проблемой при ее наполнении является необходимость группировки множества сообщений о случаях КОЯП, фактически связанных с одним и тем же явлением, вызванным прохождением одной мезомасштабной конвективной системы (конвективного шторма). Поскольку база данных создается не только для каталогизации самих случаев КОЯП, но и для анализа условий их возникновения, ее структура должна включать три иерархических уровня (рис. 1).

- Уровень 1 – сведения о самих явлениях и нанесенном ими ущербе.
- Уровень 2 – характеристики мезомасштабных конвективных систем (конвективных штормов), вызвавших эти явления, полученные по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений.
- Уровень 3 – синоптическое положение и значения диагностических переменных, характеризующие условия возникновения КОЯП, оцененные по данным систем реанализа

Для территории России опыт проектирования и создания подобных баз данных отсутствует. Из зарубежных работ ближайшим аналогом можно считать базу данных случаев наводнений, оползней и селей для территории Италии, которая также основана на трехуровневой иерархической структуре [Napolitano et al., 2018]. Отличительной особенностью разработанной базы данных является также ее интеграция с ранее опубликованными базами данных случаев смерчей в Северной Евразии [Authors, 2020; Authors, 2021] и ветровалов в Европейской части России [Authors].

Характеристика случаев КОЯП представлена в таблице Point_reports, которая содержит отчеты о КОЯП, зафиксированных по данным метеостанций или в населенных пунктах. Сведения об этих случаях получены на основе анализа нескольких основных источников: данных наблюдательной сети, сведений о случаях КОЯП и нанесенном ущербе, опубликованных в СМИ и социальных сетях, информации из внешних баз данных, в частности ESWD и базы данных ЕСИМО, ежемесячных обзоров в журнале «Метео-

рология и гидрология». Пространственная привязка отчетов осуществляется по положению пункта наблюдательной сети через WMO ID, или по идентификатору населенного пункта в OpenStreetMap.

Для каждого случая КОЯП определены следующие атрибутивные характеристики: качество данных, дата, время, точность определения времени, способ регистрации явления (по данным наблюдательной сети, по данным очевидцев или по нанесенному ущербу), местоположение (субъект РФ, район, населенный пункт), тип явления, интенсивность, число погибших, пострадавших и величина нанесенного ущерба (при наличии). Также приведено краткое текстовое описание самого явления и нанесенного ущерба.

Характеристика конвективных штормов, вызывающих КОЯП, получена по двум источникам данных. За период 2001-2009 гг. использованы снимки Terra/Aqua MODIS, полученные из архива NASA¹. Их недостатком является низкое временное разрешение (два раза в сутки для каждого спутника). В связи с этим, лишь 53% случаев КОЯП за этот период имеют привязку к характеристикам конвективных штормов. Спутниковые данные MODIS обрабатывались в программных пакетах Scanex Image Processor и ArcGIS 10*.

Спутниковые данные Meteosat второго поколения с 12-ти канального радиометра SEVIRI получены за период с 2010 г. по н.в. из каталога EUMETSAT². Пространственное разрешение снимков составляет около 1,2 км в канале высокого разрешения HRV и 3,4 км в остальных 12 спектральных каналах [Kerkmann et al., 2006], а шаг получения данных по времени равен 15 мин. Это позволяет получить информацию о характеристиках конвективных штормов для всех случаев КОЯП, за исключением тех, для которых не определено время возникновения. Обработка снимков выполнена с помощью программных продуктов MSGDataRetriever, MSGProc и ArcGIS.

Стоит отметить, что за период до 2016 г. доступны снимки со спутников Meteosat, ведущих съемку из точки над пересечением экватора и Гринвичского меридиана. Это приводит к снижению качества данных для рассматриваемого региона, за исключением его северо-восточной части, за счет эффекта параллакса. С 2017 г. доступны данные спутника Meteosat-8 миссии IODC, которые не имеют этого недостатка [Klaes et al., 2017].

Для описания конвективных штормов в базе данных созданы две таблицы. В первой таблице (MCS_images) даны характеристики шторма по конкретному снимку, полученному в момент времени, максимально близкий к возникновению КОЯП, а именно минимальная температура верхней границы облаков (ВГО), диаметр по большой и малой полуоси, наличие сигнатур, указывающих на сильные восходящие потоки, а также ссылки на соответствующие фрагменты снимков. Изображения подготовлены в синтезе HRVCloud на основе видимого канала высокого разрешения (HRV) и теплового канала infrared 10,8 мкм, а также температуры ВГО на основе канала infrared 10,8 мкм, в цветовой палитре, рекомендованной EUMETSAT [Kerkmann et al., 2006]. Пример изображения конвективного шторма, загруженного в базу данных для конкретного случая КОЯП, приведен на рис. 2.

Во второй таблице (MCS_reports) приведены характеристики жизненного цикла конвективных штормов, в частности тип шторма, продолжительность существования, направление перемещения. Также для наиболее значимых случаев КОЯП подготовлены картографические анимации развития конвективных штормов на основе снимков Meteosat в синтезе HRVCloud и температуры ВГО, ссылки на которые также даны в этой таблице.

¹ NASA LAADS DAAC. Электронный ресурс: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> (дата обращения 03.04.2021).

² EUMETSAT Earth Observation Portal. Электронный ресурс: <https://eoportal.eumetsat.int/> (дата обращения 03.04.2021).

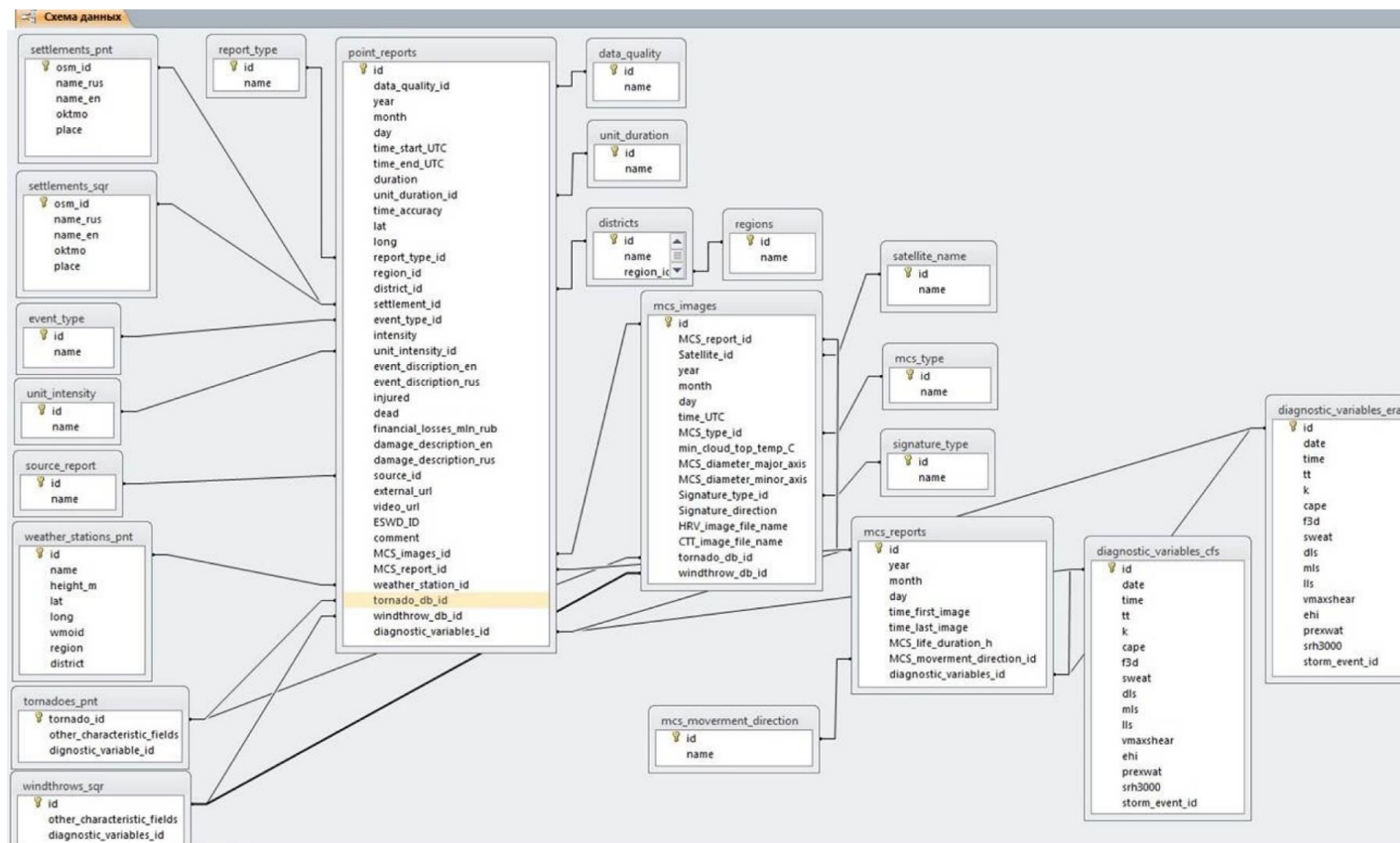


Рис. 1. Схема структуры базы данных КОЯП для территории ЦФО

Fig. 1. Scheme of the structure of the database of HCWE for the territory of the Central Federal District

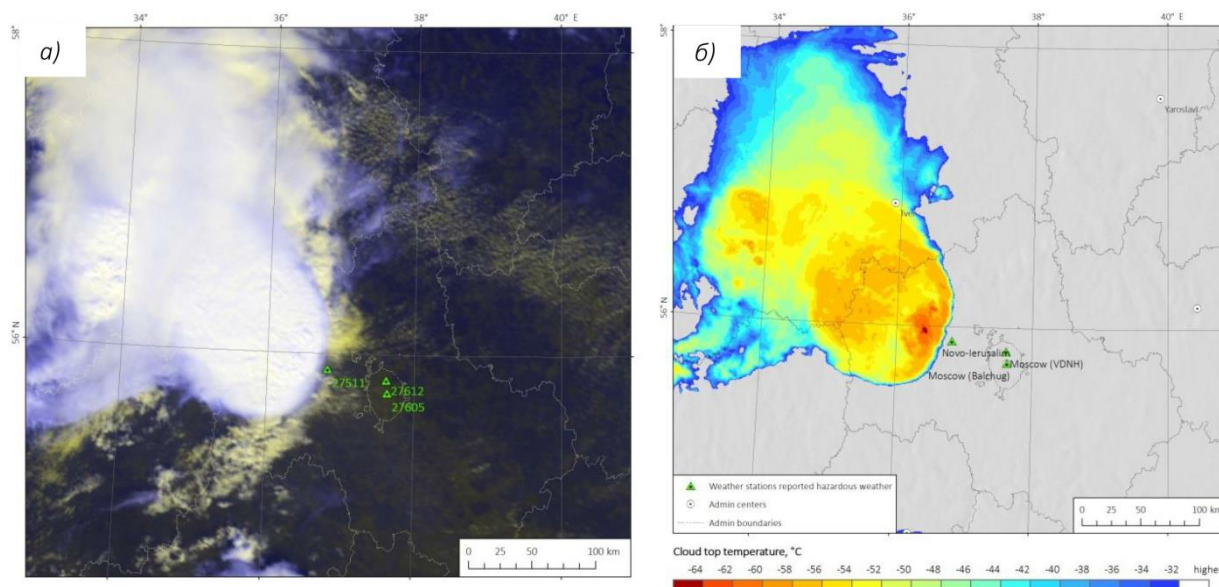


Рис. 2. Пример представления спутниковой информации (Terra MODIS) о конвективном шторме, вызвавшем КОЯП в Москве и Московской области 24.07.2001 г. Снимок Terra MODIS за 09.35 ВСУ в комбинации каналов HRV-HRV-IR (а) и температура верхней границы облаков (б)

Fig. 2. An example of satellite images (Terra MODIS) on convective storm that caused HCWE in the Moscow city and Moscow region on July 24, 2001. Terra MODIS image for 09.35 UTC in the HRV-HRV-IR band combination (a) and the cloud top temperature (b)

Для случаев смерчей, а также шквалов, вызвавших ветровалы, доступна более подробная характеристика на основе ранее опубликованных баз данных смерчей в Северной Евразии [Chernokulsky et al., 2020] и ветровалов в лесной зоне Европейской России [Shikhov et al., 2020]. Эти данные представлены в виде классов пространственных объектов – полигональных (для ветровалов) и точечных (для смерчей). Для каждого случая смерчей и ветровалов определены идентификаторы, на основе которых реализована их связь с отчетами о КОЯП, а также с характеристиками конвективных штормов по спутниковым данным.

При анализе условий возникновения КОЯП общепринятым является использование ингредиентного подхода [Taszarek et al., 2017]. Его применение основано на расчете по данным аэрологического зондирования или реанализа ряда диагностических переменных – параметров состояния атмосферы, характеризующих конвективную неустойчивость, влагосодержание, сдвиги ветра, завихренность в период формирования КОЯП [Taszarek et al., 2017; Chernokulsky et al., 2019].

В рамках данной работы расчет диагностических переменных производится по данным системы реанализа ECMWF ERA-5 с пространственным разрешением 30 км [Hersbach et al., 2020]. Эти данные в сравнении с другими системами реанализа отличаются наиболее высоким пространственным разрешением (30 км). В качестве косвенных предикторов КОЯП были рассчитаны 50 физико-статистических параметров атмосферы по трём основным категориям¹: температурно-влажностные характеристики, параметры ветра и комплексные индексы, объединяющие две предыдущие категории. В базе данных КОЯП на территории ЦФО для наиболее значимых случаев КОЯП приведены значения 12

¹ Grieser J. Convection parameters. Электронный ресурс: <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 03.04.2021).

диагностических переменных. Перечень выбранных переменных из массива аналогичен использованному в работе [Калинин и др., 2021] для анализа условий возникновения сильных шквалов и смерчей. Для ряда случаев КОЯП, в частности сильных шквалов и смерчей, вызвавших крупные ветровалы, получены также значения диагностических переменных по данным CFS/CFSv2 [Saha et al., 2010].

Помимо основных таблиц, характеризующих явления и условия их возникновения, в базе данных имеются также справочные таблицы, необходимые для устранения избыточности и снижения вероятности ошибок при вводе данных. В справочных таблицах указаны допустимые значения таких параметров как качество данных, тип явления, единицы измерения интенсивности и продолжительности, типы источников данных о КОЯП и др. (рис. 1).

К справочным данным можно отнести также топографическую основу, которая получена на основе данных OpenStreetMap и включает слои субъектов РФ (21 субъект), муниципального деления (504 района), населенных пунктов (65507 объектов) и метеостанций (195 станций на территории ЦФО).

Разработка серверной версии базы данных и картографического веб-сервиса

Для управления базой данных и ее редактирования используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS, которое обеспечивает возможность хранения пространственных данных в реляционной базе данных. Также, для удобства редактирования и наполнения базы данных было разработано веб-приложение с использованием языка программирования PHP, языка разметки HTML5 и таблиц стилей CSS3. Стилистика интерфейса настроена при помощи CSS-фреймворка Bootstrap v4. Обеспечение открытого доступа к базе данных в сети Интернет реализовано путем создания картографического веб-приложения.

При разработке интерфейса пользователя и функциональных возможностей картографического веб-сервиса используется стек технологий HTML5, CSS3, JavaScript. Для публикации пространственных данных о местоположении случаев КОЯП используется открытый картографический сервер GeoServer, а для их отображения в веб-приложении – JavaScript-библиотека Leaflet. Основой разработки пользовательского интерфейса является JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом React, преимущества которой состоят в простоте создания и организации более быстрой работы приложения.

Разрабатываемый картографический веб-сервис доступен в сети Интернет по временному адресу <http://convective-storms.psu.ru/>. Его интерфейс представлен на английском языке, в дальнейшем будет создана и русскоязычная версия веб-приложения.

Основными функциональными возможностями сервиса являются просмотр на карте мест фиксации (в виде точечных объектов) случаев КОЯП; фильтрация случаев по типу явления, диапазону дат, субъекту РФ, источнику данных, и получение детальной информации о каждом случае КОЯП и условиях его возникновения (рис. 3). Эта информация включает описание типа явления, источника информации, местоположения, даты и времени, продолжительности, интенсивности, причинённого ущерба (в т.ч. при наличии связи с внешними базами данных) и др. Для большинства случаев опасных явлений доступны ссылки на сообщения в электронных СМИ, фото- и видеоматериалы, на которых представлены дополнительные сведения.

Также на сервисе реализована визуализация распределения случаев КОЯП в виде различных диаграмм, которые строятся по значениям основных атрибутивных характеристик из базы данных. В частности, доступно отображение межгодового, внутригодового распределения, распределение по времени суток, по субъектам РФ, по типам фиксации явления, по характеристикам ущерба и пр. (рис. 4).

При наличии соответствующих данных, для некоторых случаев КОЯП на сервисе доступны характеристики вызвавших их конвективных штормов, фрагменты спутниковых снимков Meteosat-8 или Terra/Aqua MODIS (рис. 5) и анимации на основе данных Meteosat-8. Также для ряда случаев пользователь может отобразить значения диагностических переменных, полученные по данным систем реанализа ERA-5 и CFS.

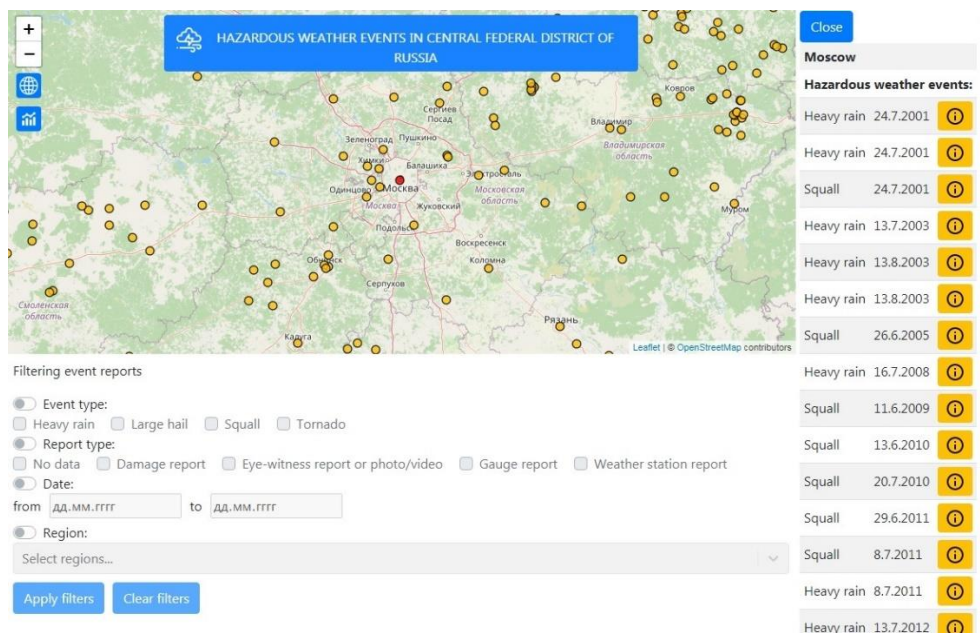


Рис. 3. Список случаев КОЯП для одного населенного пункта (на примере г. Москвы)
 Fig. 3. List of HCWE for one settlement (on the example of the Moscow city)



Рис. 4. Распределение числа случаев КОЯП по годам
 (по данным, опубликованным на сервисе)
 Fig. 4. Inter-annual distribution of HCWE (based on the published data only)

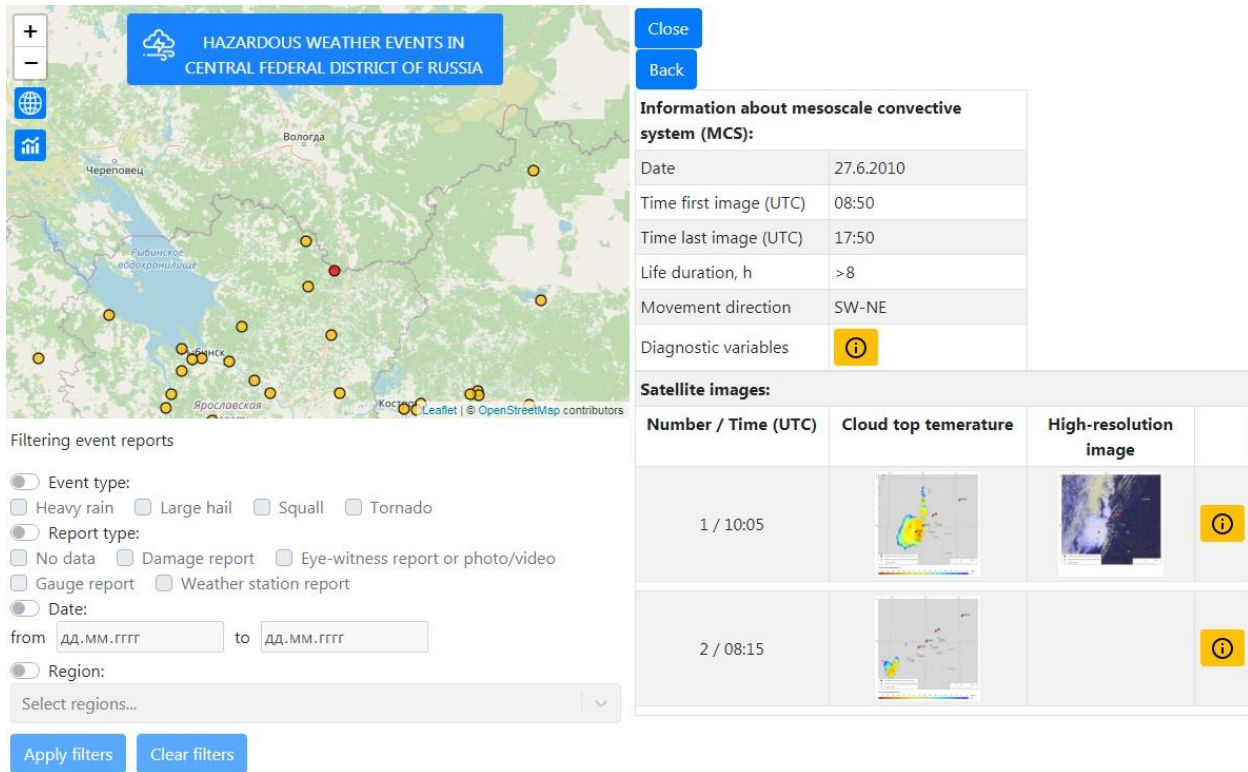


Рис. 5. Характеристики конвективного шторма, представленные на картографическом веб-сервисе

Fig. 5. Characteristics of convective storm, presented on the online web map service

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика случаев КОЯП на территории ЦФО

В настоящее время в базу данных занесено свыше 630 записей о случаях КОЯП за период 2001–2013 гг., произошедших в 395 населенных пунктах на территории ЦФО. При этом общий объем собранной информации за 2001–2019 гг. значительно больше и составляет свыше 2 тыс. отчетов о КОЯП. Информация за 2013–2020 гг. в настоящее время проходит обработку и верификацию.

Только по сообщениям очевидцев и СМИ о самих явлениях или вызванных ими разрушениях получено 2220 отчетов о КОЯП, часть которых, однако, не имеет точной пространственной привязки. После проведенной фильтрации, общее количество отчетов о КОЯП, собранных по данным очевидцев и СМИ за 2001–2019 гг., составило 1862, включая также данные о смерчах из базы [Чернокульский и др., 2021]. Свыше 71% из всех отчетов приходится на долю шквалов (рис. 6), поскольку именно эти явления чаще всего наносят экономический ущерб [Бедрицкий и др., 2001]. Значительный рост количества сообщений о КОЯП в последние годы имеет искусственный характер, т.е. связан с появлением новых источников информации. Аналогичная закономерность наблюдается для всей территории России [Чернокульский и др., 2001], и для Европы в целом [Groenemeijer and Kuhne, 2014].

Значимым источником данных о случаях КОЯП и их последствиях также является анализ сообщений (новостей и тегов) в социальных сетях. Такой поиск производился за 2020 г. в социальных сетях «ВКонтакте», «Одноклассники», «Instagram», а также на видеохостинге «Youtube». Для всех случаев была определена пространственная привязка

по населенному пункту или геолокации наблюдателя. Также выполнена верификация по оперативно предоставляемым спутниковым данным Meteosat¹ и композитной карте метеоявлений по сети доплеровских радиолокаторов².

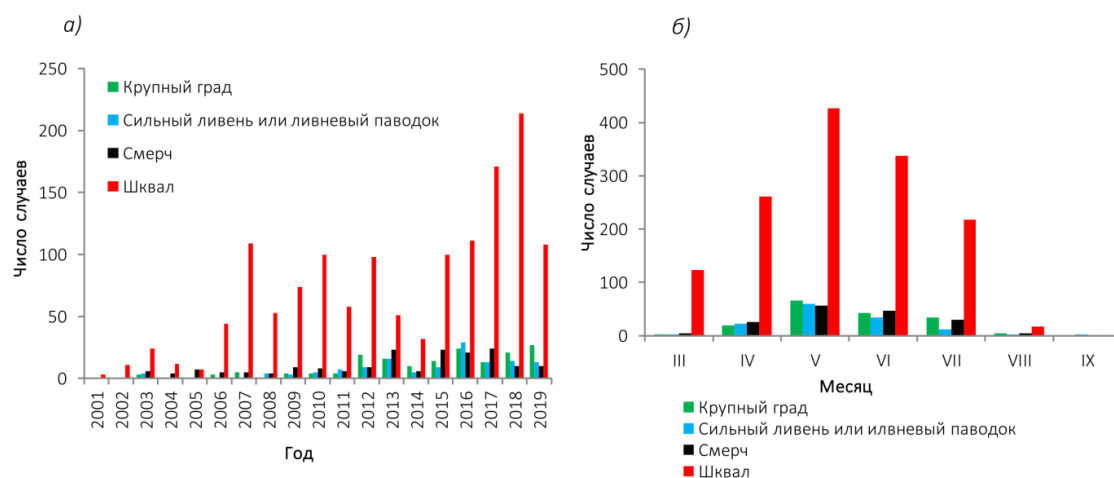


Рис. 6. Межгодовое (а) и внутригодовое (б) распределение отчетов о КОЯП, выявленных по сообщениям в электронных СМИ

Fig. 6. Inter-annual (a) and monthly (b) distribution of HCWE reports, according to web news and media reports

В результате был собран значительный объем данных о случаях КОЯП (2546 записей по территории России за теплый период 2020 г.). Из них 785 случаев зафиксировано на территории ЦФО, в том числе 16 случаев смерчей, 537 случаев шквалов, 133 случая крупного града и 96 случаев локальных сильных ливней и ливневых паводков. Пространственное распределение полученных сообщений о случаях КОЯП имеет сильную корреляцию с плотностью населения, свыше 47% из них приходится на долю Московской области. На основе собранных данных выявлены 4 крупных вспышки КОЯП на территории ЦФО в теплый период 2020 г. (7 июля, 8 июля, 14 июля и 17 сентября), на долю которых приходится 43,3% всех сообщений о КОЯП и вызванном ими ущербе. Несколько менее значимых вспышек отмечены в конце мая и в июне.

Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами на территории ЦФО

Согласно данным из базы [Shikhov et al., 2020], актуализированным до 2020 г., всего на территории ЦФО за рассматриваемый период 2001–2020 гг. зафиксировано 145 событий ветровалов с общей площадью сплошных (stand-replacing) повреждений лесного покрова 40469 га (рис. 7). Из них 82 (7073 га) связаны со смерчами, а еще 63 (33396 га) – со шквалами. Распределение ветровалов по площади крайне неравномерное – на один крупнейший ветровал, вызванный прохождением долгоживущего сильного шквала 27.06.2010 г., приходится 37% от всей площади ветровалов в ЦФО, хотя большая часть этого ветровала находится на территории Вологодской области, которая относится к Северному федеральному округу. Также крупные ветровалы (на общей площади > 1000 га) отмечались 12.06.2010 г. и 30.07.2017 г. в Костромской области, 29.05.2007 г. в Брянской области, 02.08.2017 г. в Тверской области.

¹ Спутниковые снимки Meteosat. Электронный ресурс: <https://kachelmannwetter.com/de/sat> (дата обращения 03.04.2021).

² Метеорад. Электронный ресурс: <http://meteorad.ru/static/phenomena24.gif> (дата обращения 03.04.2021).

Смерчи на территории ЦФО

Согласно данным [Чернокульский и др., 2021], за период 2001-2018 гг. на территории ЦФО зафиксировано 300 случаев смерчей, выявленных со средней или высокой степенью достоверности. Еще 8 случаев подтверждено в 2019 г. и 16 случаев – в 2020 г. Из них 56 случаев являются значительными (интенсивность $\geq F2$) и 5 – сильными (F3) по шкале Фудзита. Сильные смерчи отмечены 01.09.2003 г. в Курской области, 03.06.2009 г. в Московской и Ярославской областях, 12.06.2010 г. в Костромской области, 13.07.2016 г. и 04.08.2017 г. в Московской области.

В межгодовом распределении числа случаев смерчей резко выделяется 2017 г. за счет большого числа событий, выявленных по спутниковым данным. Этот выброс обусловлен вспышкой смерчей 2 августа 2017 г. в Тверской области и Северо-Западном ФО, которая является самой крупной в истории наблюдений в России по количеству зафиксированных смерчей за сутки [Чернокульский и др., 2021]. Подтвердить такое большое число случаев смерчей связанных с данной вспышкой удалось по спутниковым данным о ветровалах, поскольку смерчи проходили над лесопокрытой территорией.

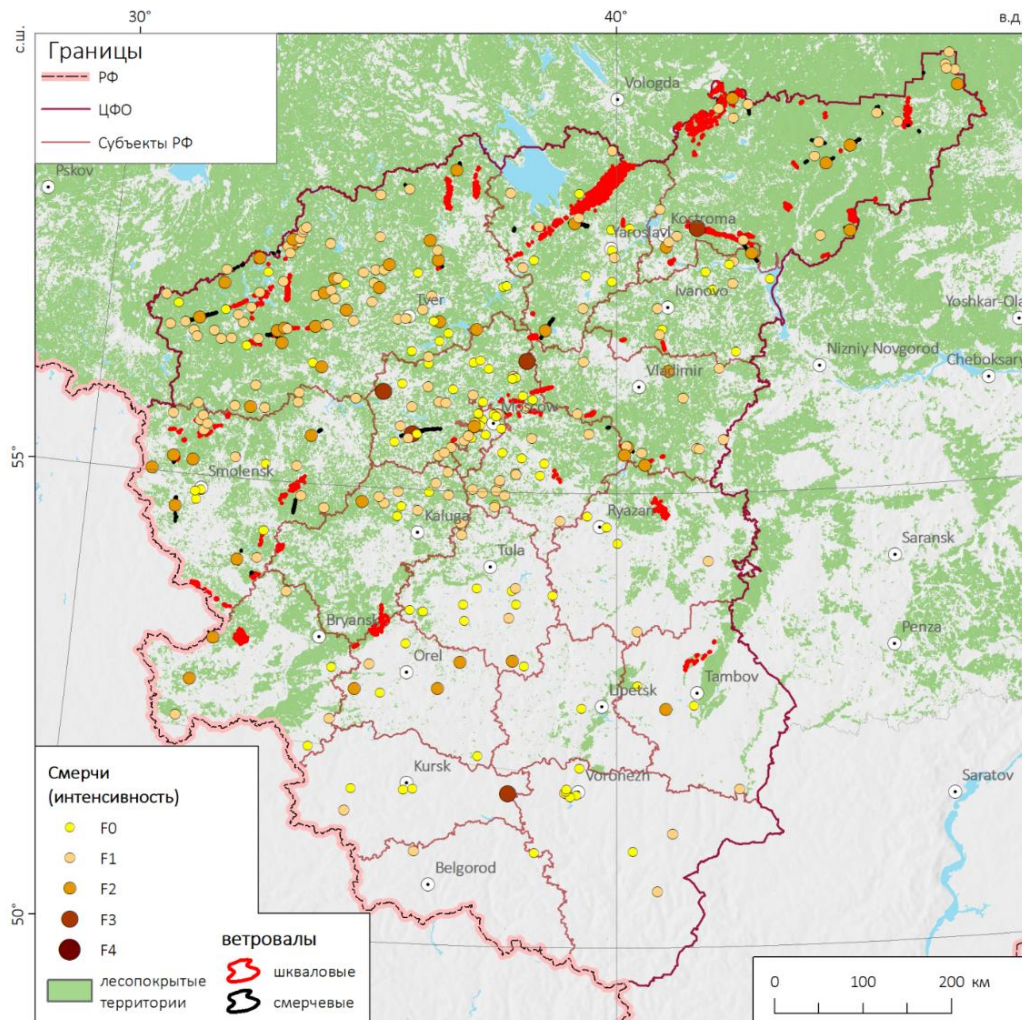


Рис. 7. Пространственное распределение случаев смерчей [Чернокульский и др., 2021] и ветровалов [Shikhov et al., 2020] на территории ЦФО. Данные о смерчах за 2001–2018 гг., о ветровалах – за 2001–2020 гг.

Fig. 7. Spatial distribution of tornadoes in 2001–2018 [Chernokulsky et al., 2021] and windthrow events in 2001–2020 [Shikhov et al., 2020] on the territory of CFD

ВЫВОДЫ

Разработанная картографическая база данных и онлайн-картографический сервис являются первым подобным проектом для территории России. На основе интеграции различных источников данных впервые могут быть получены реалистичные оценки повторяемости различных видов КОЯП для наиболее населенной части территории страны, которая к тому же характеризуется значительными рисками, связанными с прохождением этих явлений [Rivin *et al.*, 2019]. Полученные данные также представляют интерес для анализа синоптических и мезомасштабных условий возникновения КОЯП и для верификации моделей их краткосрочного прогноза.

В сравнении с ранее опубликованными базами данных о КОЯП, в том числе с Европейской базой данных ESWD, разработанная база данных для территории ЦФО отличается предоставлением более детальной информации об условиях образования явлений, а также о характеристиках конвективных облачных систем, которые сгенерировали данные явления. С одной стороны, это существенно увеличивает время на обработку информации при заполнении базы данных, с другой стороны – позволяет провести взаимную верификацию наземных, радиолокационных и спутниковых наблюдений за случаями КОЯП. В целом создание базы данных в перспективе позволит приблизить изученность климатологии КОЯП на территории ЦФО к уровню США и Западной Европы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 18-77-10076), сбор исходных данных – при поддержке РФФИ (грант № 20-35-70044) и гранта Президента РФ № МК 313.2020.5.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation (Project No. 18-77-10076), data collection was funded by Russian Foundation of Basic Research (Project No. 20-35-70044) and RF President Grant no. МК 313.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Коршунова Н.Н., Ламанов В.И., Шаймарданов М.З.* Опасные гидрометеорологические явления, вызываемые ветром, и их влияние на экономику России. Метеорология и гидрология, 2001. № 9. С. 5–17.
2. *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 части России и Урала. Метеорология и гидрология, 2021. №2. С. 35–49.
3. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Antonescu B., Kühne T.* Смерчи в российских регионах. Метеорология и гидрология, 2021. №2. С. 17–34.
4. *Chernokulsky A, Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era. Monthly Weather Review, 2020. V. 148. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
5. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I.* On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes. IOP Conference Series:

- Earth and Environmental Science, 2019. V. 231. art. No 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012012.
6. *Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J.* Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013. V. 110 (41). P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.
 7. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 575–586. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.10.020.
 8. *Edwards R., LaDue J.G., Ferree J.T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W.L.* Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94(5). P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.
 9. *Groenemeijer P., Kuhne T.* A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1
 10. *Groenemeijer P., Púčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., Kühne T., Feuerstein B., Brooks H.E., Doswell C.A. III, Koppert H.-J., Sausen R.* Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European Severe Storms Laboratory. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017. V. 98(12). P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
 11. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
 12. *Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H.P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise, V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P.* MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. 2006. Электронный ресурс: http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html. (дата обращения 03.04.2021).
 13. *Klaes K. D.* A status update on EUMETSAT programmes and plans. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2017. V. 10402. Art. No 1040202. DOI: 10.1117/12.2273849.
 14. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience*, 2015. V. 8(8). P. 615–619. DOI: 10.1038/ngeo2483.
 15. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. *Journal of Environmental Management*. 2018. V. 207, P. 203–218. DOI:10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
 16. *Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M.* Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*. 2015. V. 143 P.4805–4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0104.1.
 17. *Radler T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Púčik T.* Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2019. V. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.
 18. *Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Y., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I.* The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019. V. 44(11). P. 729–738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.

19. *Saha S., et al.*, 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
20. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. *Remote Sensing of Environment*, 2018. V. 204. P. 553–567.
21. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020. V. 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
22. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B.* Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 2017. V. 145. P. 1511. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.

REFERENCES

1. *Bedritskii A.I., Korshunov A.A., Korshunova N.N., Lamanov V.I., Shaimardanov M.Z.* Hazardous hydrometeorological phenomena and their impact on Russia's economy: Destructive-force winds. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2001. V. 9. P. 1–9 (in Russian).
2. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Kostarev S.V., Bykov A.V.* Formation Environments of Severe Squalls and Tornadoes Causing Large-scale Windthrows in the Forest Zone of European Russia and the Ural. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. V. 46(2). P. 83–93. DOI: 10.3103/S1068373921020035 (in Russian).
3. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Shikhov A.N., Azhigov I.O., Selezneva E.V., Zakharchenko D.I., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in the Russian Regions. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. V. 46(2). P. 69–82. DOI: 10.3103/S1068373921020023 (in Russian).
4. *Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era. *Monthly Weather Review*, 2020. V. 148. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
5. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I.* On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. V. 231. art. No 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012012.
6. *Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J.* Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013. V. 110 (41). P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.
7. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 575–586. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.10.020.
8. *Edwards R., LaDue J.G., Ferree J.T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W.L.* Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94(5). P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.
9. *Groenemeijer P., Kühne T.* A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1.
10. *Groenemeijer P., Půčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., Kühne T., Feuerstein B., Brooks H.E., Doswell C.A. III., Koppert H-J., Sausen R.* Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European

- Severe Storms Laboratory. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017. V. 98(12). P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
11. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
 12. *Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H.P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise, V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P.* MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. 2006. URL: http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html. (дата обращения 03.04.2021).
 13. *Klaes K. D.* A status update on EUMETSAT programmes and plans. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2017. V. 10402. Art. No 1040202. DOI: 10.1117/12.2273849.
 14. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. Nature Geoscience, 2015. V. 8(8). P. 615–619. DOI: 10.1038/ngeo2483.
 15. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management, 2018. V. 207. P. 203–218. doi:10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
 16. *Půčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M.* Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. Monthly Weather Review. 2015. V. 143 P. 4805–4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0104.1.
 17. *Radler T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Půčik T.* Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2019. V. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.
 18. *Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Y., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I.* The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. Russian Meteorology and Hydrology, 2019. V. 44(11). P. 729–738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.
 19. *Saha S., et al.,* 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull. Am. Meteorol. Soc. 2010. V. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
 20. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. Remote Sensing of Environment, 2018. V. 204. P. 553–567. DOI:
 21. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017. Earth Syst. Sci. Data, 2020. V. 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
 22. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B.* Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. Monthly Weather Review, 2017. V. 145. P. 1511–1528. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.
-