

Новые методы и подходы в геоинформационном моделировании и анализе данных

New methods and approaches in geoinformation modeling and data analysis

УДК: 528.94+528.88

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-1-31-325-340

С. В. Пьянков¹, Р. К. Абдуллин², А. Н. Шихов³

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ)

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются закономерности пространственного распределения локальных конвективных опасных явлений погоды (шквалов и смерчей) на территории Пермского края, а также их связь с пространственным распределением молниевой активности и конвективных параметров атмосферы по данным реанализа ERA5. Данные о шквалах и смерчах собраны из нескольких источников, основным из которых были спутниковые снимки вызванных ими ветровалов в лесных массивах. Всего анализировалось 397 случаев за 1984–2024 гг. Рассчитана также доля площади ветровалов, вызванных этими явлениями, от общей площади лесов и от площади смешанных и хвойных лесов. Пространственное распределение молниевой активности оценивалось по данным сети грозопеленгации WWLLN. На основе полученных данных построена серия карт пространственного распределения шквалов и смерчей, ветровалов, молниевой активности и повторяемости критических значений конвективных параметров атмосферы по данным реанализа ERA5. В результате их сопоставления установлено, что корреляция между пространственным распределением явлений и ветровалов (с одной стороны) и молниевой активности и конвективных параметров (с другой стороны) отсутствует. Это может объясняться небольшой площадью анализируемой территории, а также тем, что ветровалы в основном отмечались в северной части Пермского края, где леса более уязвимы к ветровому воздействию. В то же время наиболее высокие значения конвективных параметров по данным реанализа отмечаются в южной и восточной части края. Тем не менее, максимум плотности случаев шквалов и смерчей на северо-западе края подтверждается локальным максимумом молниевой активности в этом районе, что позволяет считать его объективно существующим.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конвективные опасные явления погоды, картографирование, молниевая активность, реанализ ERA5, конвективные параметры атмосферы

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, д. 15, Пермь, Россия, 614990, e-mail: pyankovsv@gmail.com

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, д. 15, Пермь, Россия, 614990

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, д. 15, Пермь, Россия, 614990

Sergey V. Pyankov¹, Rinat K. Abdullin², Andrey N. Shikhov³

MAPPING OF CONVECTIVE HAZARDOUS WEATHER EVENTS BASED ON VARIOUS DATA SOURCES (ON THE EXAMPLE OF THE PERM REGION)

ABSTRACT

In the presented study, we considered the patterns of the spatial distribution of local convective severe weather events (linear windstorms and tornadoes) on the territory of Perm Region, as well as their relationship with the spatial distribution of lightning activity and convective atmospheric parameters according to the ERA5 reanalysis data. Data on squalls and tornadoes were compiled using several sources, the main one being satellite images of forest damage caused by these storms. We analyzed a total of 397 squall and tornado events from 1984–2024. We also calculated the proportion of the windthrow area caused by these events from the total forest area, and the same from the area of mixed and coniferous forests. The spatial distribution of lightning activity was assessed using the WWLLN lightning detection network data. On the basis of the obtained data, we developed a series of maps of the spatial distribution of squalls and tornadoes, windstorms, lightning activity and recurrence of over-critical values of convective atmospheric parameters according to the ERA5 reanalysis data. As a result of their comparison, it is found that there is no correlation between the spatial distribution of the events and windthrow (on the one hand) and lightning activity and convective parameters (on the other hand). This can be explained by the small area of the analyzed territory, as well as by the fact that windthrow areas are more widespread in the north part of Perm Region, where forests are more vulnerable to wind damage, while the highest values of convective parameters according to the ERA5 data are observed in the southern and eastern parts of the region. Nevertheless, the maximum density of squall and tornado events in the northwest of the region is confirmed by the local maximum of lightning activity in this area, which allows us to consider this maximum as a real one.

KEYWORDS: convective hazardous weather events, mapping, lightning activity, ERA5 reanalysis data, convective atmospheric parameters

ВВЕДЕНИЕ

Конвективные опасные явления погоды (КОЯП) — это сильные ливни, крупный град, шквалы и смерчи, которые генерируются облачными системами глубокой конвекции — мезомасштабными конвективными комплексами, линейными системами, мультячейками и суперъячейками [Doswell et al., 2001; Tippett et al., 2015]. КОЯП характеризуются локальной природой (за исключением долгоживущих шквалов, которые могут проходить сотни километров), внезапностью возникновения и сложностью прогнозирования, регулярно приводят к гибели людей и наносят значительный ущерб. Изучение климатических характеристик КОЯП (повторяемости, распределения во времени, интенсивности, площади охвата территории и др.) затрудняется их локальной природой, вследствие которой большинство КОЯП пропускается сетью метеостанций даже в районах, где ее плотность достаточно высока [Шихов и др., 2021; 2023].

Ряд исследований показывает, что на фоне потепления климата условия для развития глубокой конвекции и связанных с ней явлений становятся более благоприятными [Diffenbaugh et al., 2013; Radler et al., 2019; Lepore et al., 2021]. Для того, чтобы оценить

¹ Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614990, Russia, e-mail: pyankovsv@gmail.com

² Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614990, Russia

³ Perm State University, 15, Bukireva str., Perm, 614990, Russia

многолетние изменения повторяемости КОЯП и их связь с изменением климата в конкретном регионе, необходимо наличие репрезентативной (независимой от плотности населения и наблюдательной сети) информации о случаях КОЯП. Также документирование случаев КОЯП имеет большое значение для изучения условий их возникновения и верификации моделей прогноза [Groenemeijer, Kuhne, 2014; Groenemeijer et al., 2017], а выявление закономерностей пространственного распределения случаев — для оценки и картографирования связанных с ними рисков.

К новым источникам данных о случаях КОЯП относятся систематизированные наблюдения очевидцами и отчеты о нанесенном ущербе, имеющие географическую и временную привязку. В частности, для территории США такая систематизация ведется Национальным центром климатических данных [Edwards et al., 2013], а для территории Европы — Европейским центром по изучению сильных конвективных штормов (ESSL) в рамках работы над Европейской базой данных опасных явлений погоды ESWD [Groenemeijer et al., 2017]. Эти базы данных включают сотни тысяч записей о случаях КОЯП локального характера и связанного с ними ущерба, но качество данных сильно зависит от плотности населения и наблюдательной сети [Groenemeijer et al., 2017; Chernokulsky et al., 2020]. Для территории России данные ESWD отличаются неполнотой [Chernokulsky et al., 2020]. Существуют и российские национальные базы данных, а именно база данных ВНИИГМИ-МЦД о случаях опасных явлений, нанесших социально-экономические потери¹, а также ежемесячные обзоры в научном журнале «Метеорология и гидрология» за период с 2001 г. по н. в.² Но и в этих источниках данных многие явления пропускаются [Шухов и др., 2021; Chernokulsky et al., 2020].

Для лесной зоны важнейшим источником данных о шквалах и смерчах являются спутниковые снимки нарушений лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами, которые доступны за период с 1985 г. по н. в. [Шухов и др., 2023]. На примере территории Центрального федерального округа (ЦФО) [Шухов и др., 2021] и Пермского края [Shikhov et al., 2021] показано, что в регионах с лесистостью свыше 70 % доля случаев шквалов, вызвавших ветровалы, составляет 25–27 %, а доля случаев смерчей, выявленных на основе данных о ветровалах, достигает 80 % и более. Тем не менее, данные о ветровалах также имеют свои ограничения — они могут использоваться как основной источник информации о шквалах и смерчах только для лесной зоны, а пространственное распределение ветровалов в значительной степени зависит не только от распределения явлений, их вызывающих, но и от породного состава и возраста насаждений.

С учетом перечисленных ограничений, для оценки пространственного распределения КОЯП используют также различные прокси-показатели, которые характеризуют не сами явления, а условия их возникновения. К ним прежде всего относятся многолетние данные о молниевой активности по данным систем грозопеленгации, в частности WWLLN (WorldWide Lightning Location Network) [Kaplan, Lau, 2021], многолетние данные о повторяемости мезомасштабных конвективных систем на основе снимков с геостационарных спутников [Feng et al., 2021], а также значения конвективных параметров атмосферы, рассчитанные по данным реанализов, в частности ERA5 [Hersbach et al., 2020]. На основе данных ERA5 была выполнена глобальная оценка повторяемости благоприятных условий для развития мощных конвективных штормов [Taszarek et al., 2021]. Также было показано, что пространственное распределение конвективных параметров, особенно энергии неус-

¹ Шамин С. И., Бухонова Л. К., Санина А. Т. «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326

² Научно-технический журнал «Метеорология и гидрология». Электронный ресурс: <http://mig-journal.ru/archive> (дата обращения 10.05.2025)

тойчивости CAPE, индекса значительного торнадо STP и плотности молниевых разрядов по данным WLLN имеют значимую корреляцию с пространственным распределением ветровалов, причем в лесной зоне ЕТР корреляция сильнее, чем в Сибири [Shikhov et al., 2025].

Все перечисленные данные могут использоваться для картографирования КОЯП. Целью работы является построение серии карт пространственного распределения локальных КОЯП (шквалов и смерчей) и их прокси-характеристик, а также оценка их корреляции друг с другом на примере территории Пермского края. Выбор территории Пермского края обусловлен наличием для данной территории наиболее полной базы данных о случаях КОЯП, нанесших материальный ущерб, в т. ч. результатов обследований, проведенных специалистами Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС), а также данных о ветровалах за период с 1984 по 2024 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные

Информационной основой исследования послужили картографические базы данных случаев шквалов и смерчей в Пермском крае, зафиксированных метеостанциями или нанесших ущерб [Shikhov et al., 2021], а также ветровалов в лесной зоне России [Шихов и др., 2023]. Обе базы данных были актуализированы до 2024 г. Таким образом, данные доступны за период с 1984 по 2024 гг. В базе данных [Shikhov et al., 2021] содержится 104 случая шквалов и 14 случаев смерчей, за исключением тех случаев, которые были выявлены только по данным о ветровалах. В актуализированной базе данных ветровалов содержится 128 ветровалов, вызванных шквалами ($S \geq 25$ га) и 179 ветровалов, вызванных смерчами ($S \geq 5$ га). Базы данных частично перекрываются, т. е. случаи, которые вызвали ветровалы и наблюдались на метеостанциях или нанесли ущерб, включены в обе базы данных (рис. 1). После их объединения и исключения дублей общее число рассматриваемых случаев КОЯП составило 397, в т. ч. 189 случаев смерчей и 208 случаев шквалов.

В качестве прокси-характеристик случаев КОЯП рассматривались следующие показатели:

- многолетние данные о молниевой активности за период 2010–2024 гг. [Kaplan, Lau, 2024], вырезанные для территории Пермского края за теплый период года (апрель–октябрь), представленные в виде раstra плотности молниевых разрядов (число разрядов на 1 000 км² в час);
- данные о частоте прохождения мезомасштабных конвективных систем (МКС) над территорией края (южнее 60° с. ш.) за период 2014–2019 гг., представленные в виде раstra частоты их наблюдения над каждой точкой пространства [Feng et al., 2021];
- повторяемость закритических значений нескольких конвективных параметров атмосферы, рассчитанных по данным реанализа ERA5, которая характеризует возникновение в атмосфере условий, благоприятных для развития сильных конвективных штормов в летний период за 1991–2020 гг. [Shikhov et al., 2025].

Последние данные были получены из работы [Shikhov et al., 2025] и включают повторяемость закритических значений пяти конвективных параметров атмосферы: доступной потенциальной энергии неустойчивости, рассчитанной для перемешанного слоя от 0 до 1 000 м (ML CAPE) и композитных параметров ML WMAXSHEAR [Taszarek et al., 2020], композитного параметра суперъячеек SCP, параметра значительного торнадо STP и индекса опасной погоды SWEAT. Перечисленные индексы широко используются для изучения условий возникновения КОЯП [Taszarek et al., 2020; Chernokulsky et al., 2022], включая их картографирование на глобальном уровне [Taszarek et al., 2021].

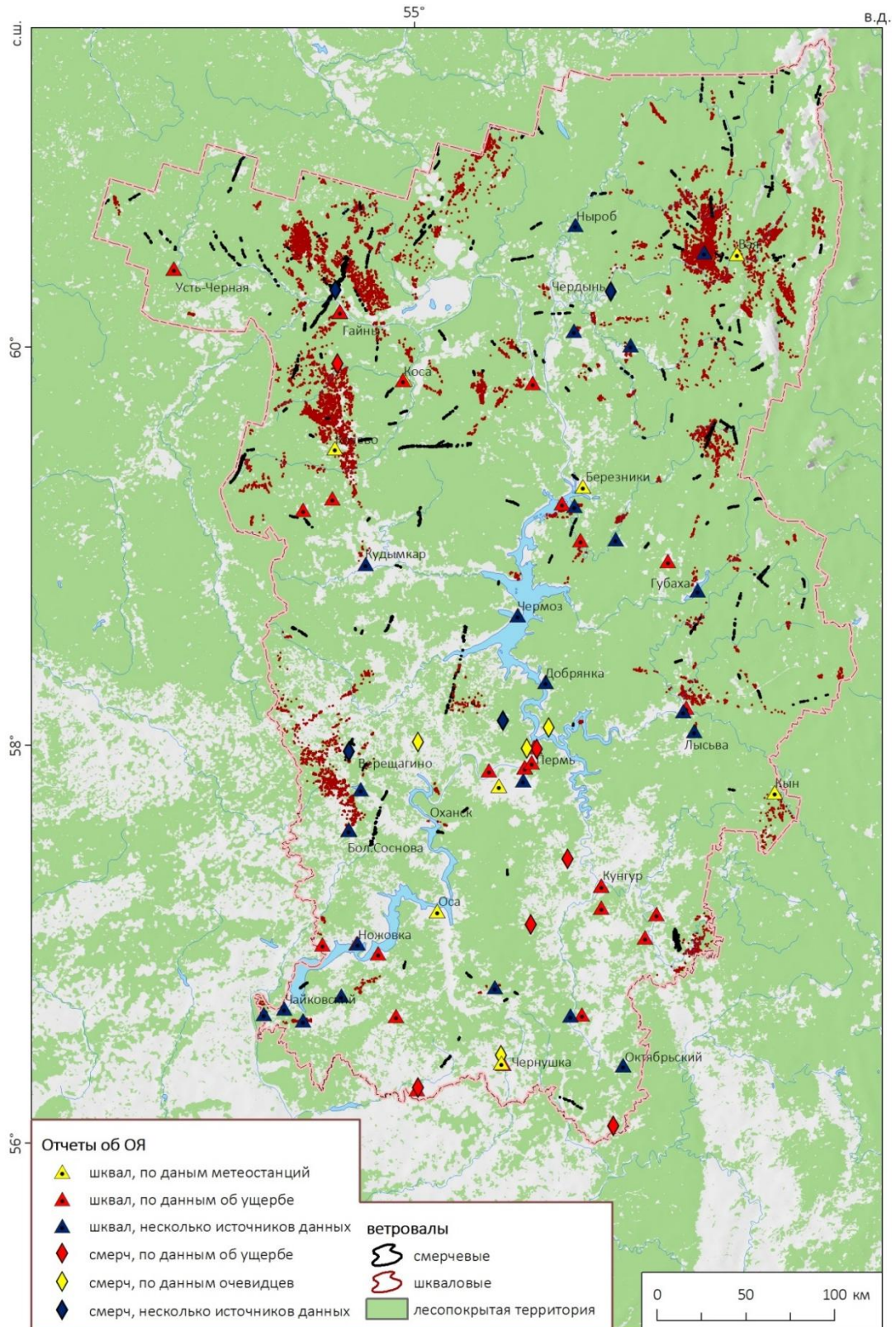


Рис. 1. Распределение рассматриваемых случаев шквалов и смерчей, зарегистрированных различными способами, по территории Пермского края
Fig. 1. Spatial distribution of the considered squall and tornado events, reported over the territory of Perm Krai using different methods

Методика картографирования КОЯП и их прокси-характеристик

Случаи КОЯП представлены в базе данных как точечные объекты (ветровалы, вызванные шквалами и смерчами, представлены как точки-центроиды). Соответственно, их пространственное распределение может оцениваться при помощи инструментов расчета плотности ядер (число случаев на единицу площади в единицу времени) или на основе регулярной сетки (расчет количества случаев, попадающих в каждую ячейку сетки, с последующей интерполяцией). При этом пространственное распределение случаев, зафиксированных метеостанциями или нанесших ущерб, в значительной степени определяется плотностью наблюдательной сети и плотностью населения [Chernokulsky et al., 2020]. На пространственное распределение ветровалов влияет доля лесопокрытой территории и характеристики самих лесов — распространенность спелых и перестойных смешанных или хвойных насаждений, которые более подвержены ветровалам, чем вторичные лиственные леса [Шихов и др., 2023]. В то же время взвешивание результата на долю площади лесов и на плотность населения также не позволяет получить объективную оценку и затрудняет определение единиц измерения полученной характеристики.

С учетом вышесказанного в настоящей работе созданы 4 карты характеристик КОЯП: плотность случаев, зафиксированных метеостанциями или нанесших ущерб (рис. 2а), плотность всех случаев, включая выявленные только по данным о ветровалах (рис. 2б), доля площади ветровалов от площади всех лесов (рис. 3а) и доля площади ветровалов от площади смешанных и хвойных лесов (рис. 3б). Характеристики лесов оценивались на основе карты растительности России [Барталев и др., 2016]. Расчет плотности для рис. 2а и 2б выполнен на основе метода плотности ядер в ArcGIS 10.8, а расчет характеристик ветровалов для рис. 3 — на основе прямоугольной сетки с размером ячейки 50×50 км, в каждой ячейке которой рассчитаны доли площади лесов и ветровалов. Интерполяция из ячеек сетки выполнена методом сплайна с натяжением, поскольку нежесткие методы (локальные полиномы и кригинг) дают слишком сильное сглаживание для данной задачи.

Прокси-характеристики КОЯП — средняя плотность молниевых разрядов на 1 000 км² на 2001–2024 гг. (рис. 4а), частота прохождения мезомасштабных конвективных систем (МКС) за 2014–2019 гг. (рис. 4б) и средняя за летние сезоны 1991–2020 гг. повторяемость закритических значений конвективных параметров атмосферы по данным реанализа ERA5 (рис. 5) — рассчитаны для ячеек регулярной сетки размером 50×50 км. Отметим, что данные о частоте прохождения МКС [Feng et al., 2021] доступны только для территории, расположенной южнее 60° с. ш.

Зависимости между пространственным распределением КОЯП, ветровалов и прокси-характеристик также рассчитаны на основе данной регулярной сетки (территория Пермского края разбита на 73 ячейки, количество которых и было объемом выборки). Рассчитаны коэффициенты линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена между числом случаев КОЯП, долей площади ветровалов и значениями прокси-характеристик в ячейках данной сети (табл. 1). Уровень значимости α принят равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плотность случаев шквалов и смерчей, нанесших ущерб (кроме ветровалов) или зафиксированных метеостанциями (рис. 2а), имеет выраженный максимум в районе Перми (обусловленный наибольшей плотностью населения и, следовательно, лучшей фиксацией событий) и вторичные максимумы на юге и юго-западе края. В северной части распределение случаев определяется в основном распределением метеостанций, с максимумами в районе Березников, Гайн, Чердыни и Усть-Черной. Очевидно, что такая картина не соответствует реальному распределению случаев. С учетом случаев, вызвавших ветровалы

(рис. 2б), максимумы смещаются на северо-запад и северо-восток края, но также остается и максимум в районе Перми. Основной максимум на севере Гайнского района обусловлен прохождением здесь вспышек смерчей 7 июня 2009 г. и 18 июля 2012 г., когда было зафиксировано наибольшее число смерчей и вызванных ими ветровалов. Такое распределение случаев выглядит более правдоподобно, чем на рис. 2а. Примечательно, что минимумы находятся к югу и востоку от Перми, где распространены вторичные лиственные леса, относительно мало подверженные ветровалам в сравнении с темнохвойными и сосновыми лесами, более распространенными на севере края [Барталев и др., 2016]. Таким образом, оценка пространственного распределения случаев с учетом данных о ветровалах существенно зависит от свойств лесных насаждений.

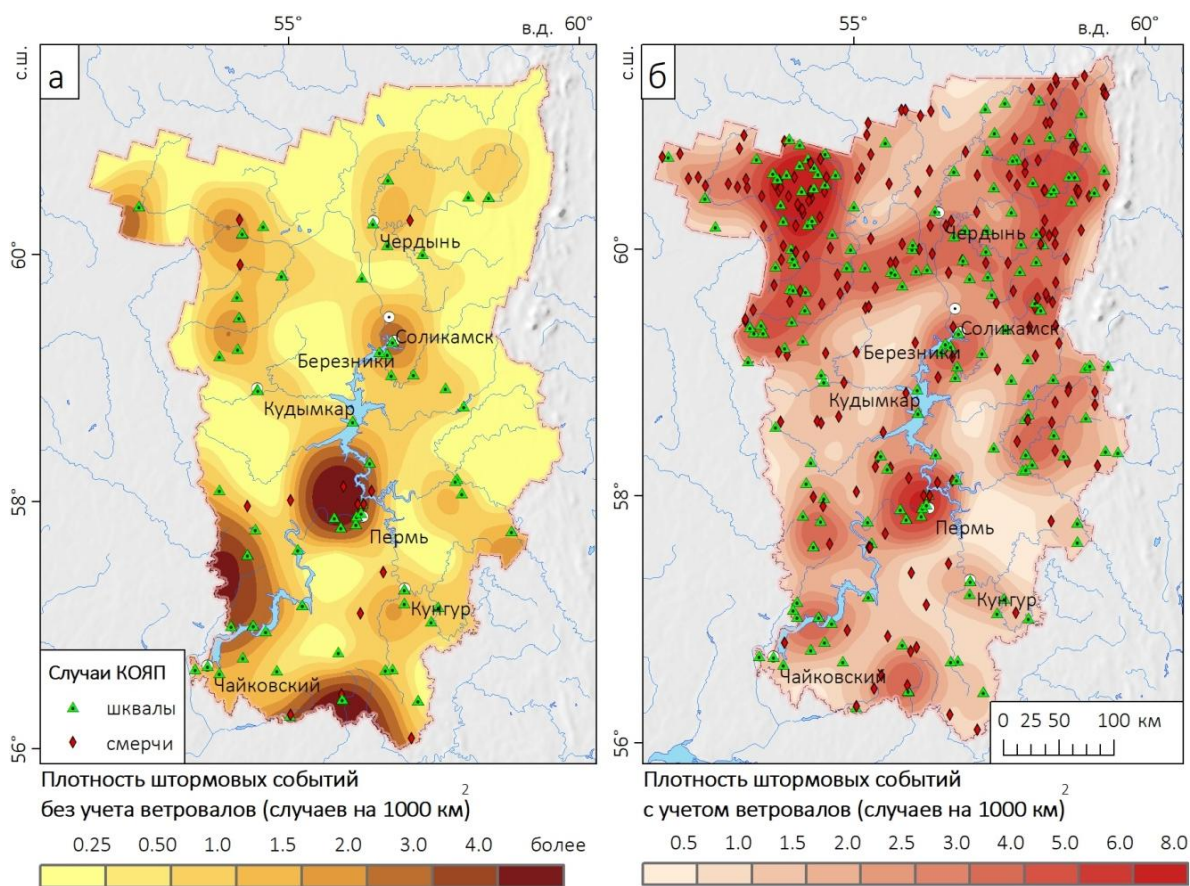


Рис. 2. Пространственное распределение случаев шквалов и смерчей:
а) зарегистрированных по данным метеостанций или нанесших ущерб; б) всех случаев шквалов и смерчей, включая те, которые были выявлены только по данным о ветровалах
Fig. 2. Spatial distribution of squalls and tornadoes: a) reported by weather stations or causing damage; b) the same for all events, including those identified based on windthrow data only

Оценки, основанные на потерях лесов от ветровалов, представлены на рис. 3. В целом распределение доли площади ветровалов от площади всех лесов и от площади хвойных и смешанных лесов выглядит достаточно похожим. Максимумы находятся на северо-западе и северо-востоке края, где отмечались крупнейшие ветровалы 18 июля 2012 г. (Shikhov et al., 2021), причем максимум на северо-западе хорошо соответствует максимуму плотности шквалов и смерчей на рис. 2б, что указывает на его объективность.

Выделяется также вторичный максимум на западе края, связанный с крупным ветровалом 18 июня 1990 г. На рис. 3б при этом выделяется также максимум на юго-западе края, обусловленный тем, что доля смешанных и хвойных лесов здесь меньше, чем на севере, но крупные ветровалы имели место, в частности в 2014 г.

Можно отметить высокую корреляцию доли площади ветровалов (рис. 3) с плотностью шквалов и смерчей (рис. 2б), что ожидаемо, т. к. более 70 % случаев шквалов и смерчей были выявлены на основе данных о ветровалах. В то же время отсутствует корреляция площади ветровалов с плотностью шквалов и смерчей, зафиксированных метеостанциями или нанесших ущерб (рис. 2а), что ожидаемо, учитывая кластеризованное расположение этих случаев в районах с более высокой плотностью населения.

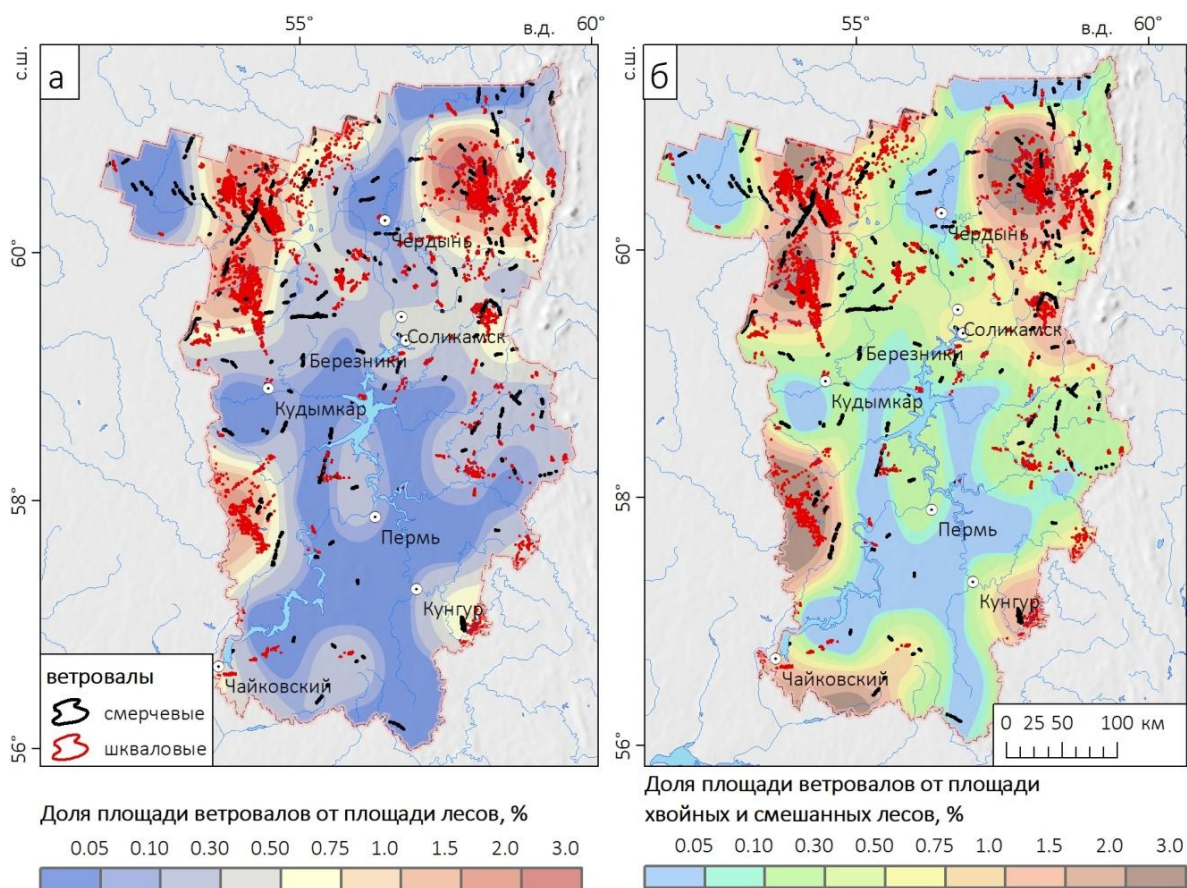


Рис. 3. Доля площади ветровалов, вызванных шквалами и смерчами: а) от площади всех лесов; б) от площади хвойных и смешанных лесов

Fig. 3. Proportion of squall- and tornado-induced windthrow area: a) of the total forests area; b) the same of the coniferous and mixed forests area

Максимумы молниевой активности над территорией края наблюдаются на севере, востоке и юге, а хорошо выраженный минимум — на северо-востоке, что, вероятно, обусловлено меньшей продолжительностью сезона с грозовой активностью на Северном Урале из-за более длительного сохранения снежного покрова весной. В целом в южной части края молниевая активность выше, чем на севере. В результате корреляция с пространственным распределением случаев шквалов и смерчей, а также и ветровалов отсутствует (табл. 1). При этом локальный максимум молниевой активности на северо-западе края совпадает с максимумом плотности шквалов и смерчей (рис. 2б).

Частота прохождения МКС по данным [Feng et al., 2021] достигает максимума на юго-западе и на юго-востоке края, несколько снижаясь в центральных районах, что хорошо соответствует распределению молниевой активности. Коэффициенты корреляции с распределением случаев КОЯП и ветровалов для этого показателя не рассчитывались, т. к. данные доступны только для территории, расположенной к югу от 60° с. ш., а для северной трети территории края данных нет.

Пространственное распределение повторяемости закритических значений конвективных параметров по данным реанализа ERA5 на территории края для разных параметров слабо согласуется между собой. Так, для ML WMS хорошо выраженный максимум обнаруживается на юге края, для SCP и STP — на востоке края (что может быть связано с существенным влиянием рельефа на значения этих индексов), а для ML CAPE — на юго-западе и в центральных районах. Как отмечено в работе [Shikhov et al., 2025], влияние рельефа на распределение повторяемости закритических значений ML CAPE по данным реанализа меньше, чем для композитных параметров, особенно SCP и STP. Аналогичные закономерности выявлены и на глобальном уровне [Taszarek et al., 2021].

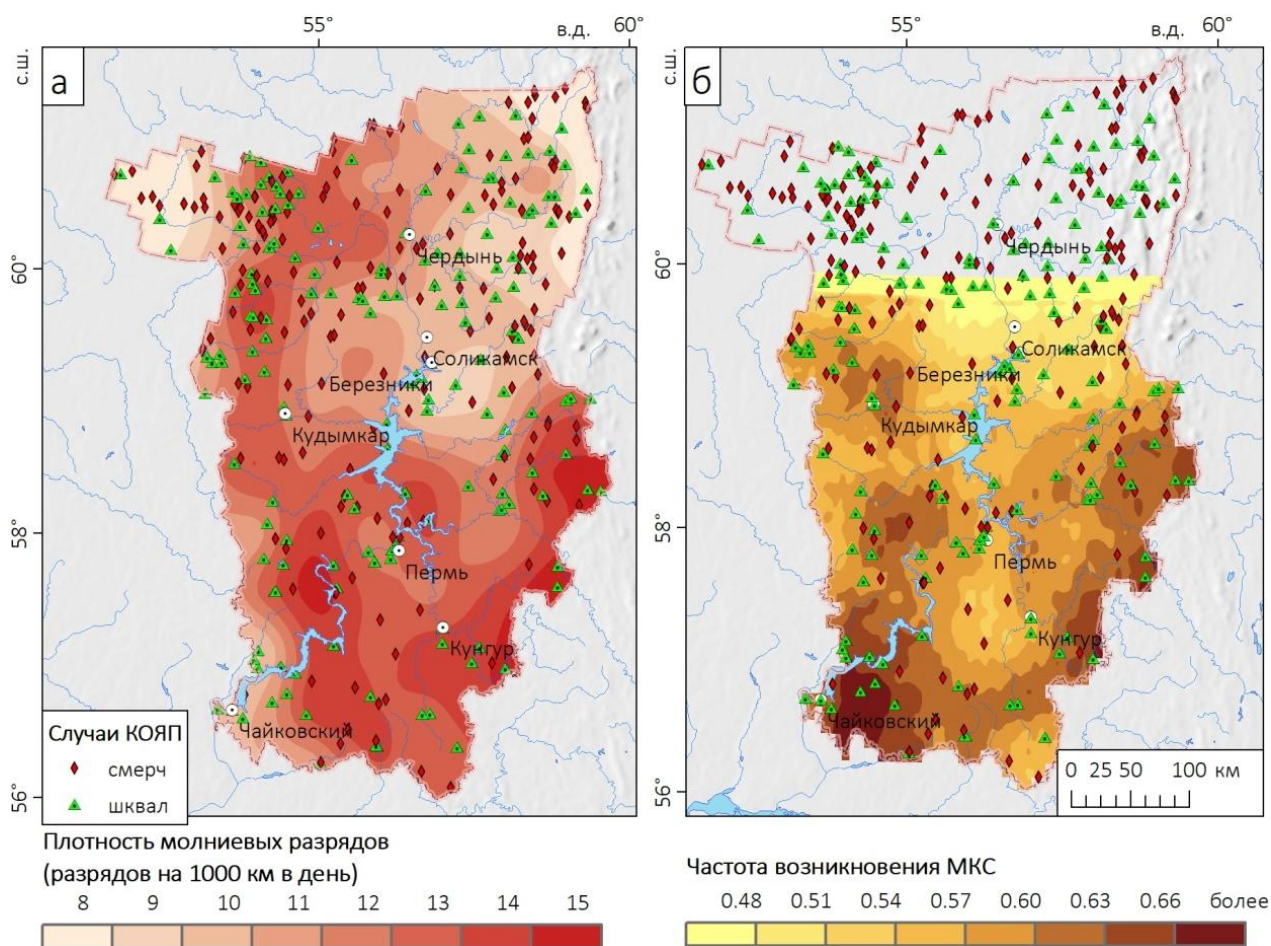


Рис. 4. а) Плотность молниевых разрядов в 2010–2024 гг. по данным сети грозопеленгации WWLLN; б) частота прохождения МКС по спутниковым данным за 2014–2019 гг., случаев в месяц
Fig. 4. а) Lightning activity in 2010–2024 according to the WWLLN lightning detection network data; б) frequency of MCCs observation according to satellite images in 2014–2019, cases per month

Табл. 1. Коэффициенты корреляции между пространственным распределением шквалов и смерчей, ветровалов, молниевой активности и конвективных параметров атмосферы по данным реанализа ERA5 (в числителе — ранговая корреляция Спирмена, в знаменателе — линейная корреляция Пирсона). Выделены статистически значимые коэффициенты при $\alpha = 0,05$

Table 1. Correlation coefficients between the characteristics of the spatial distribution of squalls and tornadoes, windthrow events, lightning activity and convective atmospheric parameters according to the ERA5 reanalysis data (Spearman rank correlation in the numerator and Pearson linear correlation in the denominator). Statistically significant correlations at $\alpha = 0.05$ are highlighted

Прокси-характеристики и факторы, влияющие на регистрацию шквалов и смерчей		Число случаев шквалов и смерчей, зафиксированных метеостанциями или нанесших ущерб	Число всех случаев шквалов и смерчей	Доля площади ветровалов от площади лесов	Доля площади ветровалов от площади смешанных и хвойных лесов
Доля площади леса		-0,51/-0,52	0,16/0,05	0,31/0,21	0,15/-0,02
Доля площади хвойных и смешанных лесов		-0,40/-0,32	0,38/0,33	0,45/0,27	0,19/-0,05
Плотность населения		0,44/0,27	-0,23/-0,03	-0,31/-0,13	-0,14/-0,10
Молниевая активность		0,19/0,14	-0,25/-0,20	-0,20/-0,08	-0,06/-0,03
Значения конвективных параметров по данным ERA5	ML CAPE	0,42/0,34	-0,31/-0,29	-0,33/-0,24	-0,13/-0,05
	ML WMS	0,43/0,41	-0,38/-0,27	-0,45/-0,28	-0,24/-0,05
	SCP	-0,09/-0,04	-0,23/ -0,32	-0,17/-0,25	-0,15/-0,19
	STP	0,01/-0,03	-0,30/-0,35	-0,18/-0,16	-0,15/-0,09
	SWEAT	-0,41/-0,35	0,13/-0,14	0,34/0,22	0,20/0,08

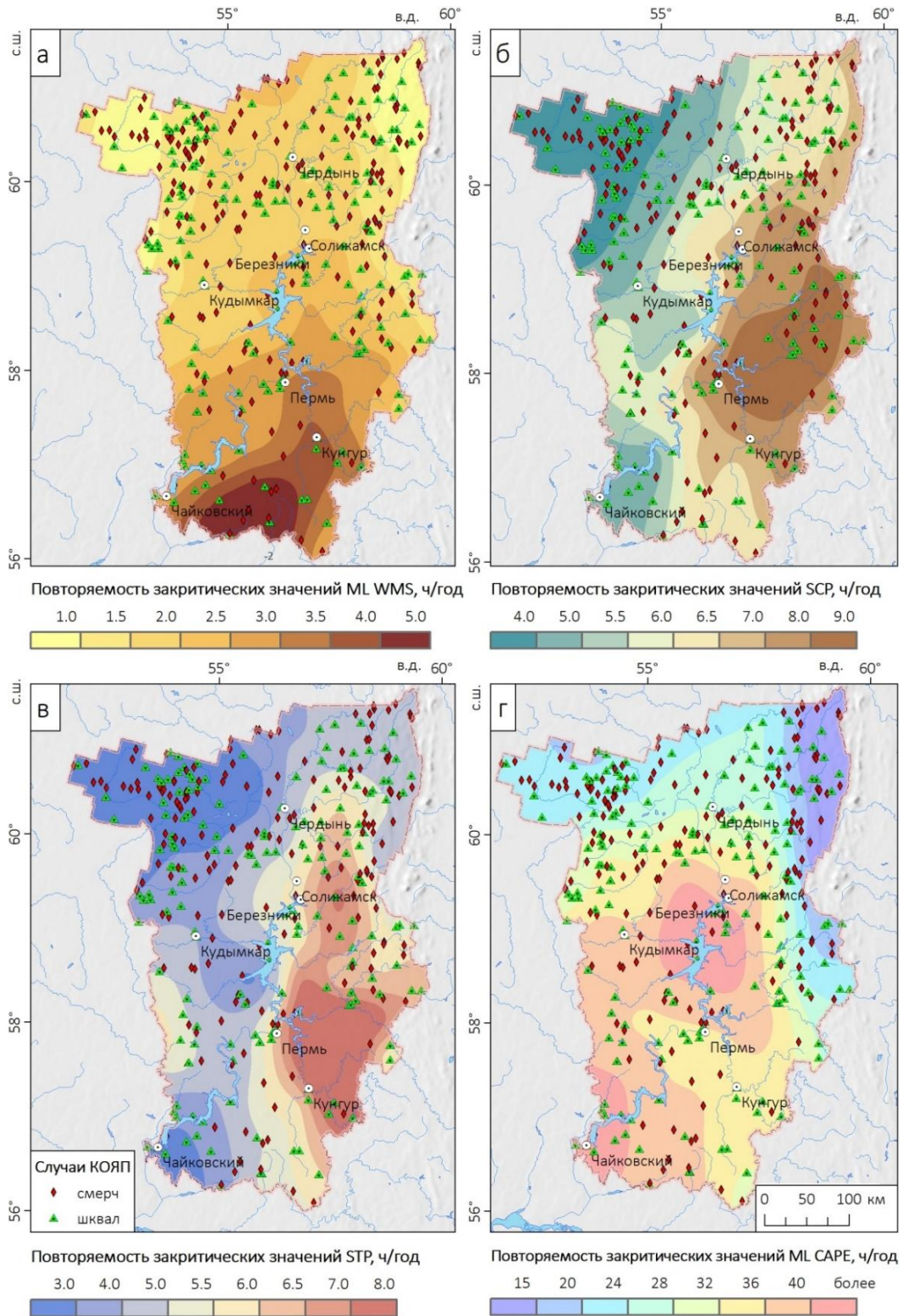


Рис. 5. Повторяемость закритических значений конвективных параметров атмосферы (прокси-характеристик сильных конвективных штормов) по данным реанализа ERA5, ч/год: а) ML WMS; б) SCP; в) STP; г) ML CAPE

Fig. 5. Frequency of supercritical values of convective atmospheric parameters (proxies of severe convective storms) according to the ERA5 reanalysis data, hours per year: а) ML WMS; б) SCP; в) STP; г) ML CAPE

Для территории Пермского края не выявлено значимых положительных корреляций между пространственным распределением повторяемости закритических значений конвективных параметров и случаев КОЯП (для некоторых индексов корреляции оказались даже отрицательными). Однако это соответствует общей закономерности для лесной зоны ЕТР — наибольшая повторяемость закритических значений индексов приурочена к южной части лесной зоны (примерно $55\text{--}58^\circ$ с. ш.), а ветровалов, вызванных шквалами и смерчами — к ее центральной части (примерно вдоль 60° с. ш.) [Taszarek et al., 2021; Shikhov et al., 2025]. В целом для лесной зоны ЕТР зависимости между пространственным распределением ветровалов и конвективных параметров хорошо выражены [Shikhov et al., 2025], а территория Пермского края слишком мала для проявления таких закономерностей.

ВЫВОДЫ

В рамках настоящей работы с применением комплекса различных данных наблюдений и реанализа построена серия карт пространственного распределения случаев локальных КОЯП (шквалов и смерчей) на территории Пермского края. Оценены пространственные зависимости между показателями плотности пространственного распределения случаев, площади вызванных ими ветровалов, а также прокси-характеристиками (молниевой активностью и повторяемостью закритических значений конвективных параметров атмосферы по данным реанализа ERA5). В отличие от ранее опубликованных оценок для всего мира [Taszarek et al., 2021] и лесной зоны Европейской России [Shikhov et al., 2025], для территории Пермского края подтвердить зависимости между пространственным распределением КОЯП и их прокси-характеристик, рассчитанных по данным реанализа, не удалось. Такие зависимости лучше выражены для более обширных территорий, например для всей лесной зоны ЕТР. Полученный результат, тем не менее, согласуется с ранее полученными оценками [Shikhov et al., 2025], согласно которым наибольшая площадь ветровалов отмечается в центральной части лесной зоны, а самые высокие значения конвективных параметров по данным реанализа — в ее южной части, что обусловлено различиями в свойствах лесных насаждений. Анализируемые данные были получены за разные периоды (случаи КОЯП и ветровалы — за 1984–2024 гг., данные реанализа — за 1991–2020 гг., а молниевая активность — за 2020–2024 гг.), что также могло оказать некоторое, хотя и менее существенное влияние на закономерности пространственного распределения. Среди выявленных общих закономерностей можно отметить, что наибольшая плотность случаев шквалов и смерчей, наибольшая доля площади ветровалов от площади леса и один из максимумов молниевой активности располагается над северо-западом края, что может указывать на объективное существование здесь максимума повторяемости шквалов и смерчей. В ранее опубликованной работе [Shikhov et al., 2025] этот максимум также был выявлен.

По мере изменения климата пространственное распределение случаев шквалов и смерчей, а также и условия для их возникновения будут меняться. Согласно оценкам [Lepore et al., 2021], ожидается смещение зоны с наибольшей частотой возникновения сильных конвективных штормов к северу, что может обусловить, с одной стороны, увеличение потерь для лесного хозяйства в северной части края, а с другой — уменьшение возможного ущерба в южной части края, где проживает большая часть населения. В то же время ожидается расширение сезона возникновения случаев этих явлений и увеличение доли случаев в весенний и осенний период.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ и Пермского края (грант № 25-27-20113).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation and Perm Krai (Project No. 25-27-20113).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Шихов А. Н., Абдуллин Р. К., Чернокульский А. В., Ажигов И. О., Ярынич Ю. И., Спрыгин А. А., Корнев Д. П. Создание картографической базы данных и веб-сервиса «Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы международной конференции. М.: МГУ, Географический факультет, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 120–135. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-120-135.

Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Калинин Н. А., Пьянков С. В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. 284 с.

Chernokulsky A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A., Korshunova N. N., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., Semenov V. A., Shvets' N. V., Shikhov A. N., Yarinich Yu. I. Atmospheric Severe Convective Events in Russia: Changes Observed from Different Data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022. V. 47. P. 343–354. DOI: 10.3103/S106837392205003X.

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. Iss. 8. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.

Diffenbaugh N. S., Scherer M., Trapp R. J. Robust Increases in Severe Thunderstorm Environments in Response to Greenhouse Forcing. *PNAS*, 2013. V. 110. Iss. 41. P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.

Doswell C. A. Severe Convective Storms — An Overview. *Severe Convective Storms. Meteorological Monographs*. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. DOI: 10.1007/978-1-935704-06-5_1.

Edwards R., LaDue J. G., Ferree N. T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W. L. Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94. Iss. 5. P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.

Feng Z., Leung L. R., Liu N., Wang J., Houze R. A., Li J., Hardin J. C., Chen D., Guo J. A Global High-Resolution Mesoscale Convective System Database using Satellite-Derived Cloud Tops, Surface Precipitation, and Tracking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. V. 126. Iss. 8. Art. e2020JD034202. DOI: 10.1029/2020JD034202.

Groenemeijer P., Kühne T. A Climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. Iss. 12. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1.

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., Koppert H., 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. Iss. 12. P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu P., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., De Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

Kaplan J. O., Lau K. H.-K. The WGLC Global Gridded Lightning Climatology and Time Series. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13. Iss. 7. P. 3219–3237. DOI: 10.5194/essd-13-3219-2021.

Lepore C., Abernathy R., Henderson N., Allen J. T., Tippett M. K. Future Global Convective Environments in CMIP6 Models. *Earth's Future*, 2021. V. 9. Iss. 12. Art. e2021EF002277. DOI: 10.1029/2021EF002277.

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. 2. Art. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.

Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020. *Atmosphere*, 2021. V. 12. Iss. 11. Art. 1407. DOI: 10.3390/atmos12111407.

Shikhov A. N., Yarinich Yu. I., Chernokulsky A. V. Association of Spatial and Temporal Windthrow Distribution with Convective Parameters and Lightning Density in Russia. *Geography. Environment. Sustainability*, 2025. V. 18. No. 1. P. 75–88. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3590.

Taszarek M., Allen J. T., Marchio M., Brooks H. E. Global Climatology and Trends in Convective Environments from ERA5 and Rawinsonde Data. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2021. V. 4. Art. 35. DOI: 10.1038/s41612-021-00190-x.

Taszarek M., Allen J. T., Púčik T., Hoogewind K. A., Brooks H. E. Severe Convective Storms Across Europe and the United States. Part II: ERA5 Environments Associated with Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes. *Journal of Climate*, 2020. V. 33. Iss. 23. P. 10263–10286. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0346.1.

Tippett M. K., Allen J. T., Gensini V. A., Brooks H. E. Climate and Hazardous Convective Weather. *Current Climate Change Reports*, 2015. V. 1. P. 60–73. DOI: 10.1007/s40641-015-0006-6.

REFERENCES

Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyán E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. Satellite-Based Mapping of the Vegetation Cover of Russia. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2016. 208 p. (in Russian).

Chernokulsky A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A., Korshunova N. N., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., Semenov V. A., Shvets' N. V., Shikhov A. N., Yarinich Yu. I. Atmospheric Severe Convective Events in Russia: Changes Observed from Different Data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022. V. 47. P. 343–354. DOI: 10.3103/S106837392205003X.

- 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 Reviews*, 2020. V. 148. Iss. 8. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
- Diffenbaugh N. S., Scherer M., Trapp R. J.* Robust Increases in Severe Thunderstorm Environments in Response to Greenhouse Forcing. *PNAS*, 2013. V. 110. Iss. 41. P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.
- Doswell C. A.* Severe Convective Storms — An Overview. *Severe Convective Storms. Meteorological Monographs*. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. DOI: 10.1007/978-1-935704-06-5_1.
- Edwards R., LaDue J. G., Ferree N. T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W. L.* Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94. Iss. 5. P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.
- Feng Z., Leung L. R., Liu N., Wang J., Houze R. A., Li J., Hardin J. C., Chen D., Guo J.* A Global High-Resolution Mesoscale Convective System Database using Satellite-Derived Cloud Tops, Surface Precipitation, and Tracking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. V. 126. Iss. 8. Art. e2020JD034202. DOI: 10.1029/2020JD034202.
- Groenemeijer P., Kühne T.* A Climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. Iss. 12. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1.
- 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., Koppert H., 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. Iss. 12. P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu P., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., De Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N.* The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Kaplan J. O., Lau K. H.-K.* The WGLC Global Gridded Lightning Climatology and Time Series. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13. Iss. 7. P. 3219–3237. DOI: 10.5194/essd-13-3219-2021.
- Lepore C., Abernathy R., Henderson N., Allen J. T., Tippett M. K.* Future Global Convective Environments in CMIP6 Models. *Earth's Future*, 2021. V. 9. Iss. 12. Art. e2021EF002277. DOI: 10.1029/2021EF002277.
- 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. 2. Art. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.
- Shikhov A. N., Abdullin R. K., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Yarinich Y. I., Sprygin A. A., Korenev D. P.* Development of a GIS Database and Web Service “Hazardous Convective Weather Events on the Territory of Central Federal District”. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 3. P. 120–135 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-120-135.

Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020. *Atmosphere*, 2021. V. 12. Iss. 11. Art. 1407. DOI: 10.3390/atmos12111407.

Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Kalinin N. A., Pyankov S. V. Windthrow in the Forest Zone of Russia and Conditions of Their Occurrence. Perm: Perm State University, 2023. 284 p. (in Russian).

Shikhov A. N., Yarinich Yu. I., Chernokulsky A. V. Association of Spatial and Temporal Windthrow Distribution with Convective Parameters and Lightning Density in Russia. *Geography. Environment. Sustainability*, 2025. V. 18. No. 1. P. 75–88. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3590.

Taszarek M., Allen J. T., Marchio M., Brooks H. E. Global Climatology and Trends in Convective Environments from ERA5 and Rawinsonde Data. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2021. V. 4. Art. 35. DOI: 10.1038/s41612-021-00190-x.

Taszarek M., Allen J. T., Púčik T., Hoogewind K. A., Brooks H. E. Severe Convective Storms Across Europe and the United States. Part II: ERA5 Environments Associated with Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes. *Journal of Climate*, 2020. V. 33. Iss. 23. P. 10263–10286. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0346.1.

Tippett M. K., Allen J. T., Gensini V. A., Brooks H. E. Climate and Hazardous Convective Weather. *Current Climate Change Reports*, 2015. V. 1. P. 60–73. DOI: 10.1007/s40641-015-0006-6.
