

Научная статья

УДК 614.8; 355.58; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

ОБЗОР КАНАДСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ – ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

✉ Ложкина Ольга Владимировна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ oljkina@yandex.ru

Аннотация. Представлен обзор канадских исследований в области прогнозирования и мониторинга природных пожаров. Ко всемирно признанным достижениям канадских ученых относится разработанная ими научно обоснованная комплексная система мониторинга и прогнозирования пожарной опасности лесов, включающая подсистему индексирования пожароопасной погоды и подсистему прогнозирования поведения пожаров, а также результаты исследования взаимосвязи изменения климата, лесных пожаров, лесохозяйственных практик и практик пожаротушения, качественно-количественного состава лесов, на основании которых предлагаются стратегические подходы для контроля и управления лесными пожарами, в том числе чрезвычайного характера, представляющими серьезную угрозу для человеческого общества в социально-экономическом и экологическом аспектах.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, природные пожары, прогнозирование, мониторинг, канадские исследования

Для цитирования: Ложкина О.В. Обзор канадских исследований в области прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций – природных пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 31–44. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

Scientific article

REVIEW OF CANADIAN INVESTIGATIONS IN FORECASTING AND MONITORING OF EXTREME WILDFIRES

✉ Lozhkina Olga V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ oljkina@yandex.ru

Abstract. The paper presents an overview of Canadian key achievements in wildland fire science, namely, in wildfire forecasting and monitoring. Among the internationally recognized achievements of Canadian scientists is the development of an integrated Canadian Forest Fire Danger Rating System including Fire Weather Index subsystem and Fire Behaviour Prediction subsystem. Moreover, they estimated relationship between climate change, wildfires, forest management and fire suppression practices, and the qualitative and quantitative composition of forests. These findings help to determine strategic approaches for managing wildfires, including extreme ones, which pose a serious threat to human society in socioeconomic and environmental terms.

Keywords: emergencies, wildfires, forecasting, monitoring, Canadian investigations

For citation: Lozhkina O.V. Review of canadian investigations in forecasting and monitoring of extreme wildfires // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 31–44. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-31-44

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Введение

Во второй половине XX в. и первой четверти XXI в. на фоне глобального потепления климата стали изменяться режимы, продолжительность, частота, масштабность, число ландшафтных пожаров [1, 2]. Длительные, опустошающие, трудно локализуемые лесные пожары представляют собой чрезвычайные ситуации глобального масштаба, которые имеют место на всех континентах планеты, за исключением Антарктиды [3, 4].

Известно, что лесные пожары являются важным экологическим фактором природных экосистем пожарного типа, способствующим смене лесных биоценозов, сохранению видового разнообразия, минерализации почвенного слоя и др. В то же время в новейшем историческом периоде они стали представлять не только серьезную социально-экономическую угрозу для человеческого общества, но и оказывать значимое глобальное негативное влияние на состояние биосферы [5].

В России, Канаде, США системные исследования в области лесной пирологии начались в 30-х гг. прошлого века. В нашей стране существенный вклад в развитие этой отрасли знаний внесли: Н.П. Курбатский (разработка научных основ построения местных шкал пожарной опасности в лесах), В.Г. Нестеров (обоснование индексов горимости леса), С.М. Вонский, Г.А. Амосов, Г.Н. Коровин и В.Г. Гусев (систематические исследования количественных характеристик лесных пожаров) [6]; И.С. Мелехов, В.А. Жданко, М.А. Софронов, А.В. Волокитина (развитие системы знаний о пирологических характеристиках лесных горючих материалов) [7], А.М. Гришин (создание физико-математических моделей распространения природных пожаров) [8] и многие другие ученые.

В конце XX в. и начале XXI в., ввиду глобальности и актуальности проблемы лесных пожаров, ученые со всего мира интенсивно обменивались опытом и консолидировали усилия по созданию международных моделей природных пожаров. Например, на северо-западных территориях Канады в 1995–2001 гг. был реализован глобальный международный экспериментальный проект по моделированию верховых пожаров с участием более 100 учёных из 14 стран мира, в том числе и из Российской Федерации из Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) [9].

Российская прогностическая модель распространения и поведения пожара, реализуемая в рамках комплексной прогнозно-аналитической системы ИСДМ-Рослесхоз, создавалась с учетом принципов канадской модели CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System), что следует из информационных материалов, размещенных на официальном сайте ФБУ «Авиалесоохрана» (https://nffc.aviales.ru/docs/isdm_docs/Fire_model.pdf).

Для выработки эффективной стратегии адаптации и управления природными пожарами в современном климатическом контексте необходимо иметь представление об актуальных исследованиях в области управления лесными пожарами, проводимых зарубежными научными школами, в том числе канадскими.

Методы исследования

Методологической базой работы стали труды канадских ученых и специалистов в области предупреждения, мониторинга и прогнозирования природных пожаров, в том числе исследования С.Е. Van Wagner, В.Ж. Стокса, Х. Сонга, М.А. Паризьена, К.Е. Барбера, М.Л. Бурбоннаиса, М.С. Кирхмайера-Юнга и др., а также международные информационные базы данных, включая данные агрегатора о состоянии лесов планеты Global Forest Watch (GFW, <https://www.globalforestwatch.org/>), материалы департамента природных ресурсов правительства Канады (<https://natural-resources.canada.ca>), Канадского национального регистра лесов (<https://nfi.nfis.org/en>) и материалы Канадской системы мониторинга и прогнозирования природных пожаров (<https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca>).

Сведения о лесных фондах и лесных пожарах в Канаде

Согласно информационно-аналитическим данным GFW Канада занимает третье место в мире по площади лесных насаждений после России и Бразилии – 421 Мга. На территории Канады имеется множество природных национальных парков (рис. 1).



а



б)

Рис. 1. а) Национальный парк Брюс Пенинсула (Онтарио, Канада);
б) Национальный парк Банф (Альберта, Канада)

Данные инвентаризации древесных и недревесных лесных материалов и распределение их по возрастным группам представлены в табл. 1 (<https://nfi.nfis.org/en>).

Таблица 1

Общий запас древесной и недревесной растительности, млн м³, на канадских лесных угодьях по типам и возрастам

	Запасы древесной и нелесной лесной растительности, м³											
	Возраст лесной растительности, лет											
Тип леса	1–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	141–160	161–180	181– 200	>200	Итого
НР	1,79	2,07	6,53	24,59	26,36	31,81	5,70	0,54	0,25	0,19	0,09	99,94
Ш	221,57	585,37	1199,20	2015,71	1806,82	727,65	302,96	115,35	16,44	18,94	14,66	7024,68
С	233,94	624,61	1127,33	1691,79	1605,89	1137,56	498,37	218,27	55,10	28,01	34,72	7255,59
Х	326,38	1593,29	2682,88	4111,47	4759,52	7056,66	5381,55	2538,47	1113,41	596,74	6532,9128	36693,36
Итого	783,69	2805,35	5015,94	7843,56	198,59	8953,69	6188,58	2872,63	1185,20	643,88	6582,45	51073,56

Примечания: НР – недревесная растительность; Ш – широколиственные леса; С – смешанные леса; Х – хвойные леса

Анализ данных инвентаризации лесов, осуществленной в 2007–2017 гг., свидетельствует о том, что в Канаде преобладают хвойные деревья – на их долю приходится 71,84 % лесных материалов. Запасы широколиственных деревьев ощутимо (более чем в 5 раз меньше), их доля составляет 13,75 % от общей лесной растительности. Обращает на себя внимание «солидный» возраст хвойных лесов, фонд старых деревьев более 100 лет составляет 63,28 %, а деревьев старше 200 лет – 12,79 %. Забегая вперед, обратим внимание на то, что, по мнению ряда канадских ученых, именно высокий возраст лесов (лесных горючих материалов), хуже удерживающих влагу и легче поддающихся воспламенению, чем молодые деревья, рассматривается в качестве одной из основных причин небывалых прежде лесных пожаров 2023–2025 гг.

Динамика утраты лесных угодий в 2001–2025 гг. суммарно и вследствие пожаров отражена на рис. 2 (<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/CAN/>).

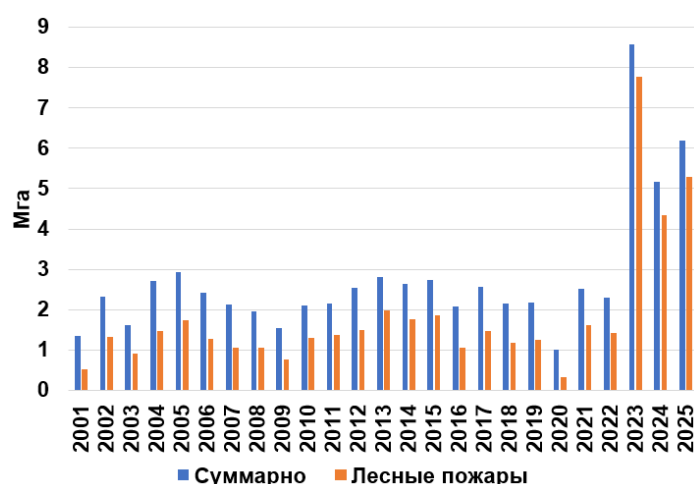


Рис. 2. Динамика потерь лесных площадей суммарно и вследствие пожаров в Канаде в 2001–2025 гг.

С 2001 по 2022 г. площадь лесных пожаров в Канаде не превышала 2 Мга. Максимальное значение 1,98 Мга было зафиксировано в 2013 г., а минимальное 0,32 Мга – в 2020 г. В 2023 г. страна пережила небывалое доселе бедствие – суммарно огнем было пройдено 7,76 Мга лесных угодий. В 2024 г. – 4,3 Мга, в 2025 г. – 5,3 Мга, то есть кардинально увеличились масштабы лесных пожаров.

Пожароопасные сезоны последних трех лет заставили ученых, политиков, ответственных лиц переосмыслить стратегию предупреждения и управления лесными пожарами и адаптации к ним в условиях изменения климата.

Канадская система мониторинга и прогнозирования природных пожаров

В 70-х гг. прошлого века Канадская лесная служба, Канадский межведомственный центр по борьбе с лесными пожарами в сотрудничестве с провинциальными и территориальными агентствами по борьбе с лесными пожарами приступили к разработке комплексной системы мониторинга и прогнозирования пожарной опасности лесов (Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS) [9, 10]. Эта комплексная модель развивалась в результате обработки большого количества эмпирического материала по ландшафтным пожарам разных типов. Модель CFFDRS, на основе комплексной оценки пожарной опасности погоднo-климатических условий и состояния лесных горючих материалов, позволяет прогнозировать возникновение, распространение, поведение лесных пожаров, обосновывать мероприятия по предотвращению и управлению лесными пожарами, определять силы и средства для их ликвидации и др. [10].

CFFDRS включает следующие подсистемы:

- подсистему прогнозирования развития пожаров (Fire Behaviour Prediction (FBP), разработанный группой ученых S.W. Taylor, M.E. Alexander, D.D.B. Perrakis, B.J. Stocks [9];
- подсистему индексирования пожароопасной погоды (Fire Weather Index (FWI), в разработку и структурирование которой значимый вклад внес Ch. Van Wagner [10];
- подсистему прогнозирования возникновения пожаров (Fire Occurrence Prediction (FOP);
- подсистему контроля влагосодержания горючих материалов (Accessory Fuel Moisture System (AFMS)).

Для модели FWI необходимы данные о температуре, относительной влажности, скорости ветра в полдень по местному времени и осадках за 24 ч, высота снежного покрова, направление ветра, точка росы и атмосферное давление, по которым оценивается влагосодержание растительных горючих материалов и прогнозируется возникновение пожаров.

Модель FBP позволяет оценить скорость распространения низовых и верховых пожаров по фронту и по периметру, расход лесных горючих материалов, интенсивность и площадь пожаров, а также с помощью эллиптической модели развития пожара позволяет оценить площадь пожара, его периметр, скорость распространения и поведение по всему периметру.

И, хотя изначальная система концептуально надежна, в 10–20-х гг. нынешнего века стало очевидно, что она уже не отвечала современному информационно-коммуникационному технологическому прогрессу: увеличению вычислительной мощности компьютеров, скорости получения данных с помощью систем удаленного и космического мониторинга (включая данные о погоде в реальном времени, прогнозы погоды, данные спутниковых наблюдений за лесными пожарами и удаленного анализа состояния лесных горючих материалов) и их обработки с использованием искусственного интеллекта, поэтому потребовалось проведение научных исследований по разработке моделей нового поколения с расширенными возможностями [12–14].

Краткий обзор исследований по мониторингу влияния изменения климата на природные пожары

По данным Канадского климатического института, средняя температура по стране повысилась с 1948 г. примерно на 1,7 °C, в целом в Канаде глобальное потепление происходит примерно вдвое быстрее, чем в мире, а в Арктической зоне – в четыре раза быстрее. Согласно текущим прогнозам по пессимистичным сценариям, среднегодовая температура здесь может повыситься на 5 °C к концу столетия, а в северных регионах – до 8 °C [15]. Изменения температурных режимов прогнозируемо будут сопровождаться изменениями других климатических показателей, включая количество осадков, продолжительность вегетационного периода, что неизбежно приведет к значительному изменению растительных (лесных) экосистем по видовому и количественному составу [16].

В актуальных условиях разработка подходов и инструментов для количественной оценки влияния климатических, биотических и топографических характеристик на состояние лесных горючих материалов, а также предоставление пространственно-согласованной и актуальной информации о риске лесных пожаров имеет критически важное значение.

Одно из первых знаковых исследований в области оценки влияния изменения климата было проведено в 1991 г. М. Flannigan и С.Е. Van Wagner с использованием трех моделей общей циркуляции атмосферы (модели Лаборатории геофизической гидродинамики, модели Института космических исследований имени Годдарда и модели Университета штата Орегон) и разработанных авторами моделей прогнозирования лесных пожаров в Канаде [17].

В качестве показателя влияния изменения климата на лесные пожары применялся сезонный индекс опасности (seasonal severity rating, SSR), рассчитанный с учетом удвоения концентрации CO₂ в воздушной среде. SSR является компонентом канадской системы индексирования пожароопасной погоды (fire weather index, FWI) и представляет собой усредненное значение ежедневных индексов опасности (daily severity rating, DSR), которые, в свою очередь, вычисляются по формуле:

$$DSR = 0.0272FWI^{1.77}$$

Для расчета индекса FWI требуются такие погодные данные, как температура атмосферного воздуха, относительная влажность, скорость и направление ветра, точка росы и атмосферное давление, высота снежного покрова в весенне-зимний период. FWI отражает риск (опасность) распространения пожара в определенных точечных пространственно-временных координатах, а индексы DSR и SSR используются для временного или пространственного усреднения показателей пожарной опасности в целях управления лесными пожарами, в том числе для обоснования сил и средств, необходимых для их тушения.

Результаты выполненных расчетных исследований по сценарию, предполагающему удвоение содержания CO_2 относительно 1991 г., выявили несколько критических последствий для режима лесных пожаров в Канаде:

- увеличение индекса SSR на 46 % и сопоставимое увеличение площадей пожаров;
- увеличение продолжительности пожароопасного сезона, подтвержденное результатами более позднего исследования [18], показывающими, что изменение климата приведет к росту продолжительности пожароопасного сезона в Канаде примерно на 22 %, то есть примерно на 30 дн.;

- усиление всех ключевых климатических и биотических факторов возникновения лесных пожаров: ускорение темпов «пожарного созревания» лесных горючих материалов, более высокая грозовая активность, формирование благоприятных погодных условий для возникновения пожаров, включая устойчивые атмосферные блокирующие гребни. Полученные M. Flannigan и C.E. Van Wagner результаты получили подтверждение в значительно более позднем исследовании C. Mulverhill и коллег [19].

В работе [20] описаны результаты изучения влияния изменения погодноклиматических условий в долгосрочной ретроспективе 1971–2019 гг. на режимы и масштабы природных пожаров в провинции Альберта и Национальном парке Вуд-Буффало на Северо-Западных территориях Канады (где совокупная площадь бореальных лесов составляет примерно 409 350 км²) с использованием анализа временных рядов, основанного на архивных метеоданных (температуры воздуха, дефицита давления водяного пара, количества осадков и др.) и сведениях о числе, площади и интенсивности пожаров.

Тренды погодноклиматических характеристик и характеристик пожаров приведены на рис. 3 [20].

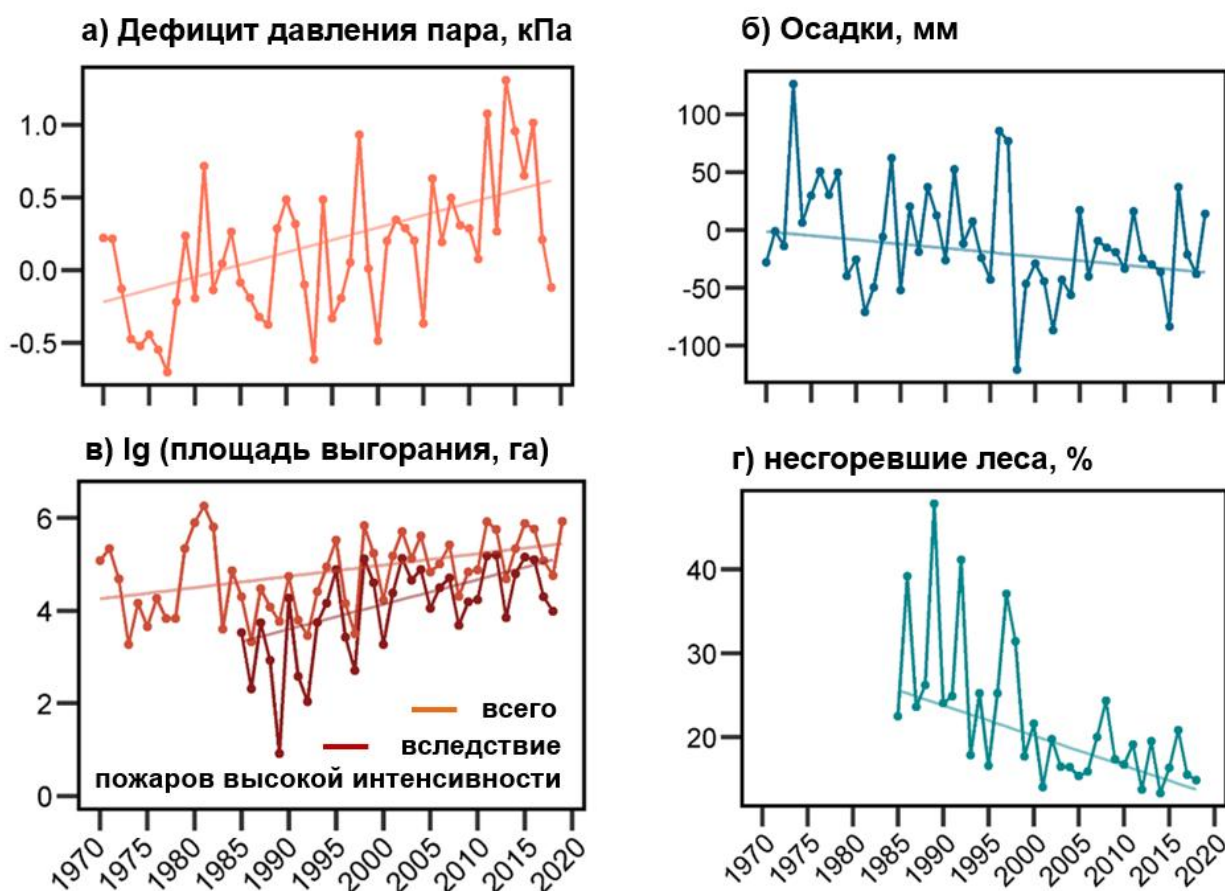


Рис. 3. Временные ряды динамики изменения: а) дефицита давления водяного пара летом; б) годовых осадков; в) площади выгорания лесных территорий; г) доли негоревшего леса на лесных территориях, пройденных пожарами в 1971–2020 гг. в провинции Альберта, Канада

Авторы проверили наличие непараметрических линейных трендов для каждого временного ряда, рассчитав коэффициенты наклона Тейла-Сена и определили значимость ($p \leq 0,05$) линейных трендов, используя односторонний тест тренда Манна-Кендалла в программном продукте EnvStats.

Было подтверждено, что отклонения от исторических режимов пожаров в условиях изменения климата имеют существенные последствия для структуры и состава бореальных лесов, а также для контроля над пожарами.

Аналитическое ретроспективное (с 1920 по 2021 гг.) и прогнозное (до 2100 г.) исследование, проведенное для еще одной канадской провинции – Британской Колумбии, тоже подтвердило общую тенденцию негативного влияния климатических изменений на режимы и характер природных пожаров [21]. На рис. 4 представлены мониторинговые и прогнозные данные по изменению температуры воздуха и дефициту атмосферной влаги в Британской Колумбии [21].

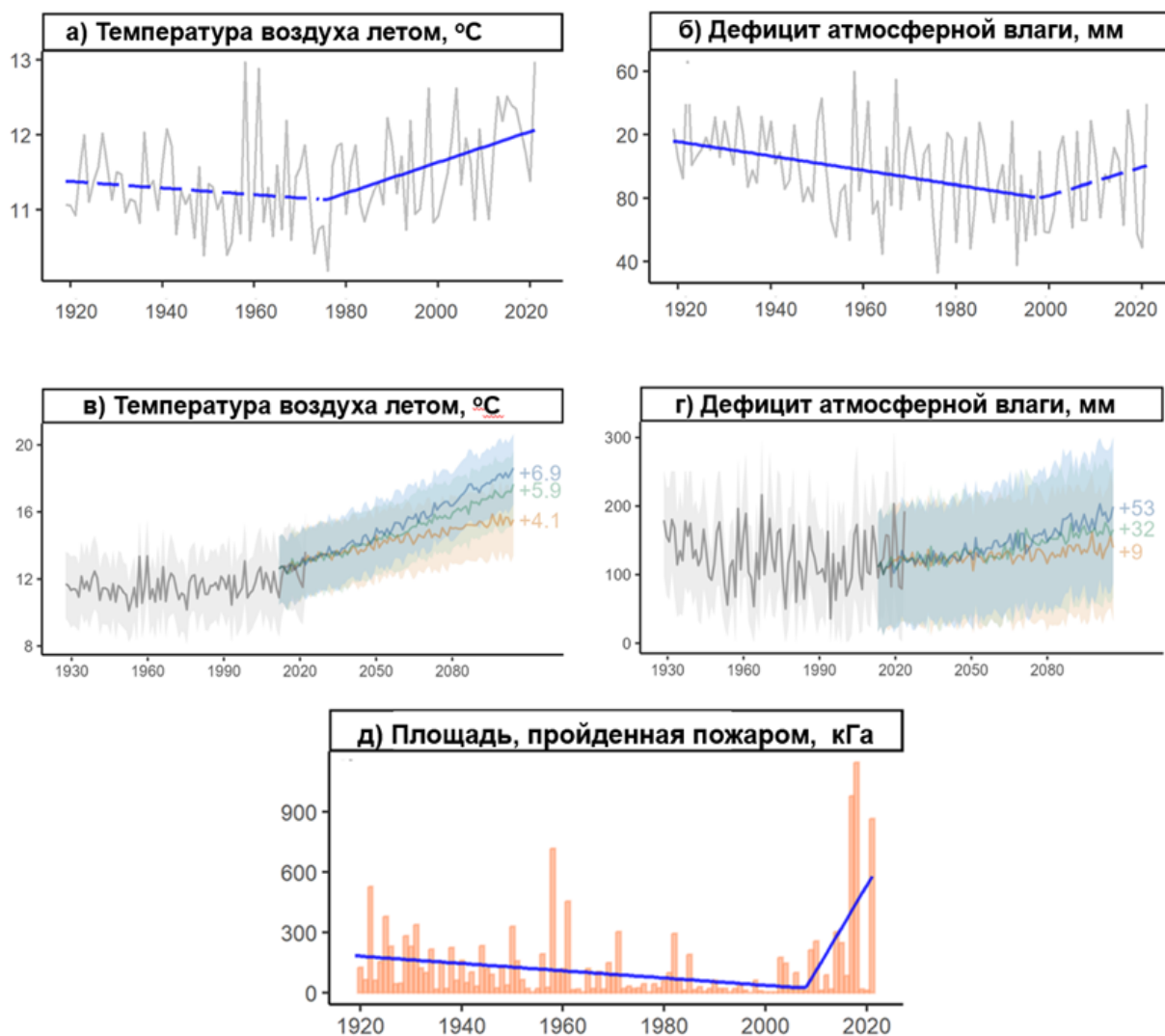


Рис. 4. Временные ряды динамики изменения:

а) летней температуры воздуха и б) дефицита атмосферной влаги в Британской Колумбии в 1920–2020 гг.; временные ряды прогнозных трендов изменения в) летней температуры воздуха и в) дефицита атмосферной влаги в Центральной Британской Колумбии до 2100 г. по пессимистичному (синий), базовому (зеленый) и оптимистичному (оранжевый) сценариям климатических изменений; д) площадь, пройденная пожарами в Британской Колумбии в 1920–2020 гг.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в этой канадской провинции в течение последнего столетия имели место существенные климатические изменения, включая рост температуры воздуха с 1970 по 2021 г. (в центральной зоне на 0,98 °С, в прибрежной – на 1,25 °С, в северной – на 0,61 °С), непропорциональный (замедленный) рост количества осадков, что в совокупности отразилось на увеличении дефицита атмосферной влаги.

С конца прошлого века погодно-климатические условия в Британской Колумбии стали заметно меняться, даже при высоком уровне осадков дефицит атмосферной влаги увеличился из-за быстрого потепления и увеличения эвапотранспирации (рис. 4 б). В результате, после продолжительного спада пожарной активности с 60-х гг. по 2000 г., с начала XXI в. она вновь начала расти (рис. 4 д). Кроме того, средняя продолжительность сезона лесных пожаров, определяемая по метеорологическим данным (высота снежного покрова, количество дней без заморозков и др.), тоже увеличилась на 26,7 дн., а начало пожароопасного сезона (день, когда площадь лесных пожаров достигает 2 % от общей площади, выгоревшей за год, сместилось на 27,1 дн. с начала прошлого века. Площадь выгоревшей территории значительно коррелирует с дефицитом атмосферной влаги (рис. 4 б и 4 д). Следует отметить, что помимо изменения климата, на вариабельность режимов лесных пожаров в трех зонах провинции оказывали влияние грозная активность, повреждение лесов насекомыми, способы лесоведения и т.д.

Результаты прогнозирования по климатическим моделям указывают на то, что даже по оптимистичному сценарию продолжится рост приземной температуры и рост дефицита атмосферной влаги, наиболее проявленный в центральной зоне провинции и наименее – в северной. Учитывая наблюдаемый и прогнозируемый тренд в изменении климата, вероятно, риск возникновения и распространения лесных пожаров будет продолжать расти в нынешнем столетии даже при самом оптимистичном климатическом сценарии.

Можно сказать, что представленные прогнозы уже начали оправдываться с 2023 г., когда Канада пережила беспрецедентные лесные пожары, охватившие в совокупности ~ 15 млн га лесных территорий (рис. 2).

2023 стал самым теплым годом за всю историю метеорологических наблюдений с 1850 г., а средняя температура в Канаде в течение пожароопасного сезона 2023 г. была на 2,2 °С выше, чем в среднем за период 1991–2020 гг. [22].

В 2023 г. лесные пожары в Канаде уничтожили 15 миллионов гектаров, что более чем вдвое превысило предыдущий рекорд. Эти пожары привели к рекордному числу эвакуаций, беспрецедентному ухудшению качества воздуха по всей Канаде и на северо-востоке США, а также к значительной нагрузке на ресурсы по борьбе с пожарами. Численные исследования с использованием климатических моделей (CMIP6-historical и CMIP6-HighResMIP) и модели прогнозирования пожароопасной погоды (CanLEAD-FWI) показали, что вызванное деятельностью человека изменение климата более чем в два раза увеличило вероятность лесных пожаров на востоке и юго-западе Канады, вероятность длительного пожароопасного сезона возросла более чем в пять раз, выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов от лесных пожаров 2023 г. в восемь раз превысили средний показатель за 1985–2022 гг. Авторы прогнозируют дальнейшее увеличение риска экстремальных пожароопасных сезонов в будущем дополнительным риском для здоровья людей и устойчивости экосистем.

В статьях [23] и [24] по результатам аналитических исследований приводятся приблизительные численные оценки влияния антропогенного изменения климата на режимы лесных пожаров. По оценкам специалистов, влияние изменения климата на продолжительность и масштабность природных пожаров составило 30–45 %.

Краткий обзор исследований по оценкам экологических последствий природных пожаров и адаптации к ним

Катастрофические лесные пожары в Канаде в 2023–2025 гг. (особенно 2023 г., когда огнем было пройдено около 15 млн га, более 200 тыс. чел. было эвакуировано из мест своего обитания либо в связи с угрозой огня, либо из-за экстремально высокого загрязнения воздуха, при тушении пожаров погибло 8 пожарных, а в некоторых провинциях (Британской Колумбии,

Альберте, Квебеке и др.) режим чрезвычайного положения продлился около месяца [26]) подтвердили правильность трендов поведения природных пожаров, выявленных предшествующими прогнозами, и заставили встать на путь пересмотра существующих практик в управлении лесным хозяйством, профилактики пожаров и пожаротушении, в подготовке общества к жизни в меняющихся климатических условиях и адаптации к изменению режимов природных пожаров.

Подтверждение тому – ряд научных статей, не только анализирующих причины и экологические последствия этой чрезвычайной ситуации глобального масштаба [22, 26–28], но и предлагающие стратегические концептуальные решения, необходимые для сосуществования с лесными пожарами [29, 30].

В ряде работ анализируется влияние продуктов горения лесных пожаров 2023 г. на выброс парниковых газов и потенциальные климатические эффекты.

Например, численные исследования, выполненные с использованием модели LSM, показали, что в среднем выбросы CO_2 от лесных пожаров в Канаде в период с 1985 по 2022 г. составляли 88 ± 62 Тг CO_2 в год, а выбросы CO_2 в 2023 г. – 700 Тг, что в восемь раз превышает средний показатель за 1985–2022 гг. И это без учета других парниковых газов [22].

Работа [26] посвящена изучению влияния аэрозольных поллютантов от пожаров на прозрачность атмосферы по значениям оптической плотности и на метеорологические условия в Северном полушарии с использованием модели EC-Earth327 и сопоставлением результатов моделирования с данными наблюдений. Предсказуемым результатом исследования явилось подтверждение потенциального охлаждения поверхности вследствие поглощения взвешенными ультрадисперсными частицами солнечной радиации.

В статье [27] исследуется влияние мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ (частиц диаметром менее 2,5 мкм), выделившихся в атмосферу в ходе катастрофических пожаров 2023 г., на уровень их содержания в атмосфере Канады, США, Евросоюза и глобально, а также их воздействие на здоровье населения. Было обнаружено, что эти пожары привели к увеличению глобальной годовой концентрации $\text{PM}_{2.5}$ на $0,17 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ (95 % доверительный интервал, $0,09\text{--}0,26 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$), в Северной Америке – на $1,08 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($0,82\text{--}1,34 \text{ мкг}/\text{м}^3$), в Европе – на $0,41 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($0,32\text{--}0,50 \text{ мкг}/\text{м}^3$); в Канаде – на $3,82 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($3,00\text{--}4,64 \text{ мкг}/\text{м}^3$), в США – на $1,49 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ($1,22\text{--}1,77 \text{ мкг}/\text{м}^3$), что в четыре раза больше, чем вклад лесных пожаров 2023 г, возникших непосредственно в США. Согласно полученным оценкам 354 млн (277–421 млн) чел. в Северной Америке и Европе подверглись негативному воздействию мелкодисперсных частицами $\text{PM}_{2.5}$ и оно могло спровоцировать 64300 (37 800–90 900) случаев преждевременной смерти среди людей с хроническими заболеваниями в Северной Америке и Европе.

Масштабные социально-экономические и экологические последствия природных пожаров 2023 г. для населения, экономические – для лесных хозяйств, экологические – для природных экосистем привели научное канадское общество к необходимости обоснования новых стратегических путей и методов контроля и управления лесными пожарами [29, 30].

Можно выделить следующие стратегические направления [29, 30]:

1. Организация пожаротушения. По мнению ведущих канадских специалистов в области лесной пирологии, одними из причин столь масштабных пожаров 2023–2025 гг. явились применявшаяся десятилетиями практика агрессивного пожаротушения и практически полный запрет на профилактический отжиг растительности, что привело к формированию одновозрастных старых лесных массивов, восприимчивых к горению.

2. Неполное тушение лесных пожаров, а управление ими позволит постепенно снизить количество лесных горючих материалов, будет способствовать видовому разнообразию и предотвращению в будущем распространения масштабных пожаров.

3. Одновременно приходится признать, что изменение климата, увеличение длительности пожароопасной погоды, изменение характеристик пожарного созревания лесной растительности будут в ближайшей перспективе приводить к большему числу продолжительных ландшафтных пожаров, поэтому требуется увеличение сил и средств для тушения пожаров.

4. Лесохозяйственная деятельность. На лесных территориях, где велись лесозаготовки и были нарушены исторические циклы лесных пожаров, сосредоточены густые одновозрастные хвойные леса. Для повышения резистентности лесов к пожарам, увеличения видового разнообразия растительности целесообразно на вырубках и на территориях после пожаров увеличивать долю лиственных пород деревьев (таких как осина, белая береза и красный клен), менее склонных к возгоранию, чем хвойные породы (такие как пихта бальзамическая, ель черная и сосна Банкса). Для повышения устойчивости к пожарам лесов, где преобладают черная ель и сосна Банкса, при лесозаготовке предпочтение может быть отдано видам с ускоренным созреванием, а также можно использовать технологию частичной вырубki, оставляя мозаично, подобно пожарам, нетронутыми зрелые деревья в качестве естественного семенного фонда.

5. Образовательная деятельность. Комплексные эффективные решения в области лесной пирологии требуют междисциплинарных подходов, ориентированных на глубокие знания в области экологии и управления лесными пожарами. По мнению авторов, отсутствие специализированных образовательных программ в области пожарной экологии лесов и управления лесными пожарами является одним из препятствий на пути совершенствования системы управления лесными пожарами.

Заключение

Признавая положительную историческую роль лесных пожаров как регуляторного экологического фактора, важно понимать, что глобальное потепление приводит к изменению погодно-климатических условий в направлении, благоприятствующем негативному изменению режимов лесных пожаров, что проявляется в сокращении сроков между пожарами, повышении их агрессивности, увеличении длительности и росту площадей, пройденных огнем. Отмеченные выше обстоятельства ставят перед мировой общественностью нетривиальную задачу – на основе всестороннего анализа выработать эффективную стратегию управления природными пожарами и адаптации к ним в условиях изменения климата.

Отдавая должное отечественным ученым и сотрудникам специализированных служб, а именно российские ученые основали «лесную пирофизику» как самостоятельную науку, в нашей стране была создана и эффективно работает крупнейшая в мире служба «Авиалесоохрана», специализирующаяся на тушении пожаров с воздуха, учеными Института космических исследований РАН в сотрудничестве с Институтом лесного хозяйства им. В.Н. Сукачева СО РАН и др. организациями была разработана система спутникового мониторинга пожаров, пожарной опасности и восстановления лесов после пожаров по всей Евразии, важно осознавать, что для эффективного ответа на новые угрозы необходимо иметь представление о передовых достижениях зарубежных ученых и учитывать зарубежный опыт.

Канадские ученые внесли весомый вклад в развитие науки о лесных пожарах, к их ключевым достижениям относится разработка фундаментальных систем прогнозирования, управления и смягчения последствий пожаров (системы оценки и прогнозирования пожарной опасности (пожароопасной погоды), системы прогнозирования поведения ландшафтных пожаров, системы поддержки принятия оперативных решений, позволяющей ведомствам оптимизировать распределение ресурсов, включая размещение самолетов-танкеров, время разворачивания и оценку рисков эвакуации населения), использующихся во многих странах мира. Результаты исследования взаимосвязи лесных пожаров, изменения климата, лесохозяйственной практики и практики пожаротушения, а также ретроспективного анализа качественно-количественного состава бореальных лесов и факторов, повлиявших на них, позволили канадским ученым сформировать современные представления о частоте и пространственно-временных характеристиках пожаров, восстановлении лесов и обосновать стратегически целесообразные подходы для управления лесными пожарами и минимизации их последствий в условиях глобального потепления.

Список источников

1. Curt C., Curt T. A Review of the Literature on Wildfires in the Context of Climate Change // *Fire*. 2026. Vol. 9 (2). P. 52. DOI: 10.3390/fire9020052
2. Wildfire risk for species under climate change / X. Yang [et al.] // *Nature Climate Change*. 2026. Vol. 16. P. 613–621. DOI: 10.1038/s41558-026-02600-5
3. Wildfire in Australia during 2019–2020, Its Impact on Health, Biodiversity and Environment with Some Proposals for Risk Management: A Review / Md. K. Haque [et al.] // *Journal of Environmental Protection*. 2021. № 12. P. 391–414. DOI: 10.4236/jep.2021.126024
4. Kigomo J.N., Obwoyere G., Kirui B. Influence of wildfires severity on tree composition and structure in Aberdare Afromontane forest ranges, Kenya // *Trees, Forests and People*. 2024. Vol. 18. P. 100695. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100695
5. Ложкина О.В. Природные пожары и глобальное изменение климата: взаимное влияние, динамика, последствия: монография. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025. 183 с.
6. Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С. Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2014. № 2. С. 56–73.
7. Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Технология составления карт растительных горючих материалов (карт РГМ) // *Наука и технологии Сибири*. 2024. № 2 (13). С. 26–30.
8. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2008. № 2 (3). С. 105–114.
9. Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview / B.J. Stocks [et al.] // *For. Chron.* 1989. Vol. 65 (4). P. 258–265. DOI: 10.5558/tfc65258-4
10. Van Wagner C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System: Forestry Technical Report. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. 1987. № 35. 35 p.
11. Stocks B.J., Alexander M.E., Lanoville R.A. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME) // *Can. J. For. Res.* 2004. Vol. 34. № 8. P. 1543–1547. DOI: 10.1139/x04-905
12. Elliott K.G., Flannigan M.D., Tymstra C. Enhanced prediction of extreme fire weather conditions in spring using the Hot-Dry-Windy Index in Alberta, Canada // *International Journal of Wildland Fire*. 2024. Vol. 33. WF24015. DOI: 10.1071/WF24015
13. A Novel CFFBP algorithm with non-interpolation Image Merging for Bistatic Forward-Looking SAR Focusing / Yu. Li [et al.] // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. № 5225916. P. 1–16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3162230
14. Canadian Forest Service Fire Danger Group. The 2025 Update to the FWI System: Structure, Changes and Interpretation. Information Report (GLFC – Sault Ste. Marie), GLC-X-42, 59. Natural Resources Canada. 2025. DOI: 10.4095/st000101
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.O. Pörtner [et al.]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001
16. Wotherspoon A.R., Achim A., Coops N.C. Assessing future climate trends and implications for managed forests across Canadian ecozones // *Canadian Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 54. № 3. P. 278–289. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0058
17. Flannigan M., Van Wagner C.E. Climate change and wildfire in Canada // *Canadian Journal of Forest Research*. 1991. Vol. 21 (1). P. 66–72. DOI: 10.1139/x91-010

18. Implications of changing climate for global wildland fire / M.D. Flannigan [et al.] // *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 5. P. 483. DOI: 10.1071/WF08187
19. Projected Future Changes in Burn Probability in Canada's Forests and Communities Under Different Climate Change Scenarios / C. Mulverhill [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2025. Vol. 51. № 1. P. 2560347. DOI: 10.1080/07038992.2025.2560347
20. Abrupt, climate-induced increase in wildfires in British Columbia since the mid-2000s / M.A. Parisien [et al.] // *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. P. 309. DOI: 10.1038/s43247-023-00977-1
21. Climate-induced fire regime amplification in Alberta, Canada / E. Whitman [et al.] // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. P. 055003. DOI: 10.1088/1748-9326/ac60d6
22. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2024. Vol. 7. P. 316. DOI: 10.1038/s41612-024-00841-9
23. Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // *Earth's Future*. 2019. Vol. 7. P. 2–10. DOI: 10.1029/2018EF001050
24. Ложкина О.В., Орловцев С.В., Савинов А.Г. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере российской федерации и ряда зарубежных стран // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2022. № 4 (64). С. 111–121.
25. Barber Shifting wildfire spread dynamics in Canada: declining spread rates but increasing spread days under more severe fire weather from 2002 to 2024 / Yu. Boulanger [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2026. Vol. 56. P. 1–15. DOI: 10.1139/cjfr-2026-0100
26. Large-scale impacts of the 2023 Canadian wildfires on the Northern Hemisphere atmosphere / I.A. Roşu [et al.] // *NPJ Clean Air Sci.* 2025. Vol. 1. № 22. DOI: 10.1038/s44407-025-00022-9
27. Long-range PM_{2.5} pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires / Q. Zhang [et al.] // *Nature*. 2025. Vol. 645. P. 672–678. DOI: 10.1038/s41586-025-09482-1
28. Chen H., Zhang W., Sheng L. Canadian record-breaking wildfires in 2023 and their impact on US air quality // *Atmospheric Environment*. 2025. Vol. 342. P. 120941. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120941
29. The 2023 wildfires in British Columbia, Canada: impacts, drivers, and transformations to coexist with wildfire / L.D. Daniels [et al.] // *Can. J. For. Res.* 2025. Vol. 55. P. 1–18. DOI: 10.1139/cjfr-2024-0092
30. The 2023 wildfire season in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned, and considerations for the future / Yu. Boulanger [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2025. Vol. P. 1–21. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0298

References

1. Curt C., Curt T. A Review of the Literature on Wildfires in the Context of Climate Change // *Fire*. 2026. Vol. 9 (2). P. 52. DOI: 10.3390/fire9020052
2. Wildfire risk for species under climate change / X. Yang [et al.] // *Nature Climate Change*. 2026. Vol. 16. P. 613–621. DOI: 10.1038/s41558-026-02600-5
3. Wildfire in Australia during 2019–2020, Its Impact on Health, Biodiversity and Environment with Some Proposals for Risk Management: A Review / Md.K. Haque [et al.] // *Journal of Environmental Protection*. 2021. № 12. P. 391–414. DOI: 10.4236/jep.2021.126024
4. Kigomo J.N., Obwoyere G., Kirui B. Influence of wildfires severity on tree composition and structure in Aberdare Afromontane forest ranges, Kenya // *Trees, Forests and People*. 2024. Vol. 18. P. 100695. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100695
5. Lozhkina O.V. Prirodnye pozhary i global'noe izmenenie klimata: vzaimnoe vliyanie, dinamika, posledstviya: monografiya. SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MCHS Rossii, 2025. 183 s.

6. Gusev V.G., Arcybashev E.S. Issledovaniya Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva v oblasti ohrany lesov ot pozharov // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva. 2014. № 2. S. 56–73.
7. Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korec M.A. Tekhnologiya sostavleniya kart rastitel'nyh goryuchih materialov (kart RGM) // Nauka i tekhnologii Sibiri. 2024. № 2 (13). S. 26–30.
8. Grishin A.M. O matematicheskom modelirovanii prirodnyh pozharov i katastrof // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2008. № 2 (3). S. 105–114.
9. Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview / B.J. Stocks [et al.] // For. Chron. 1989. Vol. 65 (4). P. 258–265. DOI: 10.5558/tfc65258-4
10. Van Wagner C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System: Forestry Technical Report. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. 1987. № 35. 35 p.
11. Stocks B.J., Alexander M.E., Lanoville R.A. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME) // Can. J. For. Res. 2004. Vol. 34. № 8. P. 1543–1547. DOI: 10.1139/x04-905
12. Elliott K.G., Flannigan M.D., Tymstra C. Enhanced prediction of extreme fire weather conditions in spring using the Hot-Dry-Windy Index in Alberta, Canada // International Journal of Wildland Fire. 2024. Vol. 33. WF24015. DOI: 10.1071/WF24015
13. A Novel CFFBP algorithm with non-interpolation Image Merging for Bistatic Forward-Looking SAR Focusing / Yu. Li [et al.] // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. № 5225916. P. 1–16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3162230
14. Canadian Forest Service Fire Danger Group. The 2025 Update to the FWI System: Structure, Changes and Interpretation. Information Report (GLFC – Sault Ste. Marie), GLC-X-42, 59. Natural Resources Canada. 2025. DOI: 10.4095/st000101
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.O. Pörtner [et al.]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001
16. Wotherspoon A.R., Achim A., Coops N.C. Assessing future climate trends and implications for managed forests across Canadian ecozones // Canadian Journal of Forest Research. 2024. Vol. 54. № 3. P. 278–289. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0058
17. Flannigan M., Van Wagner C.E. Climate change and wildfire in Canada // Canadian Journal of Forest Research. 1991. Vol. 21 (1). P. 66–72. DOI: 10.1139/x91-010
18. Implications of changing climate for global wildland fire / M.D. Flannigan [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2009. Vol. 18. № 5. P. 483. DOI: 10.1071/WF08187
19. Projected Future Changes in Burn Probability in Canada's Forests and Communities Under Different Climate Change Scenarios / C. Mulverhill [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. 2025. Vol. 51. № 1. P. 2560347. DOI: 10.1080/07038992.2025.2560347
20. Abrupt, climate-induced increase in wildfires in British Columbia since the mid-2000s / M.A. Parisien [et al.] // Communications Earth & Environment. 2023. Vol. 4. P. 309. DOI: 10.1038/s43247-023-00977-1
21. Climate-induced fire regime amplification in Alberta, Canada / E. Whitman [et al.] // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. P. 055003. DOI: 10.1088/1748-9326/ac60d6
22. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // NPJ Clim. Atmos. Sci. 2024. Vol. 7. P. 316. DOI: 10.1038/s41612-024-00841-9
23. Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season / M.C. Kirchmeier-Young [et al.] // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 2–10. DOI: 10.1029/2018EF001050
24. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V., Savinov A.G. Analiz vliyaniya izmeneniya klimata na prirodnye pozhary na primere rossijskoj federacii i ryada zarubezhnyh stran // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 111–121.

25. Barber Shifting wildfire spread dynamics in Canada: declining spread rates but increasing spread days under more severe fire weather from 2002 to 2024 / Yu. Boulanger [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2026. Vol. 56. P. 1–15. DOI: 10.1139/cjfr-2026-0100
26. Large-scale impacts of the 2023 Canadian wildfires on the Northern Hemisphere atmosphere / I.A. Roşu [et al.] // NPJ Clean Air Sci. 2025. Vol. 1. № 22. DOI: 10.1038/s44407-025-00022-9
27. Long-range PM_{2.5} pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires / Q. Zhang [et al.] // Nature. 2025. Vol. 645. P. 672–678. DOI: 10.1038/s41586-025-09482-1
28. Chen H., Zhang W., Sheng L. Canadian record-breaking wildfires in 2023 and their impact on US air quality // Atmospheric Environment. 2025. Vol. 342. P. 120941. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120941
29. The 2023 wildfires in British Columbia, Canada: impacts, drivers, and transformations to coexist with wildfire / L.D. Daniels [et al.] // Can. J. For. Res. 2025. Vol. 55. P. 1–18. DOI: 10.1139/cjfr-2024-0092
30. The 2023 wildfire season in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned, and considerations for the future / Yu. Boulanger [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. 2025. Vol. P. 1–21. DOI: 10.1139/cjfr-2023-0298

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.05.2026; одобрена после рецензирования: 21.05.2026; принята к публикации: 14.06.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.05.2026; approved after review: 21.05.2026; accepted for publication: 14.06.2026

Информация об авторах:

Ложкина Ольга Владимировна, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, кандидат химических наук, профессор, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN-код: 6275-4249

Information about the authors:

Lozhkina Olga V., professor of the department of chemistry and combustion processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, candidate of chemical sciences, professor, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN: 6275-4249