

Научная статья

УДК 614.849

doi: 10.34987/2712-9233.2024.65.93.009

Консервативный прогноз на 2024 год количества ландшафтных лесных пожаров и совокупной площади, пройденной при них огнем, с учетом предысторий термического режима и показателей горимости лесов для Красноярского края

Александр Вадимович Холопцев

Роман Геннадьевич Шубкин

Наталья Юрьевна Проскова

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Автор ответственный за переписку: Наталья Юрьевна Проскова, knd@sibpsa.ru

Аннотация. Представлен консервативный прогноз количества лесных пожаров и площадей, пройденных при них огнем, для территории Красноярского края на пожароопасный сезон 2024 год. Прогноз составлен на основе данных о значениях среднемесячных температур воздуха и месячных сумм атмосферных осадков за период с 1997 по 2023 гг. с использованием метода линейной множественной регрессии. Показано, что сценарии развития событий, составленные на предстоящий год, могут обладать удовлетворительной оправдываемостью и точностью, при условии, что в качестве предикторов соответствующей модели используются выявленные факторы, статистические связи которых с изучаемым процессом в современном периоде значимо усиливаются.

Ключевые слова: ландшафтные лесные пожары, площадь, пройденная огнем, Красноярский край

Для цитирования: Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Проскова Н.Ю. Консервативный прогноз на 2024 год количества ландшафтных лесных пожаров и совокупной площади, пройденной при них огнем, с учетом предысторий термического режима и показателей горимости лесов для Красноярского края // Актуальные проблемы безопасности в техносфере 2024. № 2 (14) С.37-51. URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2024.65.93.009>

Conservative forecast for 2024 of the number of landscape forest fires and the total area covered by them, taking into account the thermal regime prehistory and forest burnability indicators for Krasnoyarsk Krai

Alexander V. Kholoptsev

Roman G. Shubkin

Natalia Yu. Proskova

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

Corresponding author: Nataliya Yu. Proskova, knd@sibpsa.ru

Annotation. A conservative forecast of the number of forest fires and the areas covered by fire for the territory of Krasnoyarsk Krai for the fire season 2024 is presented. The forecast is made on the basis of data on the values of average monthly air temperatures and monthly sums of precipitation for the period from 1997

to 2023 using the method of linear multiple regression. It is shown that the scenarios of the development of events made for the coming year can have satisfactory justifiability and accuracy, provided that the identified factors are used as predictors of the corresponding model, the statistical relations of which with the studied process are significantly strengthened in the present period.

Keywords: landscape forest fires, area covered by fire, Krasnoyarsk Territory

For citation: Kholoptsev A.V., Shubkin R.G., Proskova N.Yu. Conservative forecast for 2024 of the number of landscape forest fires and the total area covered by fire, taking into account the prehistory of the thermal regime and indicators of forest burning for Krasnoyarsk Krai // Actual problems of safety In the technosphere 2024. No. 2 (14). P. 37-51. URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2024.65.93.009>

Количество ландшафтных пожаров (далее КЛП) и площадь участков территории, которая может быть при этом пройденная огнем (ППО), существенно влияют на уровень пожарного риска, которому в соответствующее время будет подвергаться его население и могут расцениваться как показатели ущерба, который может быть нанесен экологии, живой природе и экономике.

Наибольший интерес решение проблемы прогнозирования рассматриваемых параметров представляет для, для которых средние значения КЛП и ППО в XXI веке являлись повышенными. Одним из них является Красноярский край - второй по площади регион России, который по уровню социально-экономического развития превосходит прочие регионы Сибири и располагает уникальными природными ресурсами [1].

Среднее значение КЛП за год для территории Красноярского края, оцененное для периода 2000 – 2022 гг., составило 1341, что меньше, чем аналогичный показатель для территорий Республики Саха (Якутия), Забайкальского края, а также Иркутской области, но больше, чем для всех прочих регионов России. Существенной причиной этого служит значительная лесистость территории Красноярского края, которая составляет 71,02%.

Значения КЛП для Красноярского края в современном периоде изменяются в широких пределах, что подтверждает зависимость этого показателя от времени, построенная по информации [4] и приведенная на рис. 1.

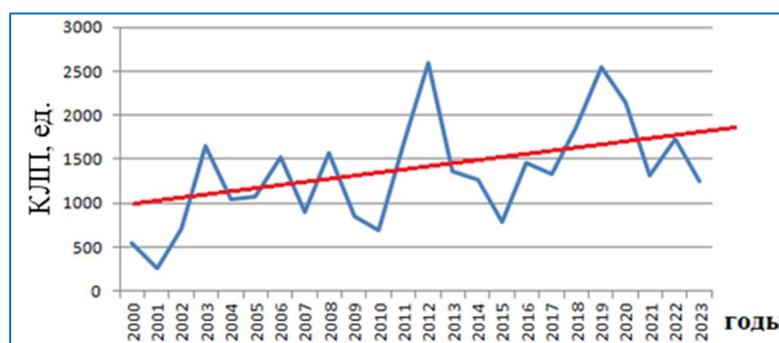


Рис. 1. Зависимость от времени КЛП в Красноярском крае, согласно информации [4]

Как следует из рис. 1, зависимость КЛП на территории Красноярского края от времени представляет собой сложное колебание с периодом преобладающей моды 2 – 4 года, которое наложено на значимый возрастающий тренд. Значение углового коэффициента этого тренда равно $44,4 \text{ год}^{-1}$.

В XXI веке наибольшее значение КЛП на территории Красноярского края (2599) имело место в 2012 году. Значения этого показателя для 2018 – 2022 гг. лежали в пределах от 1257 до 2543 [4].

Среднее значение ППО для Красноярского края за период 2000 – 2023 гг., составило 432815,3 га.

Зависимость ППО для Красноярского края от времени, построенная по информации [4], приведена на рис. 2.

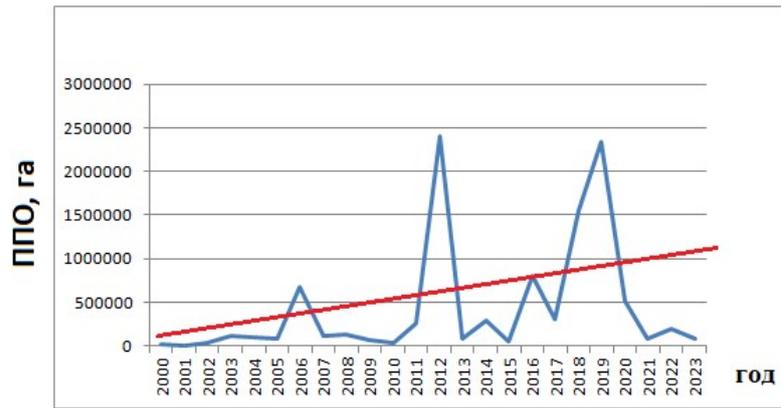


Рис. 2. Зависимость от времени ППО для Красноярского края, согласно информации [4]

Как следует из рис. 2, зависимость ППО для территории Красноярского края от времени в 2000 – 2023 гг. также представляла собой сложное колебание, которое наложено на значимый возрастающий тренд. Значение углового коэффициента этого тренда равно 30900,5 га/год. Наибольшее значение ППО на территории Красноярского края (2406902 га) соответствовало 2012 году. Временные промежутки между годами, в которые значения ППО для Красноярского края являлись повышенными, составляли 6 – 7 лет. За последние 3 года значения ППО на его территории не превышали средний уровень.

Основными причинами наличия тенденции к увеличению КЛП и ППО для Красноярского края в 2000 – 2023 гг. явилось усиление антропогенной нагрузки на его лесные массивы (в том числе увеличение масштабов законной и незаконной вырубki [5]), а также потепление регионального и глобального климата [6-8].

Межгодовые изменения КЛП и ППО на территории Красноярского края обусловлены действием многочисленных антропогенных и природных факторов, многие из которых не являются наблюдаемыми [9-17]. Вследствие этого их целесообразно рассматривать, как случайный процесс.

Согласно существующим представлениям о моделировании случайных процессов [18], одним из наиболее универсальных методов, применимых для его осуществления, является метод линейной множественной регрессии [19].

Упомянутый метод применим и при прогнозировании стационарного случайного процесса, для сценария, при котором его статистические свойства в будущем не изменятся, если предикторы модели (1) опережают его по времени. В этом случае прогноз изучаемого процесса y_k (называемый консервативным), может быть сформирован в результате оценки Y_k , которая описывается уравнением:

$$Y_k = C_0 + C_1 * X_{1, k-1} + C_2 * X_{2, k-1} + C_3 * X_{3, k-1} + \dots + C_N * X_{N, k-1}, \quad (1)$$

Рассматриваемый метод применим для прогнозирования и реальных природных процессов, которые рассматриваются как случайные, при условии, что отличия их свойств от свойств стационарных процессов являются малыми [20]. Поэтому допустимо предположить, что консервативные прогнозы КЛП и ППО для Красноярского края на предстоящий год, обладающие удовлетворительной оправдываемостью, могут быть разработаны с его помощью.

Установлено, что к числу необходимых условий возникновения на некоторой территории ландшафтного пожара [9 – 14] относятся наличие на ней достаточного количества горючего материала [16, 17, 21], а также засушливость ее термического режима, благоприятствующая удалению из него влаги [17, 22 - 24].

Так как при ландшафтных пожарах, произошедших на этой территории в предыдущие годы, накопившийся на ней горючий материал частично выгорает, некоторое влияние на межгодовые изменения КЛП может оказывать их предыстория, а также вариации площади ее участков, пройденных огнем (далее ППО) в прошедшие годы.

Одним из показателей термического режима территории, характеризующим его засушливость, являются средние температуры воздуха в приземном слое атмосферы для месяцев пожароопасного сезона и в целом за этот сезон [22, 25]. Межгодовые изменения упомянутых температур оказывают значимое влияние на синхронные с ними вариации КЛП и ППО. Учитывая присутствие в этих изменениях квазидвухлетней моды, понятно, что их предыстория также способна оказывать какое-то

влияние на межгодовые изменения КЛП [20], а также ППО, которые не только совпадают с ними по времени, но и запаздывают на 1 – 2 года.

Изложенное позволяет предположить, что при использовании в качестве предикторов модели (1) упомянутых факторов, метод множественной регрессии позволяет разработать прогнозы КЛП и ППО для Красноярского края на предстоящий год, которые могут иметь удовлетворительную оправдываемость.

Как фактический материал об изменениях КЛП и ППО на территории Красноярского края использованы сведения из Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства Лесного хозяйства [4], которые охватывают период с 2000 г. по 2023 г.

В качестве фактического материала, отражающего изменения среднечасовых температур воздуха и часовых сумм атмосферных осадков на территории Красноярского края в период с 1997 по 2023 гг., использована соответствующая информация реанализа ERA-5 [26].

Методика решения первой задачи предполагала осуществление поиска факторов, связи которых с изучаемым процессом с течением времени усиливаются, среди элементов их исходного множества, включающего межгодовые изменения:

а) средних по территории Красноярского края среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы для месяцев апрель – октябрь и среднесезонных температур всего пожароопасного сезона, опережающих изучаемый процесс на 1 - 2 года и месячных сумм атмосферных осадков (далее МСО) для любых месяцев.

б) КЛП и ППО для Красноярского края, опережающих изучаемый процесс на такое же время.

Временные ряды среднемесячных и среднесезонных температур получены в результате усреднения соответствующих сведений о среднечасовых температурах воздуха над всеми пунктами территории Красноярского края, которые соответствуют всем узлам координатной сетки реанализа ERA-5, расположенным в пределах ее административных границ.

Как характеристика связей каждого из рассматриваемых факторов с изучаемым процессом рассматривалось значение коэффициента их парной корреляции, которое вычислялось в скользящем окне длиной 14 лет.

Выявлялись факторы, для которых линейный тренд изменений значений этого коэффициента был признан значимым. Подобный статистический вывод делался, если вероятность его справедливости составляла не менее 0,95.

Принималось допущение о том, что отклонения значений коэффициента корреляции от их линейного тренда, подчиняются нормальному закону распределения. Учитывая это, для оценки искомой вероятности проверялось выполнимость условия:

$$10|УКЛТ| > 1,65СКО,$$

где УКЛТ – угловой коэффициент линейного тренда временного ряда, отражающего зависимость коэффициента корреляции сопоставляемых процессов от года начала скользящего «окна» длиной 14 лет, для которого он вычислен;

СКО – среднеквадратическое отклонение значений этого коэффициента от упомянутого линейного тренда.

При решении второй задачи, как показатель оправдываемости прогноза, рассматривалась частота, с которой изменение прогнозируемых значений КЛП и ППО для Красноярского края, происходило в том же направлении по отношению к значениям КЛП и ППО для предыдущего года, что и фактическое изменения этих показателей. Учитывая общее количество рассматриваемых «окон», всего таких прогнозов сформировано 10.

При разработке каждого прогноза, для рассматриваемого «окна» осуществлена верификация модели (1), предикторами которой являются факторы, выявленные при решении задачи 1. При этом использована программа Multiply Regression в режиме All effects, из пакета Statistika.

Результаты исследования и их анализ по показателю КЛП

При решении первой задачи среди элементов указанного выше исходного множества факторов изучаемого процесса осуществлен поиск тех, связи которых с ним в современном периоде значимо

усиливаются. В результате поиска установлено, что искомыми факторами являются межгодовые изменения:

- среднемесячных температур воздуха над всей территорией Красноярского края (СТВ) для месяцев июнь, июль, октябрь, опережающие изучаемый процесс на 1 год;
- СТВ для июля, опережающих изучаемый процесс на 2 года;
- средних СТВ за все месяцы пожароопасного сезона, опережающих изучаемый процесс на 1 год;
- КЛП и ППО, опережающие изучаемый процесс на 1 год.

Зависимости значений коэффициентов корреляции изучаемого процесса, а также перечисленных факторов от года начала скользящего «окна» показаны на рис. 3.

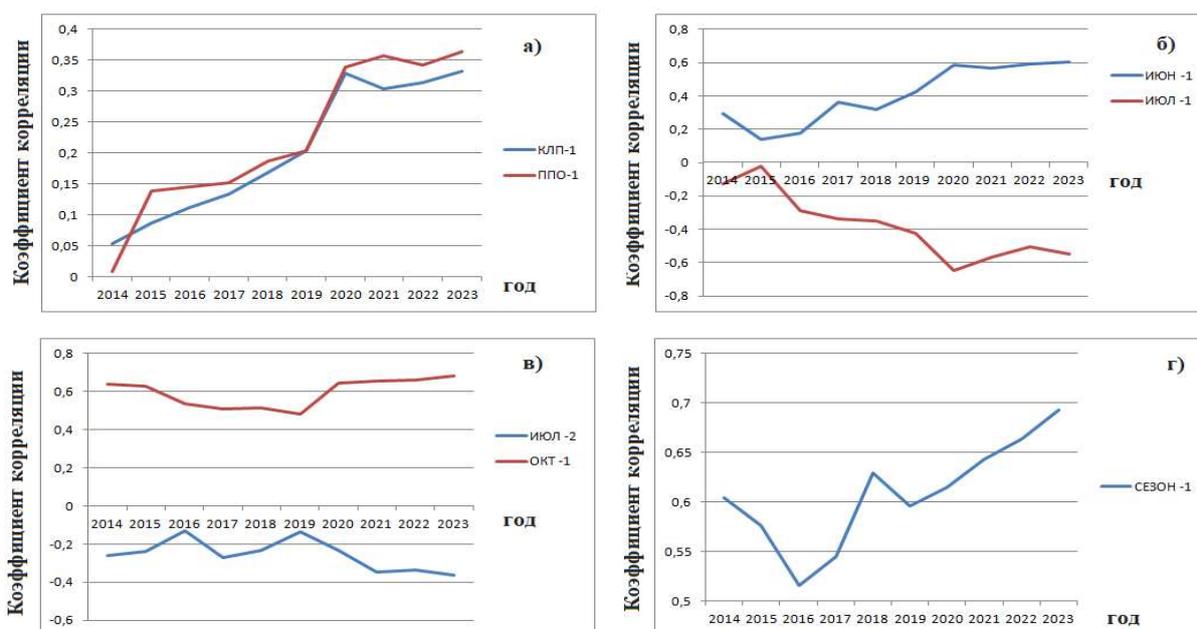


Рис. 3. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 14 лет вычисленных для него значений коэффициента корреляции фактических изменений КЛП для Красноярского края и их факторов: а) КЛП и ППО для предыдущего года; б) СТВ для июня и июля предыдущего года; в) СТВ для октября предыдущего и июля предпредыдущего года; г) средних СТВ за пожароопасный сезон предыдущего года

Из рис. 3 видно, что для всех выявленных факторов в период 2000 – 2023 гг. было характерно усиление их статистических связей с изучаемым процессом, хотя законы, по которым с течением времени изменялись значения коэффициента их корреляции с изучаемым процессом, для разных факторов различны. Последнее свидетельствует о том, что усиление выявленных связей в ближайшие годы, вполне вероятно.

При решении задачи 2 осуществлена верификация моделей и построены зависимости от времени фактических значений КЛП и их прогнозов, для всех рассматриваемых окон.

На рис. 4 отображены фактические изменения изучаемого показателя (ФАКТ), и результаты их прогнозирования (МОДЕЛЬ), соответствующие тому или иному «окну», охватывающему период времени длиной 14 лет.

Учитывая то, что прогнозы КЛП, получены путем смещения на 1 год в будущее временных рядов предикторов, использованных при верификации соответствующей модели (1), отображенные на рис 4а - 4к результаты прогнозов для 1 – 13 года каждого «окна» фактически являются результатами моделирования.

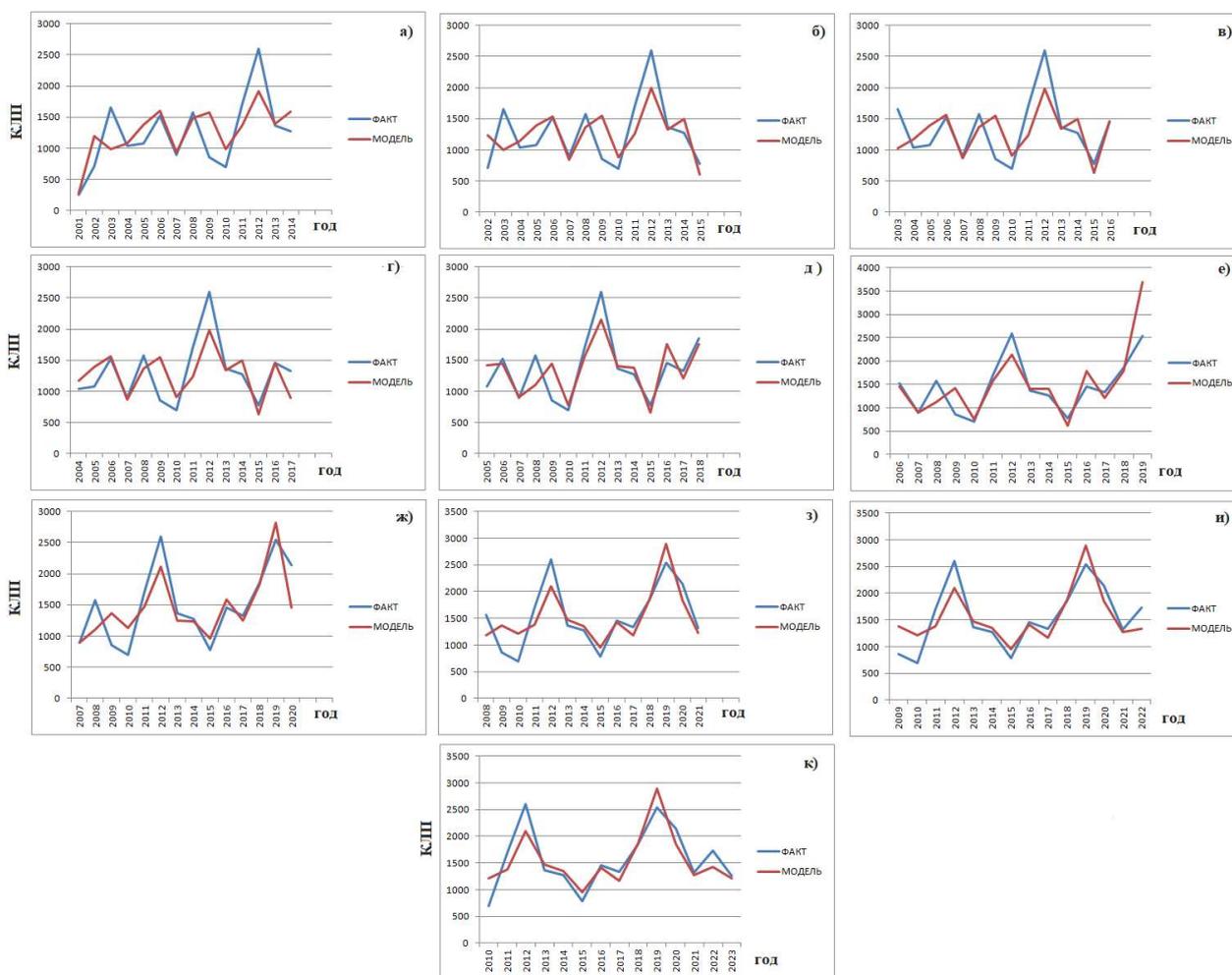


Рис. 4. Зависимости от времени фактических значений КЛП и их прогнозов, построенные для «окон»: а) 2001 – 2014 гг.; б) 2002 – 2015 гг.; в) 2003 – 2016 гг.; г) 2004 – 2017 гг.; д) 2005 – 2018 гг.; е) 2006 – 2019 гг.; ж) 2007 – 2020 гг.; з) 2008 – 2021 гг.; и) 2009 – 2022 гг.; к) 2010 – 2023 гг.

Прогнозом, который получен для некоторого «окна» с применением коэффициентов модели (1), вычисленных при ее верификации, а также новых значений ее предикторов, являются отображенные на рис 4а – 4к результаты, соответствующие лишь 14 году.

Из рис. 4а-к видно, что для всех «окон», кроме первого (соответствующего периоду 2001 – 2014 гг.) прогнозируемые изменения КЛП (для 14 года) происходили в том же направлении, что и фактические их изменения. Следовательно, оправдываемость полученных прогнозов тенденции изменений КЛП составляет 90%.

Из рис. 4 понятно также, что прогнозируемые значения КЛП, для всех «окон», кроме окна, соответствующего периоду 2006 – 2019 гг., несколько меньше фактических значений КЛП, и при этом не слишком отличаются от них. Лишь для указанного окна они существенно превышают фактические значения прогнозируемого показателя.

Среднее значение отклонений прогнозов КЛП от фактического значения КЛП, которое определено с учетом всех 10 «окон», составляет всего 3% от среднего значения этого показателя, вычисленного за период 2001 – 2023 гг.

Среднеквадратическое отклонение рассматриваемых прогнозов КЛП равно 2,187% от того же среднего значения КЛП.

Если принять допущение о том, что отклонения прогнозов КЛП от их фактических значений подчиняются нормальному закону, то полуширина интервала, в пределах которого (при рассматриваемом сценарии будущего) могут с вероятностью 0,999 укладываться их отклонения, составит 6,5% от среднего значения КЛП.

Представленные оценки свидетельствуют о том, что в период 2001 – 2023 гг. прогнозы значений КЛП, разработанные по изложенной методике, были довольно точны. Последнее позволяет

предположить, что если в 2024 году естественный ход рассматриваемых событий не будет радикально нарушен, то оправдываемость и точность прогнозов КЛП, разработанных на этот год по той же методике, сохранятся столь же высокими.

Соответствующие каждому из рассматриваемых «окон» значения коэффициентов и предикторы моделей (2), с использованием которых разработаны прогнозы КЛП, представленные рис. 4, приведены в табл. 1, где предикторы, обозначенные как «СТВ, июнь, -1 год» соответствуют межгодовым изменениям СТВ июня, опережающим прогнозируемый процесс по времени на 1 год.

Как следует из табл. 1, значения коэффициентов моделей (1), соответствующих тем или иным рассматриваемым «окнам», существенно различаются. Последнее свидетельствует о том, что стационарным изучаемый процесс не является, а сценарий будущего, который фактически осуществится, может быть лишь в какой-то мере близок к «консервативному».

Тем не менее, представленная оценка оправдываемости прогнозов КЛП, разработанных для этого сценария, вполне оптимистична, а их вероятная точность вполне достаточна для практики. Следовательно, особенности этих прогнозов представляют интерес.

Наиболее существенными среди этих особенностей являются зависимости от времени отклонений от фактических значений КЛП их прогнозов, разработанных с применением изложенной методики, а также суммарных вкладов результатов моделирования изучаемых процессов в их среднюю мощность.

Таблица 1. Коэффициенты и предикторы моделей (2), описывающих изменения КЛП на территории Красноярского края в том или ином периоде времени («окне»)

		Сп				
n	Предиктор\ Период	2001-2014гг.	2002-2015гг.	2003-2016гг.	2004-2017гг.	2005-2018гг.
0	Свободный член	-144758	-148846	-148629	-148727	-115712
1	СТВ, июнь, -1 год	127,989	160,440	153,886	152,986	295,598
2	СТВ, июль, -1 год	5,0513	-21,4334	-6,5129	-8,4129	-85,8367
3	СТВ октябрь, -1 год	238,499	238,302	232,084	230,184	194,187
4	СТВ, сезон, -1 год	65,478	85,089	88,982	83,821	-24,993
5	СТВ, июль, -2 года	86,769	75,726	68,316	68,316	44,307
6	ППО, -1 год	0,000313	0,00024	0,000176	0,000167	0,000666
7	КЛП, -1 год	-0,25019	-0,2025	-0,13839	-0,15853	-0,86001
n	Предиктор\ Период	2006-2019гг.	2007-2020гг.	2008-2021гг.	2009-2022гг.	2010-2023гг.
0	Свободный член	-115712	-126327	-30591,4	-23713,9	-19866,3
1	СТВ, июнь, -1 год	295,598	310,439	201,328	144,496	138,114
2	СТВ, июль, -1 год	-85,8367	-85,3288	-160,695	-177,816	-189,851
3	СТВ октябрь, -1 год	194,187	205,628	86,976	92,780	88,973
4	СТВ, сезон, -1 год	-24,993	-22,153	64,363	119,497	127,829
5	СТВ, июль, -2 года	44,307	52,624	-70,876	-81,897	-81,667
6	ППО, -1 год	0,000666	0,000735	0,000166	0,00016	0,000134
7	КЛП, -1 год	-0,860	-0,954	-0,520	-0,354	-0,316

Упомянутые зависимости от времени представлены на рис. 5. Как следует из рис. 5а, зависимость от времени отклонений разработанных прогнозов КЛП для Красноярского края от их фактических значений, действительно позволяет рассматривать этот процесс как случайный. Значимого тренда в изменениях этих отклонений не выявлено.

Рисунок 5б свидетельствует о том, что для рассматриваемых «окон» вклады результатов моделирования изучаемого процесса в его среднюю мощность составляют не меньше 44% и, по мере увеличения года начала этих окон, значительно возрастают до 81%.



Рис. 5. Зависимости от времени завершения «окна» характеристик, разработанных для него прогнозов КЛП на территории Красноярского края, разработанных с применением изложенной методики: а) отклонений прогнозов КЛП от их фактических значений; б) вкладов результатов моделирования изменений КЛП в фактическую среднюю мощность изучаемых процессов

В среднем по всем «окнам» относительные вклады этих результатов равны 65%.

Выявленная тенденция свидетельствует о том, что на отрезке времени 2011 – 2024 гг. релевантность результатов моделирования изменений КЛП их фактическим изменениям с немалой вероятностью сохранится высокой, а возможно еще более увеличится. Последнее свидетельствует о том, что прогноз КЛП на 2024 год, который может быть разработан с применением описанной методики, действительно заслуживает внимания.

В результате решения третьей задачи изучаемый прогноз разработан.

При верификации модели (1) использован отрезок временного ряда КЛП, соответствующий периоду 2010 – 2023 гг.

Предикторы указанной модели, а также вычисленные значения ее коэффициентов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты и предикторы модели (2), описывающей изменения КЛП на территории Красноярского края в период 2011 – 2024 гг.

n	Предиктор	C_n	Период времени	n	предиктор	C_n	Период времени
0	Свободный член	-70763,2	2009-2022 гг.	4	СТВ, сезон	-25,5351	2009-2022гг
1	СТВ, июнь	172,1678	2009-2022 гг.	5	СТВ, июль	-4,4211	2008-2021гг
2	СТВ, июль	-43,0269	2009-2022 гг.	6	ППО	5,8E-05	2009-2022гг
3	СТВ октябрь	162,6393	2009-2022 гг.	7	КЛП	0,051997	2009-2022гг

Зависимости от времени фактических значений КЛП на территории Красноярского края для периода 2011 – 2023 г., а также их прогнозов на 2011 – 2024 г. представлены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что прогнозируемое значение КЛП для Красноярского края на 2024 год (которое составляет 1445) несколько меньше, чем фактическое значение этого показателя для 2023 года.

Последнее, а также вычисленное ранее значение полуширины интервала, к которому с вероятностью 0,999 может принадлежать отклонение прогноза КЛП от его фактического значения, позволяет определить нижнюю и верхнюю границы диапазона, к которому может принадлежать фактическое значение прогнозируемого показателя. Их значения соответственно равны 1351 и 1539.

Напомним, что к указанному интервалу с вероятностью 0,999 может относиться значение КЛП для Красноярского края, соответствующее 2024 году, при условии, что сценарий, по которому будут изменяться пожароопасность на рассматриваемой территории, а также характеристики факторов, вызывающих возгорания, окажется консервативным.

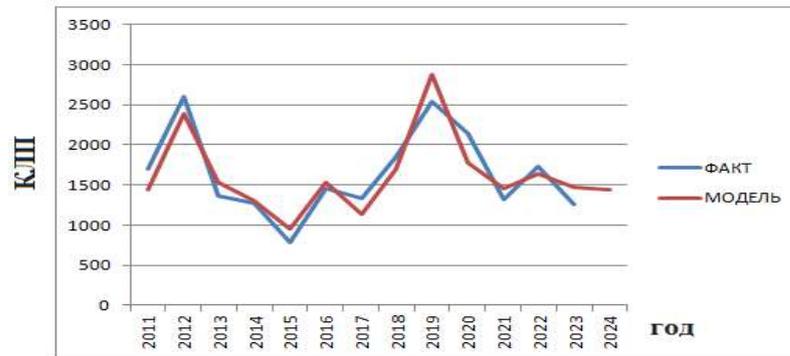


Рис. 6. Зависимости от времени фактических значений КЛП на территории Красноярского края для периода 2011 – 2023 г. (ФАКТ), а также их прогнозов на 2011 - 2024 г. (МОДЕЛЬ)

Каким в действительности окажется этот сценарий, неизвестно, тем не менее, как показал проведенный анализ, предложенный прогноз оправдывается в 90% случаев, и потому его учет (как ориентир) при планировании деятельности противопожарных служб региона, может быть рекомендован.

Результаты исследования по показателю ППО

При решении первой задачи сформированы рассматриваемые временные ряды ППО, а также СТВ и МСО для Красноярского края, из которых образованы все 10 изучаемых «окон». Как пример, на рис. 7 приведены зависимости от времени значений СТВ и МСО, соответствующих всей территории Красноярского края, соответствующих некоторым месяцам.

Как следует из рис. 7, рассматриваемые зависимости представляют собой сложные колебания, в спектрах которых присутствует квазидвухлетняя мода. В изменениях СТВ для ноября, а также МСО для февраля присутствуют значимые возрастающие тренды.

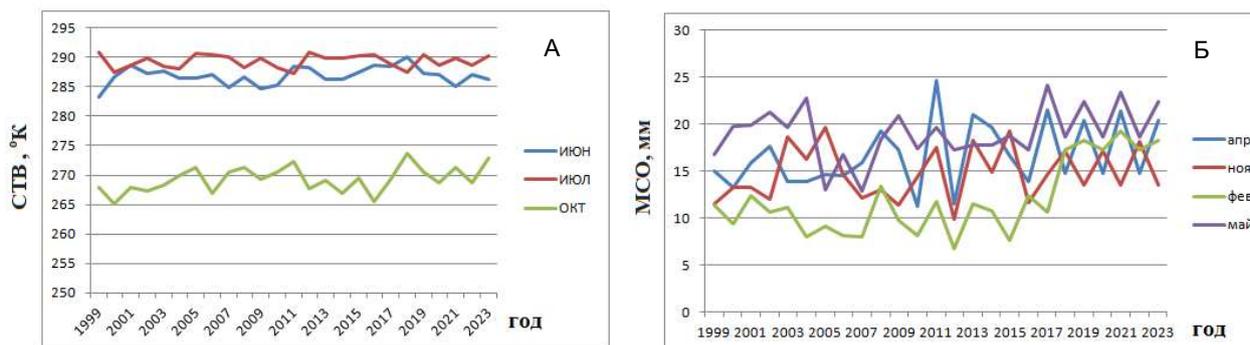


Рис. 7. Примеры зависимости от времени средних по территории Красноярского края значений: А) СТВ; Б) МСО

Аналогичные тренды выявлены и для прочих зимних месяцев. Для прочих месяцев тренды рассматриваемых процессов незначимы.

При осуществлении корреляционного анализа связей между сопоставляемыми отрезками временных рядов ППО, а также СТВ и МСО, присутствующие в них тренды скомпенсированы.

Из временных рядов СТВ и МСО, соответствующих различным месяцам образовано исходное множество возможных факторов изучаемого процесса. Среди элементов этого множества осуществлен поиск тех, связи которых с ним в период 2000 – 2023 гг. значимо усиливались. В результате поиска установлено, что искомыми факторами являются опережающие изучаемый процесс на 1 год межгодовые изменения:

- СТВ для всей территории Красноярского края, соответствующие месяцам июнь, июль и октябрь;
- МСО для всей территории Красноярского края, соответствующие февралю, апрелю, маю и ноябрю.

Зависимости значений коэффициентов корреляции изучаемого процесса, а также перечисленных факторов от года начала скользящего «окна» показаны на рис. 8.

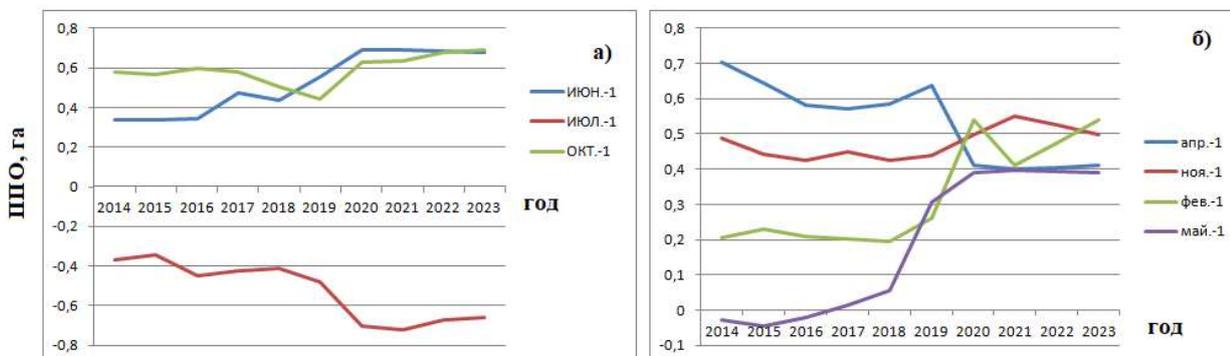


Рис. 8. Зависимости значений коэффициентов корреляции изучаемого процесса, а также перечисленных факторов от года начала соответствующего «окна»

Из рис. 8 видно, что значения коэффициентов корреляции изучаемого процесса, а также перечисленных факторов существенно зависят от года начала «окна», для которого они вычислены.

За период 2000-2023 гг. значительно усилились статистические связи изучаемого процесса со всеми выявленными факторами, кроме изменений МСО для апреля. Для последних имело место существенное ослабление их связей.

Тем не менее, учитывая высокий уровень корреляции отрезков временных рядов указанного фактора с соответствующими отрезками рядов ППО, завершающимися в 2014 - 2019 гг., было признано целесообразным сохранить соответствующий предиктор в модели (2).

Характер рассматриваемых зависимостей свидетельствует о том, что усиление выявленных связей в ближайшие годы, вполне вероятно. Тем не менее, очевидно, что в дальнейшем тенденции изменений силы рассматриваемых связей рано или поздно переменятся, так как значения коэффициента корреляции не могут превышать 1. Поэтому поиск факторов, которые целесообразно использовать при разработке рассматриваемых прогнозов, необходимо ежегодно повторять с использованием вновь полученных данных.

При решении задачи 2 осуществлена верификация моделей межгодовых изменений ППО, соответствующих всем рассматриваемым «окнам». При этом для каждого «окна» оценен суммарный вклад Θ выявленных предикторов модели (2) в среднюю мощность изучаемого процесса.

Зависимости этого показателя от времени представлены на рис. 9.



Рис. 9. Зависимости суммарного вклада выявленных предикторов модели (2) в среднюю мощность межгодовых изменений ППО, вычисленную для того или иного «окна», от года его завершения

Из рис. 9 следует, что в изменениях за период 2014 - 2023 гг. суммарного вклада выявленных предикторов модели (2) в среднюю мощность межгодовых изменений ППО, вычисленную для того или иного «окна», преобладает тенденция к его увеличению. Значения этого показателя изменялись в пределах от 0,694 до 0,921. Следовательно, влияние выявленных факторов на межгодовые изменения ППО для Красноярского края, действительно являлось существенным и в современном периоде близко к максимальному уровню.

Для оценки оправдываемости прогнозов ППО, разработанных с учетом выявленных предикторов, на рис. 10 представлены зависимости от времени фактических значений ППО (ФАКТ), результатов их моделирования (МОДЕЛЬ), а также их прогнозы, которые разработаны для всех рассматриваемых «окон» (которым соответствует часть графика МОДЕЛЬ, расположенная справа от зеленой линии).

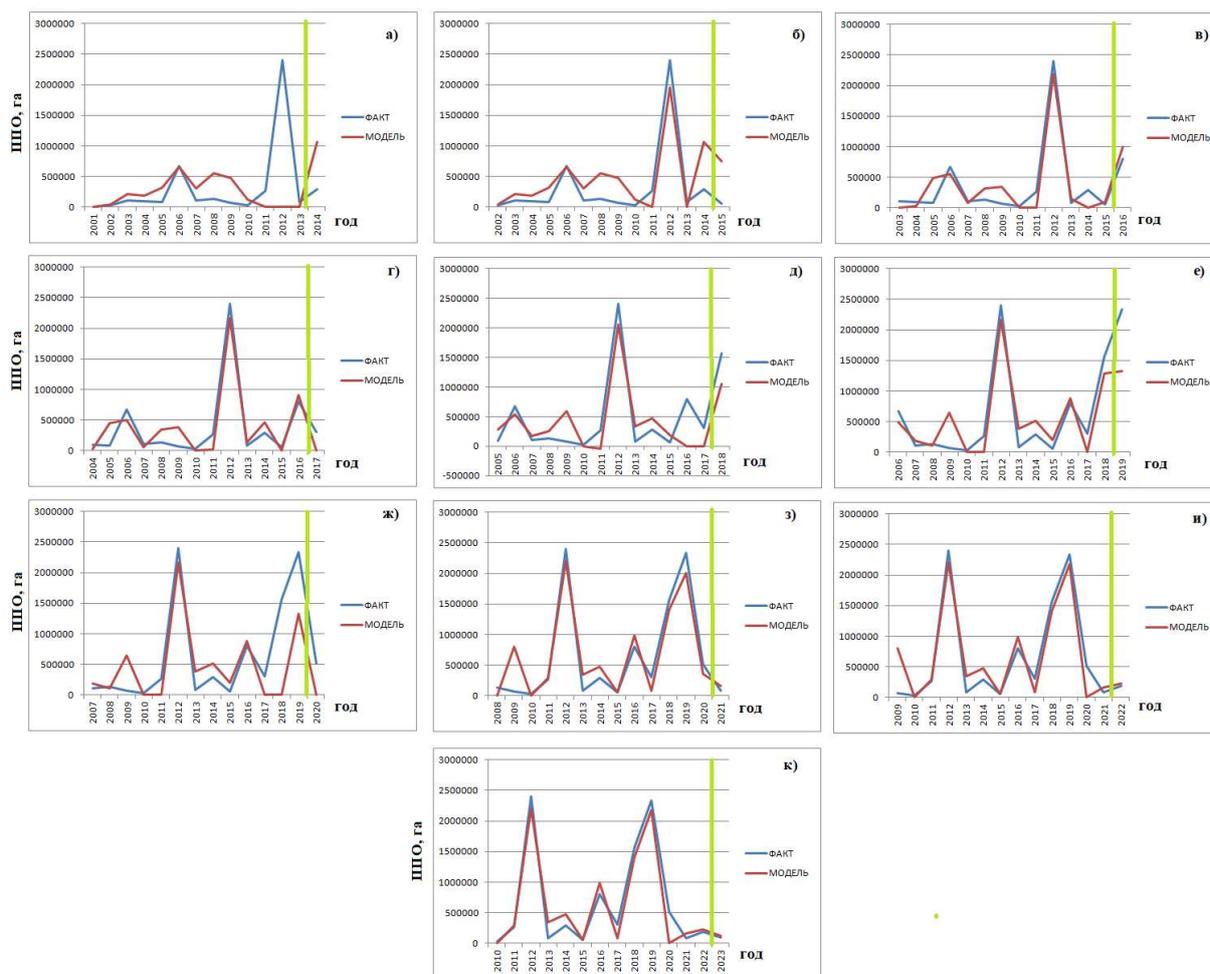


Рис. 10. Зависимости от времени фактических значений ППО, результатов их моделирования, а также прогнозы на предстоящий год, построенные для «окон»: а) 2001-2014гг.; б) 2002-2015гг.; в) 2003-2016гг.; г) 2004-2017гг.; д) 2005-2018гг.; е) 2006-2019гг.; ж) 2007-2020гг.; з) 2008-2021гг.; и) 2009-2022гг.; к) 2010-2023гг.

Из рис. 10а-к видно, что для всех «окон», прогнозируемые изменения ППО происходили в том же направлении, что и фактические их изменения. Следовательно, «окон», для которых прогноз на предстоящий год изучаемого показателя, разработанный с учетом выявленных предикторов, не оправдался, не выявлено (прогноз оправдался в 10 случаях из 10).

Как показали расчеты, среднее значение отклонений прогнозов ППО от фактического значения этого показателя, которое определено с учетом всех 10 «окон», составляет всего 36,65% от среднего значения этого показателя.

Среднеквадратическое отклонение рассматриваемых прогнозов ППО равно 120,80% от того же среднего значения ППО.

С учетом принятого допущения о нормальности закона распределения отклонений прогнозов ППО от фактических значений этих показателей, полуширина интервала λ , в пределах которого (при

рассматриваемом сценарии будущего) могут с вероятностью 0,999 укладываться их отклонения, составит 362% от его среднего значения.

Полученный результат свидетельствует о том, что для практики столь неточные прогнозы значений ППО, в отличие от прогнозов тенденции их изменений, интереса не представляют.

Соответствующие каждому из рассматриваемых «окон» значения коэффициентов моделей (2) и ее предикторы, с использованием которых разработаны прогнозы ППО, представленные рис. 10, приведены в табл. 3 (предикторы, обозначенные как «СТВ, июнь, -1 год» соответствуют межгодовым изменениям СТВ июня, опережающим прогнозируемый процесс по времени на 1 год).

Как следует из табл. 3, значения коэффициентов моделей (2), соответствующих тем или иным рассматриваемым «окнам», существенно различаются. Последнее свидетельствует о том, что стационарным процессом межгодовые изменения ППО можно считать лишь в нулевом приближении, а сценарий будущего, который фактически осуществится, может быть лишь в какой-то мере близок к «консервативному».

Таблица 3. Коэффициенты и предикторы моделей (2), описывающих изменения ППО на территории Красноярского края в том или ином периоде времени («окне»)

n	Предиктор\ Период	Cn				
		2001-2014гг.	2002-2015гг.	2003-2016гг.	2004-2017гг.	2005-2018гг.
0	Свободный член	10885824	-22385982	-64168466	-52244395	-72035188
1	СТВ, июнь, -1 год	53991	214362	236386	229310	294014
2	СТВ, июль, -1 год	-109440	-211592	-139176	-164122	-137237
3	СТВ октябрь, -1 год	16787	84354	137119	127834	104307
4	МСО, апрель, -1 год	154965	139020	129709	126827	95699
5	МСО, ноябрь, -2 года	54980	28015	27686	20842	7612
6	МСО, февраль, -1 год	-131462	-212028	-201350	-189569	-106876
7	МСО, май, -1 год	-45054	-45491	-26765	-35099	-48980
n	Предиктор\ Период	2006-2019гг.	2007-2020гг.	2008-2021гг.	2009-2022гг.	2010-2023гг.
0	Свободный член	-8,6E+07	-8E+07	-7,6E+07	-7,6E+07	-7,1E+07
1	СТВ, июнь, -1 год	317217	324384	318039	328431	323139
2	СТВ, июль, -1 год	-118892	-171189	-173125	-146137	-219266
3	СТВ октябрь, -1 год	109796	134104	129003	143017	154694
4	МСО, апрель, -1 год	94805	36987	37720	43752	60595
5	МСО, ноябрь, -2 года	11230	38739	30346	32371	-14630
6	МСО, февраль, -1 год	-100997	-56963	-48456	-41465	-49577
7	МСО, май, -1 год	-230347	17090	27483	24782	27605

Справедливость такого вывода подтверждает и зависимость ошибок разработанных прогнозов от года, которому они соответствуют, которая показана на рис. 11.

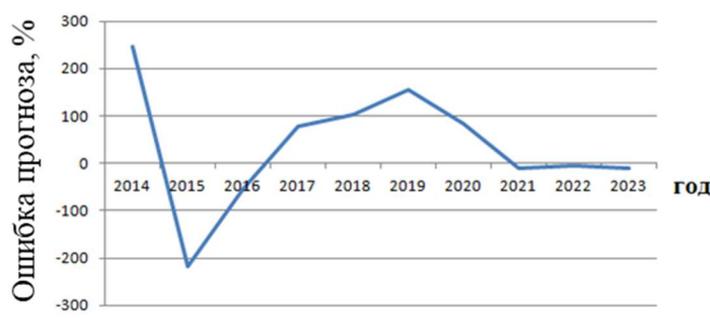


Рис. 11. Зависимости ошибок разработанных прогнозов от года, которому они соответствуют

Как следует из рис. 11, зависимость ошибок разработанных прогнозов от времени носит характер колебания, амплитуда которого с течением времени уменьшается. Из этого следует, что если бы сценарий дальнейших изменений ППО был консервативным, то разработанные прогнозы ППО становились бы с течением времени все более точными.

Сценарий дальнейших изменений факторов, определяющих динамику ППО, который в действительности осуществится, не определен.

Следовательно, из того, что разработанный консервативный прогноз тенденции дальнейших изменений ППО на предстоящий год в период времени 2014-2023 гг. обладал высокой оправдываемостью, отнюдь не следует, что он гарантировано оправдается и в 2024 году. Тем не менее, вероятность такого результата несомненно выше, чем вероятность того, что он не оправдается.

Таким образом, выдвинутая гипотеза подтверждена, а прогноз ППО для Красноярского края на 2024 год представляет практический интерес. Такой прогноз разработан с применением той же методики. При верификации модели (2) использован отрезок временного ряда ППО для Красноярского края, соответствующий периоду 2010 - 2023 гг., а также временные ряды выявленных ее предикторов за 2009 - 2022г. В результате верификации этой модели определены значения ее коэффициентов, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты и предикторы модели (2), описывающей изменения ППО на территории Красноярского края в период 2011-2023 гг. и прогноз на 2024 год

n	предиктор	C _n	Период времени	n	предиктор	C _n	Период времени
0	Свободный член	-71141985		4	МСО, апрель, -1 год	60595	2009-2022гг
1	СТВ, июнь	323139	2009-2022гг	5	МСО, ноябрь, -2 года	-14630	2008-2021гг
2	СТВ, июль	-219266	2009-2022гг	6	МСО, февраль, -1 год	-49577	2009-2022гг
3	СТВ октябрь	154694	2009-2022гг	7	МСО, май, -1 год	27605	2009-2022гг

Для вычисления прогноза ППО на 2024 г. в верифицированную модель подставлены значения всех ее предикторов, соответствующие 2023 году.

На рис. 12 представлены фактические изменения ППО для Красноярского края (ФАКТ) и результаты их моделирования (МОДЕЛЬ) для периода 2011-2023 гг., а также консервативный прогноз ППО на 2024 год (справа от зеленой линии).

Из рис. 12 следует, что результаты моделирования изменений ППО для Красноярского края в 2011-2023 гг. с высокой точностью описывали фактические изменения этой характеристики.

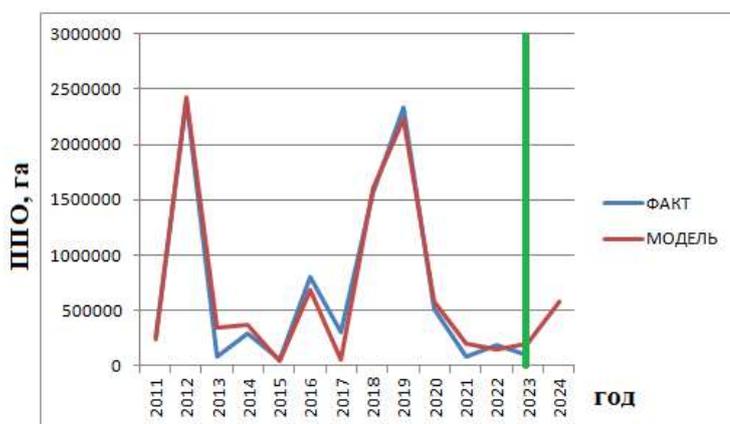


Рис. 12. Зависимость от времени фактических значений ППО на территории Красноярского края (ФАКТ) и результатов ее моделирования для периода 2011-2023г. (МОДЕЛЬ), а также прогноз ППО на 2024 г.

Прогнозируемое значение ППО на 2024 год (которое составляет 501443) несколько больше, чем фактическое значение этого показателя для 2023 года и выше среднего уровня этого показателя за 2000-2023гг., хотя и значительно ниже его рекордных значений. Следует отметить, что выявленная

статистическая закономерность удовлетворительно соответствует существующим представлениям о возможном характере дальнейшего хода изучаемого процесса [15, 17].

В соответствии с этими представлениями, значения ППО для некоторого года на любой лесопокрытой территории определяются такими природными факторами, как сохранившиеся к его началу запасы на ней горючего материала, а также засушливость в этом году ее метеоусловий.

Как было показано на рис. 8, в 2021-2023 гг. значения ППО для Красноярского края были пониженными, вследствие чего на территориях лесных массивов накопилось значительное количество горючего материала. Происходило здесь и потепление регионального климата, которое вызвало не только увеличение интенсивности испарения влаги с территории Красноярского края, но и повышение повторяемости над нею гроз.

Следует отметить, что высокой оправдываемостью разработанный прогноз на 2024 год будет обладать лишь при условии, что осуществится консервативный сценарий (который один из вероятных, но не единственный). Поэтому такой прогноз целесообразно использовать для определения необходимых ресурсов, которые могут потребоваться для ликвидации вероятных ландшафтных пожаров.

Каким в действительности окажется этот сценарий, неизвестно, тем не менее, как показал проведенный анализ, случаев, когда предложенный прогноз не оправдывается в XXI веке не выявлено. Поэтому его учет (как ориентир) при планировании деятельности противопожарных служб региона, может быть рекомендован.

Список использованных источников

1. Шапарев Н.Я. Природные ресурсы Красноярского края. // Вестник Российской Академии наук. 2007. Том 77. №4. С. 291 – 300.
2. Соколов В.А., Витюрин О.П., Соколова Н.В. Лесные ресурсы Красноярского края: перспективы и ограничения использования. // Сибирский лесной журнал. – 2021. – №4. – С.24 – 33.
3. Страхов В.В., Писаренко А.И., Борисов В.А. Леса мира и России // Бюллетень Министерства природных ресурсов РФ «Использование и охрана природных ресурсов России». – М., 2001. – № 9. – С. 49 – 63.
4. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: Федеральное агентство лесного хозяйства: сайт. – URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения 22.03.2024).
5. Кабанец А.Г., Чувасов Е.В., Сычиков А.В., Милаковский Б.Д. Практика рубок ухода и санитарных рубок на Дальнем Востоке России. – Всемирный фонд дикой природы (WWF). – Владивосток: Всемирный фонд дикой природы, 2016. – С. 4,17. – 32 с.
6. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., 2012: Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений. Метеорология и гидрология, № 6, С. 95 – 107.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Изд-во Росгидромета, 2014. – 1009 с.
8. Climate Change: The Physical Science Basis. (2013): IPCC: сайт. – URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs>, last accessed 2023/11/21 (дата обращения 22.03.2024).
9. Валендик Э.Н. Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири / Э.Н. Валендик [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2014. – №3. – С. 73 – 86.
10. Воробьев Ю.Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов; Под общ. ред. Ю.Л. Воробьева; МЧС России. – М.: ДЭК-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
11. Демаков, Ю.П. Влияние факторов среды на рост деревьев в сосняках Республики Марий Эл: монография / Ю. П. Демаков. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – 480 с.
12. А.Н. Дмитриев, С.Ю. Кречетова, Н. А. Кочеева. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: монография / Дмитриев А.Н., Кречетова С.Ю., Кочеева Н.А. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2011. – 154 с.

13. Динамика лесных пожаров: монография / Г.А. Доррер Ин-и вычислительного моделирования, М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Сибирский гос. технологический ун-т. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук, 2008. – 403 с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-7692-0985-7 (в пер.).
14. Дроздова Т.И., Сорокикова Е.В. Анализ лесных пожаров в Иркутской области в 2010-2019 гг. // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – 6(1). – С.29 – 41.
15. Коровин, Г.Н. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России / Г.Н. Коровин, Н.В. Зукерт. // Климатические изменения: взгляд из России / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. – М. : ТЕИС, 2003. – С. 69 – 98.
16. Чуйков А.М., Сметанкина Г.И., Дорохова О.В. Проблемы снижения уровня пожарной опасности территорий, расположенных в зоне риска лесных пожаров // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 465 – 468.
17. Шешуков М.А., Ковалев А.П., Орлов А.М., Позднякова В.В. Проблемы и перспективы охраны лесов от пожаров // Сибирский лесной журнал. 2020. № 2. С.14 – 20.
18. Бутырский Е.Ю. Методы моделирования и оценивания случайных величин и процессов. – СПб.: «Стратегия будущего», 2020. – 642 с.
19. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Диалектика. – 2017. – 912 с.
20. Холопцев А. В., Никифорова М. П. Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов. / LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 333 p. – ISBN:978-3-659-41130-4
21. Морозова С.В., Короткова Н.В., Лапина С.Н., Алимбиева М.А. К вопросу оправданности «нестандартных» долгосрочных прогнозов. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2019. Т.19. – вып. 3 – С. 174 – 181.
22. Нестеров, В. Г. Горимость леса и методы ее определения. М.: Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
23. Шерстюков, Б. Г. Потенциальная опасность лесных пожаров на Европейской территории России в оценках по метеорологическим данным, Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 175, 2010. С. 243 – 252.
24. Kholoptsev A. V., Shubkin R.G., Babenyshev S.V., Baturo A.N. Climatic Changes in the Arctic Zone of Russia and Climate Warming in Siberia. // Springer Nature Switzerland AG 2023 T. Chaplina (ed.) // Processes in GeoMedia – Volume VI, Springer Geology, 2022. P. 217-228.
25. Сверлова, Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск. – 2000. – 46 с.
26. Банк данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира: сайт. – URL: <https://tutienpo.net/climate/> (дата обращения 23.03.2024).

Информация об авторах

А.В. Холопцев – доктор географических наук, профессор

Р.Г. Шубкин – кандидат технических наук

Information about the author

A.V. Kholoptsev – Doctor of Geographical Sciences, professor

R.G. Shubkin – Ph.D. of Engineering Sciences

Статья поступила в редакцию 10.06.2024, одобрена после рецензирования 24.06.2024, принята к публикации 25.06.2024.

The article was submitted 10.06.2024, approved after reviewing 24.06.2024, accepted for publication 25.06.2024.