

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 004.942:630*43:502.4(571.54)

**Я.М. Иваньо, А.А. Лазарева,
Ю.В. Столопова**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРОВ
НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ТУНКИНСКИЙ»**

**Ya.M. Ivanyo, A.A. Lazareva,
Yu.V. Stolopova**

**THE MODELLING OF VARIABILITY OF CHARACTERISTICS OF THE FIRES
ON THE TERRITORY OF NATIONAL PARK "TUNKINSKY"**

Иваньо Я.М. – д-р техн. наук, зав. каф. информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

Лазарева А.А. – ассист. каф. землеустройства, кадастра и сельскохозяйственной мелиорации Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

Столопова Ю.В. – асп. каф. информатики и математического моделирования, преп. колледжа автомобильного транспорта и агротехнологий Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

Ivanyo Ya.M. – Dr. Techn. Sci., Head, Chair of Informatics and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, V. Molodyozhny. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

Lazareva A.A. – Asst., Chair of Land Management, Inventory and Agricultural Melioration, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, V. Molodyozhny. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

Stolopova Yu.V. – Post-Graduate Student, Chair of Informatics and Mathematical Modeling, Asst, College of Motor Transport and Agricultural Technology, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, V. Molodyozhny. E-mail: stolopova.yuliana@yandex.ru

В данной статье проанализирована многолетняя изменчивость различных характеристик лесных пожаров на территории национального парка «Тункинский» по данным 1974–2016 гг. Статистические свойства количества пожаров, связанные с цикличностью и наличием значимых автокорреляционных связей, позволили предложить методику модели-

рования этой характеристики с прогнозированием на 1 год. На основе анализа многолетней динамики частоты пожаров, относительных площадей пожаров и индексов горимости леса, а также климатических данных применены следующие методы математического моделирования: регрессионный анализ, метод скользящей средней, создание тренда, авто-

корреляция, авторегрессия. Метод скользящей средней с усреднением 5 лет позволил выявить два основных цикла (1975–1985 и 1986–2014 гг.), характеризующие количество пожаров. Предложены два метода прогнозирования числа лесных пожаров с упреждением 1 год: по полиномиальному тренду, характеризующему спад второго цикла и точку перелома к новой тенденции, и авторегрессионной модели с предшествующими значениями за семилетний период. Выявлена слабая значимая связь количества пожаров с суммами осадков за май, средними июньскими температурами и суммами температур за апрель – август. На основе полученных факторных связей и наличия автокорреляции в последовательности количества пожаров приведена авторегрессионная модель с учетом значимых метеорологических факторов для прогнозирования результативного признака. Результаты моделирования с помощью этих моделей могут быть дополнены прогностическими оценками авторегрессионной модели с учетом значимых метеорологических факторов, к которым, прежде всего, относится средняя температура воздуха за июнь.

Ключевые слова: характеристики лесных пожаров, национальный парк «Тункинский», факторы, автокорреляция, прогноз.

In the study long-term variability of various characteristics of forest fires on the territory of national park "Tunkinsky" according to the data of 1974–2016 is analyzed. Statistical properties of the number of fires connected with recurrence and existence of significant autocorrelated communications allowed to offer the technique of modeling of this characteristic with forecasting for 1 year. On the basis of the analysis of long-term dynamics of frequency of the fires, relative fire areas and indexes of inflammability of the wood, and also climatic data the following methods of mathematical modeling are applied: regression analysis, moving average method, creation of the trend, autocorrelation, autoregression. The moving average method with averaging of 5 years allowed revealing two basis cycles (1975–1985 and 1986–2014) characterizing the number of fires. Two methods of forecasting of the number of forest fires with anticipation are offered for 1 year: on the polynomial trend character-

izing the recession of the second cycle and the point of a change to a new tendency, and autoregression model with the previous values for the seven-year period. Weak significant communication of the number of fires with the sums of rainfall for May, by average June temperatures and the sums of temperatures for April – August is revealed. On the basis of the received factorial communications and existence of autocorrelation in the sequence of the number of fires the autoregression model taking into account significant meteorological factors for forecasting of the productive sign is given. The results of modeling by means of these models can be added with predictive estimates of autoregression model taking into account significant meteorological factors to which, first of all, average air temperature of June belongs.

Keywords: characteristics of forest fires, national park "Tunkinsky", factors, autocorrelation, forecast.

Введение. В настоящее время проблема лесных пожаров стала частью проблемы охраны окружающей природной среды. По масштабам разрушительного воздействия на леса огонь был и остается доминирующим среди всех природных и антропогенных факторов [3]. По данным Росстата, на территории Российской Федерации в 2014 г. зафиксировано 16,9 тыс. пожаров. Пройденная огнем площадь составила 3190,7 тыс. га, из которых около 50 % охватили территорию Сибири. На активно охраняемой территории РФ было зарегистрировано 13,5 тыс. пожаров площадью 655,3 тыс. га [7].

Лесные пожары являются естественными факторами природной среды, полное исключение огня как природного фактора невозможно. Вместе с тем допустить распространение очагов лесных пожаров на крупные территории нельзя. К катастрофическим лесным пожарам на охраняемых природных территориях следует отнести не только пожары на больших площадях, но и пожары в уникальных природных системах. Следствием катастрофических лесных пожаров являются полное прогорание почвенного слоя, потеря в результате пожара редких и эндемичных видов растений и животных [3].

Цель исследования: анализ динамики лесных пожаров за многолетний период в национальном парке «Тункинский», расположенном

на территории Республики Бурятия; природных факторов, влияющих на различные показатели и характеризующих лесные пожары; методов их прогнозирования.

Результаты исследования

Многолетняя изменчивость характеристик лесных пожаров

Лесные пожары, возникающие на территории национального парка «Тункинский», в значительной степени влияют на животный и растительный мир системы. Между тем их назначение связано с сохранением уникальных биоресурсов территории.

Согласно статистическим данным ФГБУ «Национальный парк «Тункинский»», общее число пожаров за 2002–2016 гг. составило 465. Наибольшее количество возгораний зафиксировано в 2003 г. – 134, а минимальное отмечено в 2014 г. – 7 (2,72 %). Пройденная огнем площадь за анализируемый период времени составила 14 705,96 га (Годовой отчет директора национального парка «Тункинский» по состоянию на 01.01.2017 г.).

В результате пожаров снижаются водоохранные, защитные, рекреационные и другие функции леса, в угнетенном состоянии находят-

ся редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных.

Знание закономерностей изменчивости лесных пожаров позволяет предотвращать и своевременно ликвидировать лесные пожары и их последствия. При этом необходимо производить оценку рисков возникновения пожаров, выявлять наиболее опасные районы, граничащие с населенными пунктами и местами отдыха, прогнозировать развитие лесных пожаров и своевременно принимать меры по предупреждению их возникновения [1, 2].

В таблице 1 приведена многолетняя динамика частоты пожаров, относительных площадей пожаров и индексов горимости леса и дана их оценка для национального парка «Тункинский» по данным 1974–2016 гг. Из характеристик таблицы следует, что до 1988 г. горимость леса характеризуется оценками низкая и пониженная. Между тем начиная с 1989 г. наблюдается возрастание горимости лесов, которая достигла высокого индекса в 1996–2002 гг. При этом площадь, пораженная огнем, оказалась наиболее значительной. За период 2003–2016 гг. оценка горимости постепенно снижается (от средней до пониженной) [4].

Многолетняя динамика фактической горимости леса и ее оценка для национального парка «Тункинский»

Период	Частота пожаров (Ч)		Относительная площадь пожаров		Индекс горимости	
	пожары/ 100 тыс. га за сезон	Оценка	га/100 тыс. га за сезон	Оценка	км/100 тыс. га за сезон	Оценка
1974–1980	1,2	Пониженная	4,1	Низкая	0,7	Низкая
1981–1988	0,5	Низкая	1,8	Низкая	0,3	Низкая
1989–1995	2,2	Средняя	84	Средняя	4,1	Средняя
1996–2002	7,1	Повышенная	394	Повышенная	15,9	Высокая
2003–2009	2,7	Средняя	93	Повышенная	4,8	Средняя
2009–2015	1	Пониженная	29	Пониженная	1,6	Пониженная

Хотя показатель горимости за последнее десятилетие уменьшается, период 2003–2009 гг. характеризуется повышенной оценкой относительной площади пожаров.

Рассматривая динамику лесных пожаров в национальном парке «Тункинский» за многолетний период, нетрудно обнаружить волнообразные изменения количества возгораний. Соглас-

но скользящей средней с усреднением 5 лет (рис. 1) можно выделить два основных цикла, характеризующие количество пожаров: 1975–1985 и 1986–2014 гг.

Близкий результат к волнообразной кривой, полученной по скользящей средней с усреднением 5 лет, определен с помощью полиномиальной зависимости:

$$y = 8 \cdot 10^{-5}t^5 + 0.804t^4 + 3210t^3 - 6 \cdot 10^6t^2 + 6 \cdot 10^9t - 3 \cdot 10^{12}. \quad (1)$$

Хотя полиномиальная зависимость отражает общую тенденцию изменчивости количества пожаров с точностью по значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,63$, она не может быть

использована для прогнозирования, поскольку имеет место значительное различие между аналитическими и фактическими значениями на спаде большого цикла.



Рис. 1. Цикличность числа пожаров в национальном парке «Тункинский» по данным за 1974–2016 гг.

Если моделировать только спад большого цикла, то он может быть описан в виде экспоненты или параболы:

$$y = e^{0.0063t^2 - 0.224t + 4.53}, \quad (2)$$

$$y = 0.744t^2 - 16.1t + 102. \quad (3)$$

Оба тренда являются значимыми по критерию Фишера. Их с некоторым приближением можно использовать для прогнозирования числа пожаров с упреждением 1 год. Между тем формула (2) имеет тот недостаток, что по своим свойствам не может описывать ситуации отсутствия пожаров или нулевые их значения. Она применима в случае обязательного наличия пожаров.

Формулы (2) и (3) описывают переломные ситуации, когда падение может сменяться подъемом. При этом параболическая зависимость характеризует более интенсивные процессы смены числа пожаров по сравнению с экспонентой. В конкретном случае она рекомендуется для прогнозирования возможного числа пожаров с заблаговременностью 1 год. Согласно точечному прогнозу, по выражению (3) число пожаров в 2017 г. может достигнуть 27. Для сравнения прогностическое значение рассматриваемого параметра на основе формулы (2) составит 13.

Второй особенностью ряда количества пожаров является значимая автокорреляционная связь между последующими и предшествующими значениями. Так, значимые уровни коэффи-

коэффициентов автокорреляции при сдвиге от 1 до 6 лет составляют 0,34–0,59. Другими словами, выражение авторегрессии с коэффициентом

$$y_t = 8,9 - 0,287y_{t-7} + 0,034y_{t-6} + 0,26y_{t-5} - 0,139y_{t-4} + 0,406y_{t-3} - 0,067y_{t-2} + 0,515y_{t-1}, \quad (4)$$

где y_t – последующее значение ряда числа пожаров, соответствующее количеству пожаров; $y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, y_{t-4}, y_{t-5}, y_{t-6}, y_{t-7}$ – предшествующие значения ряда числа пожаров. На

детерминации $R^2=0,53$ для приближенной оценки прогностического значения числа пожаров с упреждением 1 год имеет вид

основе выражения (4) получен точечный прогноз, составивший 20.

На рисунке 2 показано сравнение количества фактических пожаров со значениями, полученными по авторегрессионной модели (4).

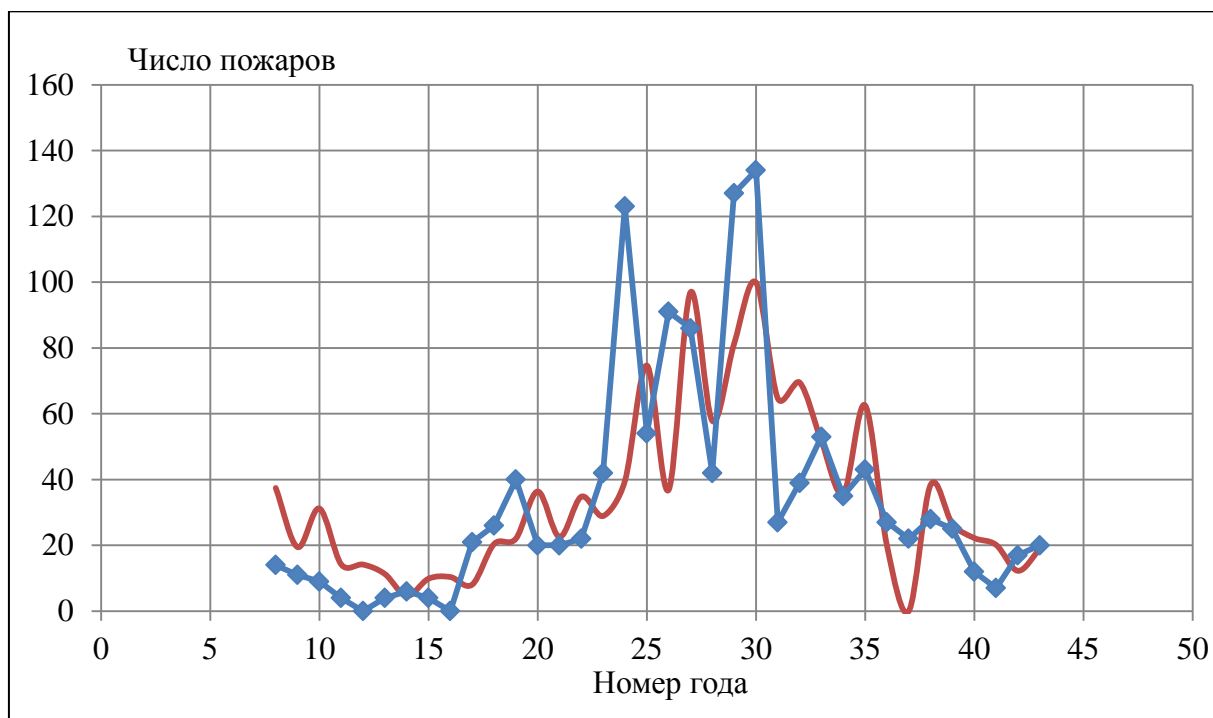


Рис. 2. Результаты оценки количества пожаров в национальном парке «Тункинский» по данным 1974–2016 гг. с помощью авторегрессионной модели

Выявленные свойства ряда числа пожаров позволяют использовать построенные методики прогнозирования. Приведенные результаты показывают различия между прогнозами, что связано с особенностями моделей (2)–(4). Если первые две модели построены на основе тенденции спада числа пожаров, то выражение (4) предполагает знание о количестве пожаров за определенный предшествующий период, соответствующий для исследуемой ситуации 7 лет. Использование той или иной методики для оценки прогностического значения зависит от характера изменчивости предшествующего числа пожаров.

Влияние климатических факторов на характеристики лесных пожаров

Вероятность возгорания и особенности распространения пожаров зависят от совокупности постоянных и переменных факторов. К ним относятся: климатические показатели, с которыми связана динамика фенологического состояния растительности вследствие типичного сезонного хода погоды и изменения засушливости под действием погодных флуктуаций, влияющих на степень увлажнения лесных горючих материалов; погодные условия, определяющие пожароопасное «созревание» лесных горючих материалов [1].

В пределах ограниченной территории многие факторы в течение одного сезона можно считать условно постоянными. Динамика пожарной опасности определяется климатическими и погодными условиями, под влиянием которых происходят процессы формирования «пожарной зрелости» проводников горения [6]. Поэтому ежедневная оценка и прогноз пожарной опасности осуществляются на основе нескольких взаимосвязанных показателей, рассчитываемых по метеорологическим условиям.

По мнению А.М. Лехатинова [5], снижение горимости леса обусловлено сдерживающими факторами развития очагов возгораний, которыми являются холодные климатические условия конца весны и начала лета.

В рассматриваемой работе проанализировано влияние месячных и сезонных значений температур и осадков, начиная с апреля и заканчивая августом, на число пожаров за период 1974–2016 гг. В результате корреляционного анализа выявлены слабые значимые связи между количеством осадков за май ($R=0,30$) и суммой месячных температур за июнь ($R=0,40$). Кроме того, определена слабая значимая корреляция между числом пожаров и суммой тем-

ператур за сезон апрель – август ($R=0,30$). Другими словами, на число пожаров в наибольшей степени влияют майские осадки и июньские температуры.

Учитывая этот факт, сделана попытка построения синтетической модели прогнозирования. Она представляет собой автокорреляционную зависимость, в которую входят факторы в виде месячных майских осадков и июньских температур. Такая модель позволяет учитывать как многолетние изменения количества пожаров, так и текущие значения температур и осадков. Недостатком этой модели является то, что для прогностической оценки числа пожаров необходимы сведения об осадках за май и температурах за июнь. Частично этот недостаток можно устранить за счет прогностических метеорологических данных. Между тем анализ различных вариантов предложенной модели показывает, что осадками можно пренебречь, поскольку температура июня в большей степени влияет на число пожаров по сравнению с фактором увлажнения. Таким образом, для прогнозирования числа пожаров с учетом текущей июньской температуры предлагается модель следующего вида:

$$y_t = -58,5 + 4,864t^0 - 0,12y_{t-6} + 0,31y_{t-5} - 0,297y_{t-4} + 0,453y_{t-3} - 0,246y_{t-2} + 0,539y_{t-1}, \quad (5)$$

где t^0 – средняя температура июня.

При использовании этой формулы необходимо соблюдать условие неотрицательности значений y_t . Предложенное выражение является значимым, а его точность соответствует $R^2=0.52$. Оно рекомендуется в качестве дополнения к предложенным моделям (2)–(4).

Выводы. В работе проанализирована многолетняя изменчивость различных характеристик лесных пожаров на территории национального парка «Тункинский» по данным 1974–2016 гг.

Статистические свойства количества пожаров, связанные с цикличностью и наличием значимых автокорреляционных связей, позволили предложить методику моделирования этой характеристики с прогнозированием на 1 год.

Предложена трендовая нелинейная модель, описывающая стадию многолетнего спада числа пожаров с переломной точкой, и авторегрессионная модель, учитывающая предшествующие значения семилетнего периода.

Результаты моделирования с помощью этих моделей могут быть дополнены прогностическими оценками авторегрессионной модели с учетом значимых метеорологических факторов, к которым, прежде всего, относится средняя температура воздуха за июнь.

Литература

1. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 310 с.
2. Звягинцева А.В., Федянин Ф.И. Оценка современных методик прогнозирования развития лесных пожаров и возможные пути их совершенствования // Технологии гражданской безопасности [Электрон. ресурс] / Всерос. науч.-исслед. ин-т по проблемам гражданской обороны и безопасности. – URL: file:///C:/Users/pcc/Downloads /otsenka-

- современных-методик-прогнозиrowa-ниya razvitiya-lesnyh-pozharov-i-vozmozhnye-puti-ih usovershenstvo.
3. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Лес как национальное достояние России // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 5–12.
 4. *Лазарева А.А., Афонина Т.Е.* Лесопожарный мониторинг национального парка «Тункинский» // Вестн. ИрГСХА. – 2014. – № 63. – С. 29–36.
 5. *Лехатинов А.М.* Объекты экологического мониторинга и познавательного туризма национального парка «Тункинский»: науч.-информ. путеводитель. – Иркутск, 2009. – 214 с.
 6. *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Пирологическое районирование в таежной зоне. – Новосибирск: Наука, 1990. – 204 с.
 7. Россия в цифрах. 2015: крат. стат. сб. / Росстат. – М., 2015. – 543 с.
 2. *Zvjaginceva A.V., Fedjanin F.I.* Ocenka sovremennyh metodik prognozirovanija razvitiya lesnyh pozharov i vozmozhnye puti ih usovershenstvovanija // Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti [Jelektronnyj resurs] / Vseros. nauch.-issled. in-t po problemam grazhdanskoj oborony i bezopasnosti. – URL: file:///C:/Users/pcc/Downloads/otsenka-sovremennyh-metodik-prognozirovaniya-razvitiya-lesnyh-pozharov-i-vozmozhnye-puti-ih-usovershenstvo.
 3. *Isaev A.S., Korovin G.N.* Les kak nacional'noe dostojanie Rossii // Lesovedenie. – 2013. – № 5. – С. 5–12.
 4. *Lazareva A.A., Afonina T.E.* Lesopozharnyj monitoring nacional'nogo parka «Tunkinskij» // Vestn. IrGSHA. – 2014. – № 63. – С. 29–36.
 5. *Lehatinov A.M.* Ob'ekty jeologicheskogo monitoringa i poznavatel'nogo turizma nacional'nogo parka «Tunkinskij»: nauch.-inform. putevoditel'. – Irkutsk, 2009. – 214 s.
 6. *Sofronov M.A., Volokitina A.V.* Pirologicheskoe rajonirovanie v taezhnoj zone. – Novosibirsk: Nauka, 1990. – 204 s.
 7. Rossija v cifrah. 2015: krat. stat. sb. / Rostat. – M., 2015. – 543 s.

Literatura

1. *Volokitina A.V., Sofronov M.A.* Klassifikacija i kartografirovanie rastitel'nyh gorjuchih materialov. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002. – 310 s.
7. Rossija v cifrah. 2015: krat. stat. sb. / Rostat. – M., 2015. – 543 s.

