

УДК 519.254.1

Прогноз интенсивности теплового излучения и эмиссий аэрозолей от лесных пожаров в Центрально-Европейском регионе

А.Ю. Юрова¹, А.В. Парамонов², И.Б. Коновалов³,
И.Н. Кузнецова¹, М. Beekmann^{4*}

¹ФГБОУ «Гидрометцентр России»

123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13, Россия

²ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин»,

127055, г. Москва, пер. Вадковский, 3а, Россия

³Институт прикладной физики РАН

603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Россия

⁴Межуниверситетская лаборатория атмосферных систем, Кретьей, Франция

Поступила в редакцию 27.01.2012 г.

Делается попытка построения прогноза интенсивности пожаров с заблаговременностью 1 сут на основе спутниковых измерений интенсивности излучения от пожаров. Прогноз базируется на модели пороговой авторегрессии. Метод оценки порогов на основе визуализации статистических характеристик сортированного ряда позволил выделить шесть категорий интенсивности излучения, прогноз по которым велся отдельно. В уравнение авторегрессии также вошел пожарный индекс Нестерова. В работе использованы данные по Центрально-Европейскому региону за лето 2010 г. Показано, что для всех категорий пожаров такой прогноз имеет преимущество перед инерционным. Значимая зависимость от пожарного индекса Нестерова не прослеживается для групп с высокой и очень высокой интенсивностью пожаров. На основе данных об интенсивности излучения пожаров за текущие сутки и прогноза этой величины на следующие сутки прогнозировались также эмиссии аэрозолей (PM_{10}) от лесных пожаров. Лучшее качество прогнозов на основе пороговой регрессии по сравнению с инерционным прогнозом достигнуто для первых двух (по малости) категорий интенсивности пожаров, которые доминировали по числу, и для последних двух (наиболее интенсивные пожары), доминировавших по охваченной ими площади. Показатели качества прогноза для средних категорий статистически значимо не отличаются от аналогичных показателей инерционного прогноза. Развитый метод планируется использовать для прогнозов загрязнения атмосферы на основе современной химическо-транспортной модели.

Ключевые слова: пожары, прогноз, интенсивность излучения, измерения со спутников, пороговая авторегрессия; fires, forecast, radiative power, satellite measurements, threshold autoregression.

Введение

Данные анализа метеорологической информации и результаты прогноза климата в XXI в. свидетельствуют о том, что частота появления аномальных волн тепла увеличивается существенно в ряде регионов, в том числе на европейской территории России [1, 2]. Ситуация лета 2010 г. показала, что в условиях экстремально жаркой погоды эмиссии аэрозолей от лесных пожаров становятся важным фактором, определяющим качество атмосферного воздуха [3–5]. Наиболее общим и эффективным путем оценки и прогноза атмосферных эффектов,

связанных с природными пожарами, является их моделирование с использованием трехмерных химическо-транспортных моделей атмосферы. В частности, коллективом авторов была адаптирована и применена к условиям Центрально-Европейского региона химико-транспортная модель CHIMERE [3].

Для адекватного воспроизведения моделью полей концентраций PM_{10} в условиях лета 2010 г. в модель были включены эмиссии от лесных пожаров, что позволило существенно улучшить согласие между наблюдаемыми и моделируемыми данными [3]. Эмиссии рассчитывались на основе данных спутникового зондирования интенсивности излучения от пожаров, усредненных по площади ячейки модели. Данный метод обеспечивает информацию с достаточным для модели пространственным разрешением, которая может оперативно поступать в центр прогнозирования с небольшим временным запаздыванием.

* Алла Юрьевна Юрова (alla.yurova@gmail.com); Андрей Викторович Парамонов (cmr.pent@gmail.com); Игорь Борисович Коновалов (konov@appl.sci-nnov.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Matthias Beekmann (Matthias.Beekmann@lisa.u-pec.fr).

При выработке оперативных прогнозов загрязнения атмосферы на основе региональных химико-транспортных моделей до настоящего времени использовался инерционный прогноз площади горения и, следовательно, эмиссий аэрозолей. В этой связи возникает задача исследования возможностей улучшения прогнозов эмиссий от природных пожаров (и, следовательно, прогнозов уровня PM_{10}) путем применения более совершенных математических методов.

В отечественной литературе можно проследить два пространственных масштаба, на которых ведется прогнозирование параметров лесных пожаров. К первому направлению относится прогнозирование поведения конкретного лесного пожара, ко второму — прогноз потенциальной пожароопасности или же площади горения в пределах достаточно большой территориальной единицы (например, административной области) [6–10]. Пространственное разрешение модели CHIMERE (около 10 км), однако, находится в неохваченном такими прогнозами промежутке масштаба. С другой стороны, опыт исследований в США показывает, что агрегированные с шагом порядка 10 км данные о пожарах могут с успехом предсказываться при условии адекватного включения в модели прогноза метеорологической информации.

Для прогноза числа очагов возгорания в пределах административной единицы в работе [10] была разработана модель стохастического процесса развития лесопожарных ситуаций с использованием векторного авторегрессионного процесса (ВАР). Метод показал высокую надежность прогноза на 1 сут для Иркутской области и имеет существенное преимущество перед прогнозированием с использованием только значений индекса Нестерова. Однако при переходе на масштаб 10 км, рассматриваемый в данной работе, необходимо учитывать нелинейность процесса (что следует из представленных ниже результатов) и, следовательно, метод ВАР оказывается напрямую не применим. Опыт прогнозирования поведения конкретного лесного пожара говорит о том, что объективно существует несколько режимов развития лесопожарной ситуации и перспективны методы, позволяющие их автоматическое выделение, например нейронные сети. Простым, но тем не менее строго обоснованным методом данной категории является пороговая авторегрессия (ПАР), которая и применялась в настоящей статье.

Целями данного исследования являлись: 1) построение (на обучающей выборке) модели ПАР для прогноза интенсивности излучения от лесных пожаров, наблюдаемой со спутника, с заблаговременностью на сутки для ячеек модельной сетки с разрешением $0,2 \times 0,1^\circ$, где в текущий момент времени фиксируются пожары; 2) выработка соответствующих прогнозов эмиссий аэрозолей от пожаров на сутки вперед с учетом тесной взаимосвязи интенсивности излучения пожаров и эмиссий PM_{10} ; 3) оценка качества прогнозов по данному методу на независимой выборке.

1. Используемые данные

В качестве основных нами использовались данные о мощности излучения от пожаров (FRP, от Fire radiative power), восстановленные по данным измерений прибора MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на борту спутников NASA Aqua и Terra [11]. Исходное пространственное разрешение этих данных около 1 км^2 . Данные FRP для Центрально-Европейского региона за три летних месяца 2010 г. были суммированы по ячейкам $0,2 \times 0,1^\circ$ и усреднены за сутки с учетом предписанного суточного хода [3]. Эмиссии PM_{10} оценивались в данной работе на основе предположения о линейной взаимосвязи между скоростью горения биомассы и величиной FRP. Линейное уравнение взаимосвязи было предложено на основе обработки спутниковых данных [11] и затем подтверждено при изучении экспериментальных пожаров [12].

Скорость эмиссии газовых веществ и аэрозолей от природных пожаров в рассматриваемой ячейке химико-транспортной модели в момент времени t рассчитывается следующим образом:

$$E(t) \cong F\alpha \left(\sum_l [\beta_{sl}\rho_l f_1] + \beta_{sp}\rho_p f_2 \right) p_h(t), \quad (1)$$

где E ($\text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) — скорость эмиссии PM_{10} ; F ($\text{Вт}/\text{м}^2$) — среднесуточный поток инфракрасного излучения, оцениваемый из спутниковых измерений FRP; α ($\text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$) — эмпирический коэффициент пропорциональности между потоком излучения и скоростью сгорания биомассы; β_{sl} и β_{sp} ($\text{г}[PM_{10}]/\text{г}[биомассы]$) — факторы эмиссий для данного типа l растительного покрова и торфяных (подземных) пожаров соответственно; ρ_l и ρ_p — фракции типа l земного покрова и площади торфяников в рассматриваемой модельной ячейке; p_h — предполагаемый суточный ход эмиссий от пожаров; f_1 и f_2 — дополнительные корректирующие факторы, оптимизируемые в процессе модельных расчетов (см. [3]).

Коэффициенты данного уравнения, оптимизированные на основе сравнения модельных расчетов и данных наземного мониторинга, приводятся в [3]. В качестве возможных переменных прогностических моделей рассматривались значения F и эмиссий E , рассчитанные согласно (1) и затем усредненные за сутки.

2. Метод пороговой авторегрессии

2.1. Описание метода

Модель пороговой авторегрессии [13] применяется к нелинейным рядам данных и позволяет моделировать различные режимы и скачки между режимами. В общем виде модель для прогнозируемой переменной Y формулируется следующим образом:

$$Y_t = \Phi_0^j + \sum_{i=1}^p \Phi_i^j Y_{t-i} + e_t^j, \quad (2)$$

$$r_{j-1} \leq Y_{t-d} < r_j,$$

где Φ — матрица параметров модели; e_t — остаточные значения в момент времени t (случайная компонента); r — пороговые значения.

В работе [14] предложена следующая процедура выработки вида модели ПАР: 1) тест на пороговую нелинейность, 2) определение переменной, по которой будут находиться пороговые значения, 3) спецификация пороговых значений на основе визуализации t -критерия сортированного ряда (порогами считаются значения максимумов и минимумов на соответствующем графике), 4) определение порядка модели для каждого режима, 5) оценка коэффициентов модели.

2.2. Применение к динамике пожаров и эмиссиям РМ₁₀

Тест на пороговую нелинейность, заимствованный в [14], показал, что ряд среднесуточных значений потока инфракрасного излучения от пожаров F [см. уравнение (1)] является нелинейным. В случае применения модели для предсказания величины F в модель вошли значения самой этой величины и пожарного индекса Нестерова. Переменной, определяющей пороговые значения и смену режимов Y , было принято считать саму величину F . Для всех режимов был принят первый порядок модели, таким образом, уравнение (2) было записано в следующем виде:

$$Y_t = aY_{t-1} + bIN + c + e_t, \quad (3)$$

где a , b , c — значения параметров модели, специфические для каждого режима в пределах пороговых значений; IN — пожарный индекс Нестерова [15].

Пожарный индекс Нестерова оценивался по следующей формуле:

$$IN = \sum_{i=1}^n T(T - T_d). \quad (4)$$

Здесь n — число дней после последнего дождя (осадки до 2,5 мм в расчет не принимаются). Входной метеорологической информацией для расчета этого индекса служили результаты усвоения данных наблюдений метеорологических станций моделью WRF о среднесуточной температуре воздуха T и температуре точки росы T_d на высоте 2 м (°C) и суточных сумм осадков.

На основе визуализации статистических характеристик (t -критерия) сортированного ряда было выделено шесть категорий интенсивности излучения от пожаров, прогноз по которым велся отдельно (рис. 1). Соответствующие этим режимам коэффициенты уравнений пороговой авторегрессии представлены в таблице.

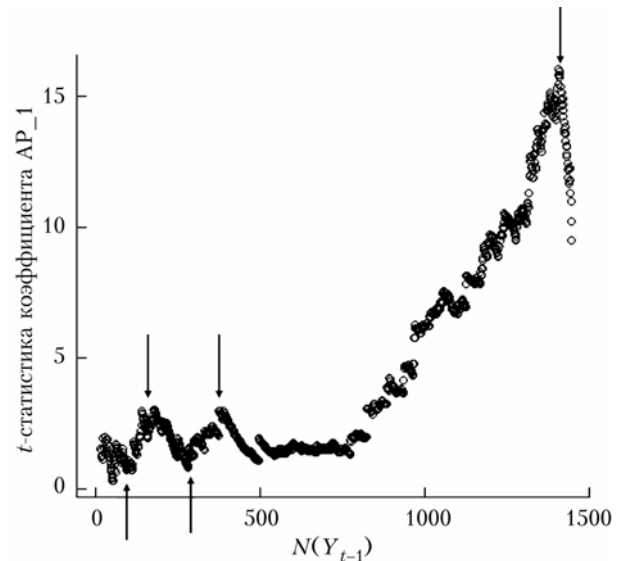


Рис. 1. Изменение t -статистики регрессионного коэффициента при Y_{t-1} , полученное в результате применения модели линейной регрессии рекурсивно к сортированному по Y_{t-1} ряду с N участниками выборки. По экстремумам (показаны стрелками) определялись пороговые значения, разделяющие категории, прогнозирование по которым в дальнейшем велось отдельно

Интервал F_{t-1}	a	b	c
0–0,5	5,34	0,0000182	–0,953
0,5–8	0,111	0,0000683	3,33
8–30	0,591	–0,000479	14,24
30–100	0,485	0,00054	3,953
100–200	0,514	0,0024	13,67
>200	0,00077	–0,000116	89,79

Примечание. Коэффициенты пороговой авторегрессии в уравнении $F_t = aF_{t-1} + bIN + c$, где F_t (Вт·м^{–2}) — FRP, усредненная в пределах суток по ячейкам 0,2 × 0,1°, IN — пожарный индекс Нестерова на этой же сетке, рассчитанный по данным модели WRF.

Коэффициенты оценивались на основе обучающей выборки, в которую вошло 50% всех случаев, выбранных случайным образом. Прогноз строился на независимой выборке из оставшихся случаев.

Для исследования зависимости пожаров в данной ячейке от возгораний в соседних ячейках было изучено число случаев возгорания в данной ячейке на текущем шаге и предыдущем и в соседних ячейках на предыдущем шаге для категорий с различными величинами F . Оказалось, что для интенсивных пожаров, которые могут распространяться из ячейки в ячейку, в 75% случаев пожар на предыдущем шаге наблюдается именно в этой ячейке, и только в 8% случаев — в какой-либо из соседних (в оставшихся случаях пожары на предыдущем шаге не наблюдались ни в данной ячейке, ни в соседних). Таким образом, было решено считать значения F в данной ячейке независимыми от значений в соседних ячейках.

Прогнозируемые эмиссии рассчитывались, как описано в разд. 1, с учетом того, что значение F на следующие сутки бралось как прогнозируемое.

3. Результаты

3.1. Прогноз интенсивности излучения от пожаров

Анализ исходного ряда данных показал, что наибольшее количество пожаров относится к первым двум по малости категориям пожаров. С другой стороны, на основе данных измерений FRP с разрешением 1 км^2 можно заключить, что в дни с наибольшей суммой пожаров в пределах сетки с разрешением $0,2 \times 0,1^\circ$ пожары большой интенсивности (двух наивысших категорий) абсолютно доминируют в сумме.

На рис. 2 представлены среднеквадратические отклонения инерционного прогноза и прогноза по методу ПАР для шести категорий, по которым прогнозировалась величина F . Для первых 5 категорий виден существенный выигрыш метода ПАР перед инерционным прогнозом.

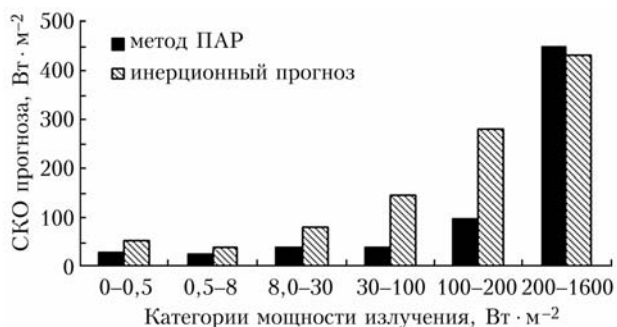


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка прогноза значений потока инфракрасного излучения от пожаров (F), оцененная по шести категориям F для инерционного прогноза и прогноза по методу ПАР

Для проверки надежности метода на масштабе всего Центрально-Европейского региона было проведено суммирование предсказанных и наблюдаемых значений F в пределах всех выбранных ячеек за каждые сутки. Коэффициент корреляции прогнозов F по методу ПАР и наблюдаемых величин F составил 0,87, что выше, чем коэффициент корреляции 0,8, полученный, когда метод ВАР, предложенный в [10], применялся непосредственно для F . Коэффициент корреляции между значениями индекса Нестерова и наблюдаемыми значениями F составил 0,62.

3.2. Прогноз эмиссий PM_{10}

Прогноз эмиссий на основе данных прогноза интенсивности излучения показал качество лучше инерционного для первых двух (по малости) категорий интенсивности пожаров и для последних двух (наиболее интенсивные пожары). Показатели качества прогноза для средних категорий статистически значимо не отличаются от аналогичных показателей для инерционного прогноза. Среднеквадратическая ошибка (СКО) прогноза по ПАР, усред-

ненная по всем категориям, на 15% ниже, чем СКО инерционного прогноза, однако для первых двух категорий ошибка ниже на 74% и для последних двух – на 33%. Также изменяется и вид функции распределения ошибок, несколько увеличена вероятность, по сравнению с инерционным прогнозом, небольших по величине ошибок, но в то же время уменьшается вероятность больших отклонений.

Когда метод пороговой авторегрессии применялся непосредственно к данным об эмиссиях PM_{10} , выделилось лишь три режима, прогноз по которым велся по независимым уравнениям. Так же как в случае пересчета прогноза эмиссий из прогноза F , усредненная среднеквадратическая ошибка прогноза ПАР была на 15% ниже, чем СКО инерционного прогноза, и наилучший результат был получен для первой категории (наименьшие величины эмиссий).

4. Обсуждение результатов

Нами показано, что метод ПАР может с успехом применяться для воспроизведения временной динамики интенсивности теплового излучения от пожаров (F) с заблаговременностью 1 сут, как в масштабе ячейки химико-транспортной модели, так и для всего Центрально-Европейского региона в целом. Поскольку в уравнения входит априорная информация об очагах горения, этот метод также достовернее, чем прогноз только на основе пожарного индекса Нестерова.

Недостатки метода обнаруживают себя в категории пожаров наибольшей интенсивности. Именно в этой категории зависимость прогнозируемой величины F от пожарного индекса Нестерова становится незначимой. Два этих факта, вероятно, связаны между собой. Следует отметить, что большие суммы в данном случае определяются одним или несколькими очень крупными пожарами, динамика которых, видимо, воспроизводится методом плохо.

Так, Potter [16] теоретически показал, что источник тепла от наиболее интенсивных пожаров на поверхности оказывает влияние на динамику пограничного слоя и образует конвективную ячейку. Сформировавшаяся система циркуляции определяет ветры на уровне протекания пожара. От этой скорости ветра зависит существенным образом и раздувание пожара до больших и очень больших размеров.

Таким образом, пожарный индекс Нестерова в данных условиях недостаточен для предсказания динамики пожаров, и нужно использовать информацию о конвективной неустойчивости в пограничном слое атмосферы. Такая информация может быть получена либо с метеорологических станций высотного зондирования непосредственно в районе протекания пожара, либо в результате расчетов моделей с учетом источников тепла на поверхности. Измерения подобного типа пока не достаточно репрезентативны из-за редкой сети наблюдений, моделирование же составляет задачу на будущее с учетом, что пространственное разрешение такой модели должно быть очень детальным.

Что касается прогнозов эмиссий PM_{10} , то метод не уступает инерционному в четырех категориях из шести. Следует, однако, отметить: две из четырех категорий соответствуют наибольшему числу случаев с пожарами и остальные две — пожарам с наибольшей эмиссией, так что в целом можно рекомендовать метод для внедрения в химико-транспортную модель как лучшую альтернативу инерционному прогнозу.

Эксперименты с моделью покажут, как отразится новый метод прогноза эмиссий на качестве прогнозов приземной концентрации PM_{10} . N. Larkin et al. [17] в своей работе отмечают, что наилучшее соответствие между измеренной и моделируемой концентрацией PM_{10} достигается путем моделирования источника эмиссий от пожаров как большого числа факелов, а не одного площадного источника. Возможно, что в задачи моделирования эмиссий в таком случае будет входить и предсказание функции распределения FRP в пределах модельной ячейки, а не только суммы по ячейке.

Заключение

Разработан метод прогноза эмиссий от пожаров на сутки вперед на основе пороговой авторегрессии и данных дистанционного зондирования на масштабе около 10 км. Такой прогноз имеет преимущество перед инерционным для 4 из 6 наиболее важных категорий интенсивности излучения (по числу случаев или площади). Разработанный метод прогноза эмиссий на основе ПАР может быть рекомендован для применения в оперативных расчетах загрязнения атмосферы на основе современных химико-транспортных моделей в период пожароопасной ситуации. В настоящее время в Гидрометцентре России проводится работа по сопряжению этого метода с химико-транспортной моделью CHIMERE.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, грант № 11-05-91061-НЦНИ_а.

1. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garcia-Herrera R. The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe // *Science*. 2011. V. 332, N 6026. P. 220–224.
2. Meehl G.A., Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century // *Science*. 2004. V. 305, N 5686. P. 994–997.
3. Kononov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // *Atmos. Chem. and Phys.* 2011. V. 11, N 19. P. 10031–10056.

A.Yu. Yurova, A.V. Paramonov, I.B. Kononov, I.N. Kuznetsova, M. Beekmann. Forecast of the intensity of thermal radiation and aerosol emission from forest fires at the Central European region.

A new approach is developed to forecast the fire radiative power (FRP) observed by the satellite sensor with a lead time of one day. The method is based on a threshold autoregression model. Visualization of the t -statistics of the sorted time series has helped to discern six regimes, for which the model coefficients were specified separately. Nesterov fire index was used as one of the predictors. Data for European part of Russia for summer 2010 were used. It was shown that threshold autoregression forecast is superior to inertial forecast of FRP. Aerosols emissions (PM_{10} concentrations) were also predicted based on FRP forecast for the next day. The forecast errors were lower than the errors of inertial forecast of PM_{10} for four of six regimes that were dominating either in terms of number or coverage area. The method will be incorporated into the air quality model.

Прогноз интенсивности теплового излучения и эмиссий аэрозолей от лесных пожаров...

4. Оптика атмосферы и океана, № 3.

4. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 1. С. 90–96.
5. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А. Аномалии концентраций малых газовых составляющих в воздухе европейской части России и Украины летом 2010 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 582–588.
6. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
7. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59–61.
8. Зденева М.Я., Виноградова М.В. Метод среднесрочного прогноза степени пожарной опасности в лесах по метеорологическим условиям // Метеорол. и гидрол. 2009. № 1. С. 16–26.
9. Данеев А.В., Русанов В.А., Удилов Т.В., Шарпунский Д.Ю. К методам оперативного прогнозирования фронта лесного пожара // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3. С. 38–46.
10. Парамонов А.В. Моделирование и прогноз развития лесопожарных ситуаций с использованием векторных авторегрессионных процессов // Вестн. Российского ун-та дружбы народов. Сер. Математика, информатика, физика. 2009. № 2. С. 66–73.
11. Ichoku C., Kaufman Y.J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2005. V. 43, N 11. P. 2636–2649.
12. Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *J. Geophys. Res. D.* 2005. V. 110, N 24311. P. 1–24.
13. Tong H. On a threshold model // Pattern recognition and signal processing. NATO ASI Series E: Applied Sc. (29) / Ed. C. Chen. Amsterdam: Sijthoff & Noordhoff, 1978. P. 575–586.
14. Tsay R.S. Testing and modeling threshold autoregressive processes // *J. Amer. Statistic. Associat.* 1989. V. 84, N 405. P. 231–240.
15. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
16. Potter B.E. A dynamics based view of atmosphere–fire interactions // *Int. J. Wildland Fire. CSIRO.* 2002. V. 11, N 4. P. 247–255.
17. Larkin N.K., O'Neill S.M., Solomon R., Raffuse S., Strand T., Sullivan D.C., Krull C., Rorig M., Peterson J., Ferguson S. The BlueSky smoke modeling framework // *Int. J. Wildland Fire.* 2009. V. 18, N 8. P. 906.