

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.583, 551.509.68, 551.581.1

И. И. МОХОВ, А. В. ЧЕРНОКУЛЬСКИЙ

Институт физики атмосферы РАН, г. Москва

### РЕГИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ РИСКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

*Представлены результаты анализа изменений условий пожароопасности в азиатской части России при возможных антропогенных изменениях климата в XXI в. Выявлено, что при повышении температуры существенное влияние на общий рост пожароопасности оказывает изменение функции распределения осадков. При общем потеплении к концу XXI в. в средних и субтропических широтах наряду с ростом риска пожароопасности увеличится длительность пожароопасного периода, а в высоких широтах изменения риска менее существенны.*

Ключевые слова: лесные пожары, климатические модели, изменения климата, региональные последствия.

*Presented are the results from analyzing the changes in the fire hazard conditions in the Asian part of Russia within the context of prospective anthropogenic climate change in the 21<sup>st</sup> century. It is found that with a rise in temperature, a substantial influence on a general increase of fire hazard is exerted by a change of the distribution function of precipitation. With a general warming by the end of the 21<sup>st</sup> century, the middle and subtropical latitudes will see, along with increasing fire hazard risk, an extension of the fire-hazardous period, whereas the high latitudes will undergo a more limited changes in the risk.*

Keywords: forest fires, climatic models, climate changes, regional consequences.

### ВВЕДЕНИЕ

К числу наиболее опасных последствий общего потепления климата относятся засухи и пожары [1–10]. Климатические изменения в последние десятилетия проявляются в виде сильных температурных, циркуляционных и гидрологических аномалий, приводящих в том числе к пожарам, как, например, в России в 2002 г. и в Западной Европе в 2003 и 2007 гг. Подобные длительные аномалии, характеризующиеся засушливыми условиями летних сезонов в средних широтах, связаны с блокирующими антициклонами (блокинками) в тропосфере. Развитию режимов засух и пожаров способствует то, что в теплые месяцы года, в частности в средних широтах Северной Евразии, с ростом температуры общее количество осадков в целом уменьшается [11, 12]. При общем потеплении, связанном с увеличением содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере может заметно увеличиться роль континентальных блокингов [13].

Пожары приводят к региональным биосферным изменениям, изменениям альbedo подстилающей поверхности, эвапотранспирации и радиационного баланса, углеродного обмена между атмосферой и наземными экосистемами [14, 15]. Из-за роста числа пожаров к концу XXI в. ожидается заметное изменение альbedo подстилающей поверхности [8].

В 2006 г. с использованием индекса пожароопасности Нестерова  $I_F$  [16] впервые на основе расчетов с использованием региональной модели был оценен риск лесных пожаров для российских регионов, в частности для европейской территории России (ЕТР), с учетом потенциально возможных изменений климата в XXI в. [3]. В 2007–2008 гг. сделаны соответствующие оценки для азиатской территории России (АТР) [7, 9, 10]. В данной работе представлены итоги этой оценки, полученные с помощью использования как  $I_F$ , так и других критериев, применяемых для территории Северной Евразии (в частности для АТР), на основе результатов численных расчетов с применением региональной климатической модели.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализировались результаты численных расчетов с использованием региональной климатической модели ГГО [17] с горизонтальным разрешением 50 км при сценарии SRES-A2 [18] увеличения эмиссии парниковых газов в XXI в. Для АТР детальный анализ ежедневных данных по расчетам с применением региональной модели проводился для трех десятилетий: в конце XX в. (1991–2000 гг.), а также в середине (2041–2050 гг.) и конце (2091–2100 гг.) XXI в.

При анализе риска пожаров использовался индекс Нестерова, предложенный для оценки потенциала пожароопасности лесов [16]:

$$I_F = \sum (T_M - T_d) \cdot T_M, \quad (1)$$

где  $T_M$  — максимальная суточная температура воздуха у поверхности, °С;  $T_d$  — температура точки росы, зависящая от относительной влажности и температуры, °С. Также использовались модификации индекса [3, 6, 7, 19–21]. Суммирование проведено для тех дней, когда количество осадков  $P$  за сутки не превышает 3 мм. При  $P > 3$  мм величина  $I_F$  приводится к нулю. Как и в [3, 7], условия с  $I_F$  менее 300 (режим I) считались непожароопасными или с очень слабой пожароопасностью, а с  $I_F$  в диапазонах 300–1000, 1000–4000, 4000–10 000 и больше 10 000 — соответственно, режимами с малым (II), умеренным (III), высоким (IV) и экстремально высоким (V) уровнями пожароопасности.

В нашем исследовании также использовался модифицированный индекс пожароопасности:

$$I_{FM} = \sum k \cdot (T_M - T_d) \cdot T_M, \quad (2)$$

где  $k = k(p)$ . По сравнению с (1), в (2) введен коэффициент  $k$ , учитывающий влияние осадков более дифференцированно.

|          |     |         |       |       |        |         |           |
|----------|-----|---------|-------|-------|--------|---------|-----------|
| $P$ , мм | 0   | 0,1–0,9 | 1–2,9 | 3–5,9 | 6–14,9 | 15–19,9 | $\geq 20$ |
| $k$      | 1,0 | 0,8     | 0,6   | 0,4   | 0,2    | 0,1     | 0         |

Наряду с дифференцированным учетом осадков в более детальных индексах пожароопасности можно учитывать, например, зависимость от скорости ветра и другие факторы. Результаты модельных оценок уровня пожароопасности в разных регионах сопоставлялись со спутниковыми данными [22] для границ распространения лесов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам исследования составлена схема распределения значений среднего летнего индекса пожароопасности ( $I_{Fm}$ ) для конца XX в. (1991–2000 гг.) ( $I_{Fm}(0)$ ) на АТР (рис. 1). По спутниковым данным [22] на территории России выделены границы областей с наличием лесов.

Для АТР более низкие широты в целом характеризуются более высоким риском лесных пожаров. Как и для ЕТР [3], граница лесов на АТР (см. рис. 1) находится в зонах большого градиента индекса пожароопасности, достаточно хорошо соответствуя границам регионов с умеренным риском пожароопасности (режим III), за исключением некоторых областей. В частности, значительному количеству лесных регионов Забайкалья при современном климате соответствует высокий уровень пожароопасности. Это подтверждается и данными о лесных пожарах [23]. В целом же в средних и высоких широтах Северной Евразии леса существуют, главным образом, в условиях малой летней пожароопасности (режимы I и II). Модельные расчеты индекса пожароопасности в общем неплохо согласуются с аналогичными расчетами по данным наземных наблюдений и со спутниковой информацией о реальной пожарной обстановке [9].

Анализ возможных изменений риска лесных пожаров в XXI в. по модельным расчетам для регионов Северной Евразии выявил значительную пространственную неоднородность. На рис. 2 приведены отношения  $I_{Fm}$  и  $I_{FMm}$  в середине XXI в. (2041–2050 гг.) к  $I_{Fm}(0)$  и  $I_{FMm}(0)$  при антропогенном сценарии SRES-A2:  $a - \Delta I_{Fm}/I_{Fm}(0)$  и  $b - \Delta I_{FMm}/I_{FMm}(0)$ . Проявляются не только региональные различия изменений риска лесных пожаров, но и значительные отличительные черты при разных критериях пожароопасности. С использованием стандартного индекса пожароопасности  $I_{Fm}$  (см. рис. 2, а) получено наиболее сильное увеличение риска лесных пожаров в центральной части АТР (до трехкратного уровня по сравнению с концом XX в). Максимальные значения относительного увеличения модифицированного индекса  $I_{FMm}$  (см. рис. 2, б) в центральной части АТР существенно меньше, вплоть до локального уменьшения риска пожаров.

Рисунок 2 свидетельствует о качественных различиях в модельных тенденциях осадков в зависимости от их интенсивности. Это подтверждают изменения к середине количества летних дней с осадками меньше и больше 3 мм/сут (пороговое значение для расчета индекса  $I_{Fm}$ ), прогнозируемые на

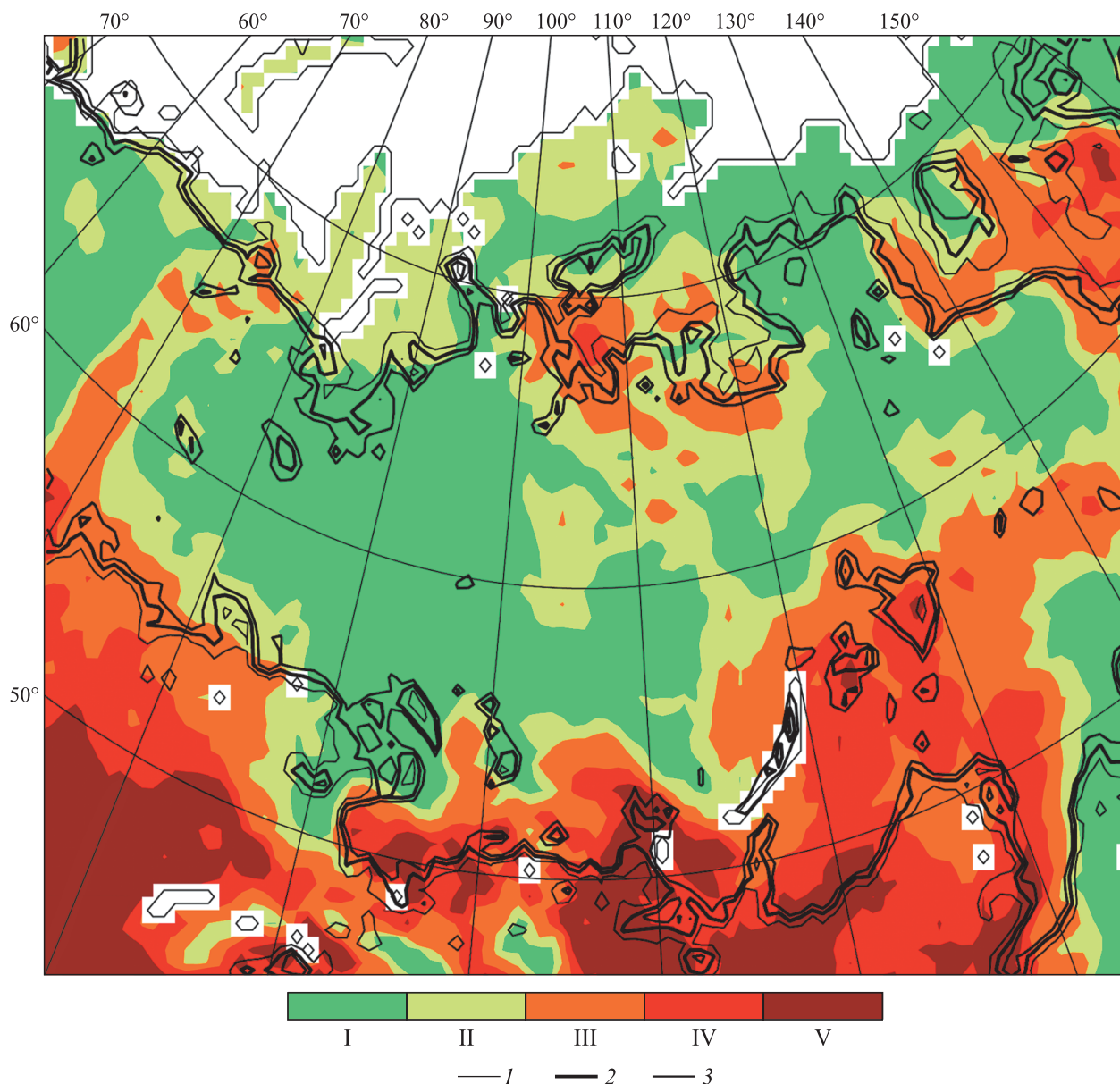


Рис. 1. Распределение значений среднего летнего индекса пожароопасности в конце XX в. ( $I_{Fm}(0)$ ) для АТР. I —  $I_{Fm} < 300$ ; II —  $300 < I_{Fm} < 1000$ ; III —  $1000 < I_{Fm} < 4000$ ; IV —  $4000 < I_{Fm} < 10\,000$ ; V —  $I_{Fm} > 10\,000$ . Границы областей с долей лесов в модельных широтно-долготных ячейках: 1 — не менее 10 %, 2 — 30 %, 3 — 50 %.

период 2041–2050 гг. Над значительной частью АТР (особенно центральной и восточной) увеличится количество слабых осадков (меньше 3 мм/сут). При этом снизится уровень сильных осадков над большей частью АТР (особенно в центральной и восточной частях). При более дифференцированном учете влияния осадков на оценку риска летних лесных пожаров существенно ослабляется аномально сильный рост пожароопасности в центральной части АТР.

Следует отметить, что при более дифференцированном учете влияния осадков на оценку риска летних лесных пожаров корректируется нелинейный эффект, проявляющийся при сравнении относительных изменений средних стандартных индексов летней пожароопасности  $I_{Fm}$  к середине XXI в. (см. рис. 2, а) и к концу XXI в. при антропогенном сценарии SRES-A2. Для конца XXI в. существенных различий между разными анализировавшимися индексами пожароопасности не выявлено. При этом, как и в середине XXI в., главным определяющим фактором пространственной неоднородности изменений риска пожаров останется неоднородность в осадках.

В южных регионах с уменьшением летних осадков (с интенсивностью как больше, так и меньше 3 мм/сут) возрастет риск возникновения пожаров — он может в 2,5 раза превысить аналогичные показатели, характерные для конца XX в. По модельным расчетам средняя за лето максимальная дневная

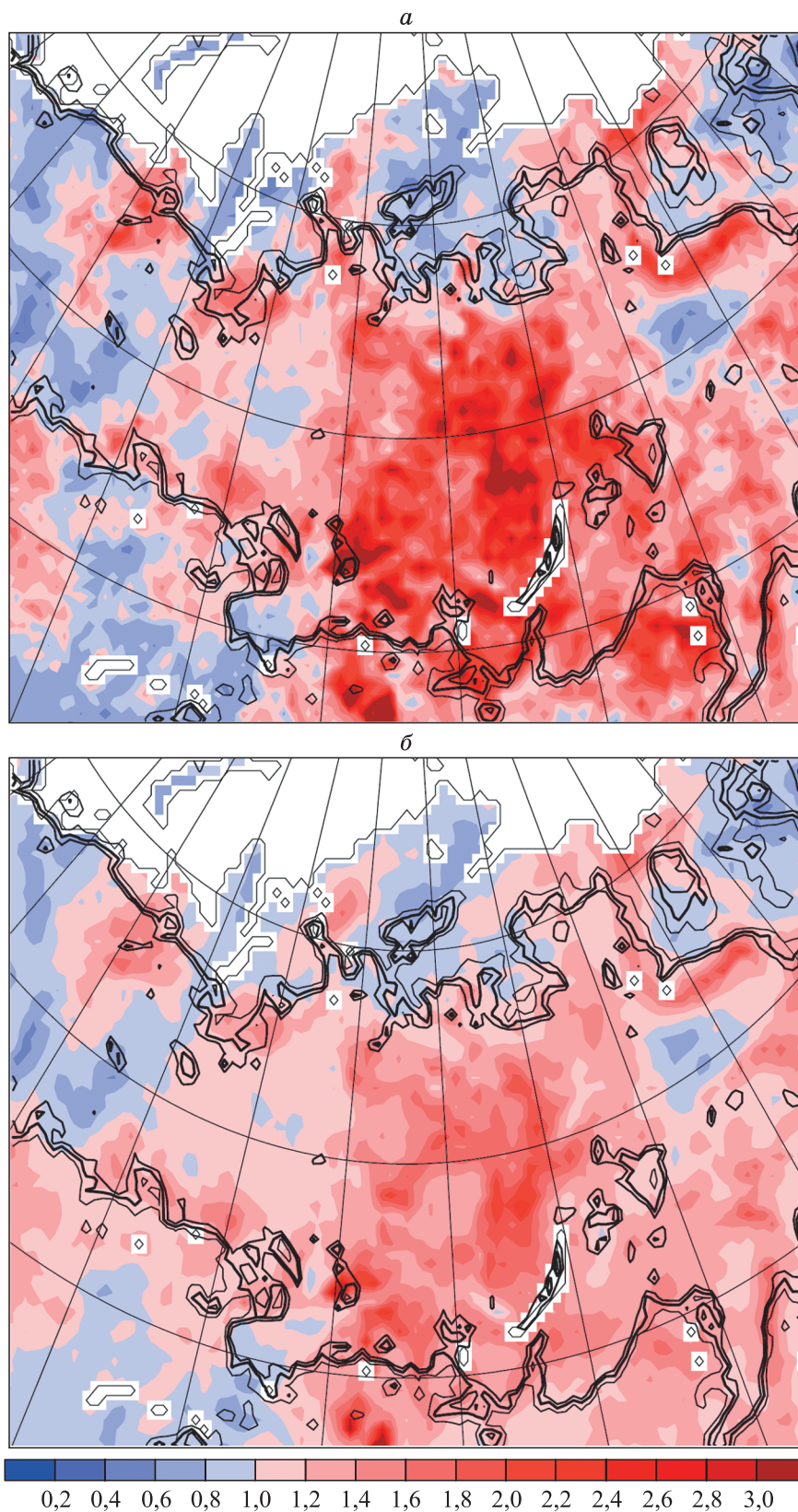


Рис. 2. Отношение среднего летнего индекса пожароопасности ( $I_{Fm}$ ) в середине XXI в. к среднему летнему индексу пожароопасности в конце XX в. ( $I_{Fm}(0)$ ) (а) и среднего летнего модифицированного индекса пожароопасности ( $I_{FMm}$ ) в середине XXI в. к среднему летнему модифицированному индексу пожароопасности в конце XX в. ( $I_{FMm}(0)$ ) (б). Границы областей с долей лесов см. на рис. 1.

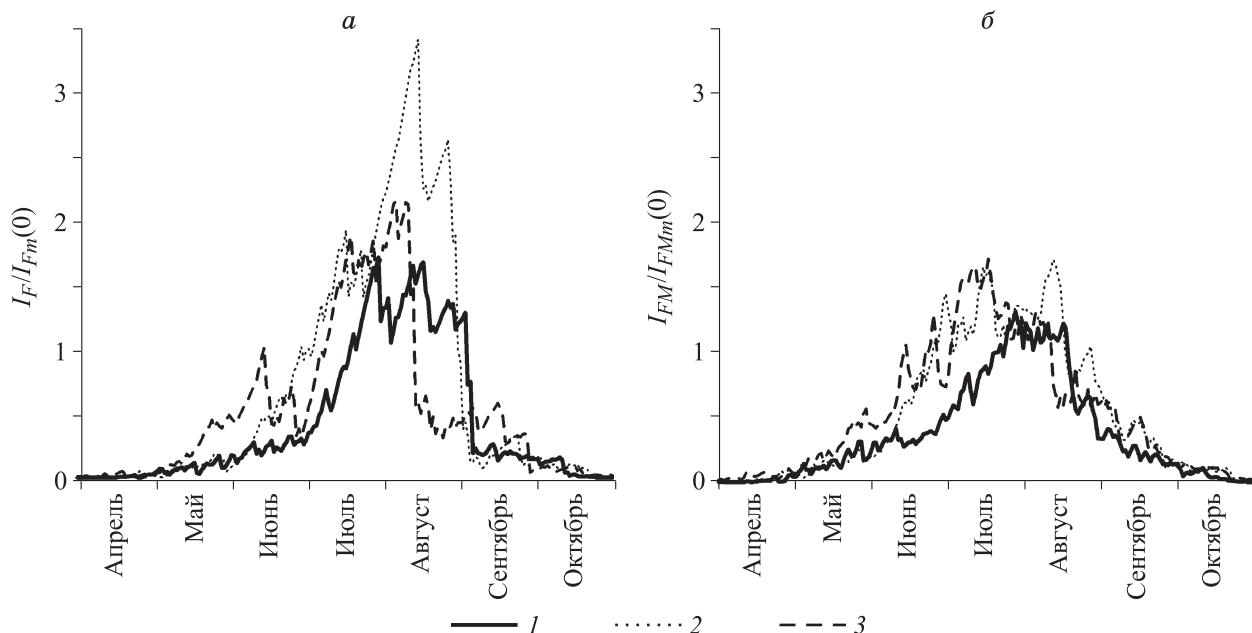


Рис. 3. Внутригодовое распределение (среднее за 10 лет) индекса пожароопасности Нестерова  $I_F$  (а) и модифицированного индекса  $I_{FM}$  (б), нормированных соответственно на  $I_{FM}(0)$  и  $I_{FMm}(0)$  в Забайкалье (51–53° с. ш., 110–115° з. д.) для различных периодов.

1 — 1991–2000 гг., 2 — 2041–2050 гг., 3 — 2091–2100 гг.

температура здесь может вырасти на 4–5 °С, тогда как в северных регионах рост не превышает 2–3 °С. Кроме того, в большинстве северных регионов проявляется увеличение осадков, поэтому риск пожароопасности здесь меняется слабо, а в отдельных из них даже уменьшается. Исключение составляет Северный Урал, где ожидается как рост температуры, так и уменьшение осадков и влажности воздуха. Здесь риск пожаров к концу XXI в. по модельным оценкам может увеличиться вдвое. При этом к середине XXI в. существенных изменений рисков пожароопасности относительно конца XX в. на севере Урала не прогнозируется.

Наряду с общей тенденцией увеличения риска летних лесных пожаров в Северной Евразии, в частности на АТР, при потеплении в XXI в. проявляется существенное увеличение длительности пожароопасного периода. Нами проанализированы внутригодовые распределения  $I_F$  и  $I_{FM}$  в Забайкалье (51–53° с. ш., 110–115° з. д.) (рис. 3). В конце XX в. пожароопасный период в этом регионе длился с июля по сентябрь. В XXI в., согласно модельным расчетам, он может начинаться на месяц раньше. Кроме того, проявляется относительный рост индексов пожароопасности — как стандартного, так и модифицированного. В частности, стандартный индекс пожароопасности (см. рис. 3, а) к середине XXI в. может вырасти относительно среднелетних значений конца XX в. в 3,5 раза. При этом пик пожароопасности будет приходиться на середину августа.

Подобные изменения связаны с ожидаемым резким сокращением сильных осадков (более 3 мм/сут) в этом регионе в данное время. В конце XXI в. существенного роста относительных значений стандартного индекса не прогнозируется. Пик пожароопасности сместится по сравнению с концом XX в. с августа на июль, в то же время в сентябре риск пожароопасности может снизиться до непожароопасного уровня, что связано с увеличением в регионе дней с сильными осадками. Исходя из вычислений с использованием модифицированного индекса (см. рис. 3, б), учитывающего осадки дифференцированно, указанной особенности не отмечено. Ожидается рост риска пожароопасности относительно современных значений и к середине, и к концу XXI в. При этом пик пожарной опасности смещается с августа на июль, а период увеличивается практически на месяц и начинается в мае, а не в июне.

## ВЫВОДЫ

В соответствии с полученными результатами, в XXI в. при глобальном потеплении на АТР следует ожидать существенного роста вероятности возникновения таких экстремальных природных явлений, как лесные пожары. В отдельных регионах, главным образом на юге, риск пожароопасности при достаточно агрессивном антропогенном сценарии уже к середине XXI в. может увеличиться втрое.

по сравнению с концом XX в. Наряду с ростом среднего летнего уровня пожароопасности проявляется увеличение длительности пожароопасного периода с тенденцией смещения пика пожароопасности с конца лета к середине.

Определяющим фактором риска пожароопасности, наряду с ростом температуры, является изменение режима увлажнения. В частности, по модельным расчетам из-за сокращения интенсивных осадков на юго-востоке и в центре АТР к середине XXI в. прогнозируется сильное увеличение стандартного индекса пожароопасности Нестерова (большее, чем к концу XXI в.). При использовании модифицированного индекса пожароопасности подобного нелинейного эффекта не наблюдается.

Следует отметить, что анализ проведен на основе модельных расчетов при достаточно агрессивном антропогенном сценарии SRES-A2. При более мягких сценариях рост риска пожароопасности для АТР может быть заметно слабее.

Проведенный анализ свидетельствует, что для оценки возможных изменений пожароопасной обстановки в XXI в. наряду со сравнительно простыми характеристиками пожароопасности типа стандартного индекса Нестерова необходимо использовать детальные индексы, в частности — более дифференцированно учитывающие распределение осадков.

При детальном анализе целесообразно брать во внимание не только характеристики метеорологического режима, но и различные режимы подстилающей поверхности и растительности, а также их трансформации при климатических изменениях. Наряду с характеристиками потенциальной пожароопасности необходимо учитывать влияние локальных антропогенных [19] и естественных (молниевая активность) воздействий на вероятность возникновения пожаров.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства образования и науки, РАН (07–05–00273-а, 08–05–00458-а, 08–05–00532-а, 09–05–92505-ИК\_а) и Научной школы (НШ-755.2008.5).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешко В. П., Голицын Г. С., Говоркова В. А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорол. и гидрол. — 2004. — № 4. — С. 38–49.
2. Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надёжина Е. Д., Шкляревич О. Б. К оценке изменений пожароопасной обстановки в лесах России при ожидаемом потеплении климата в XXI веке // Метеорол. и гидрол. — 2005. — № 3. — С. 36–44.
3. Мохов И. И., Чернокульский А. В., Школьник И. М. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. РАН. — 2006. — Т. 411, № 6. — С. 808–811.
4. Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надёжина Е. Д. и др. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий // Метеорол. и гидрол. — 2007. — № 3. — С. 14–24.
5. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Uvarov I. A. Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // Int. Journ. Remote Sens. — 2007. — Vol. 28. — P. 1397–1404.
6. Groisman P. Ya., Sherstyukov B. G., Razuvaev V. N. et al. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20th century // Global and Planet. Change. — 2007. — Vol. 56. — P. 371–386.
7. Mokhov I. I., Chernokulsky A. V., Shkolnik I. M., Tikhonov V. A. Extreme dry fire conditions for mid-latitude regions of Northern Eurasia: Analysis of observations, reanalyses and model simulations // The Intern. Symp. on Atmos. Physics and Chemistry. — China, Shandong, Qufu: IAP CAS, 2007. — P. 95–97.
8. Vygodskaya N. N., Groisman P. Ya., Tchebakova N. M. et al. Ecosystems and climate interactions in the boreal zone of northern Eurasia // Environ. Res. Lett. — 2007. — Vol. 2(4). — P. 045033.
9. Школьник И. М., Молькентин Е. К., Надёжина Е. Д. и др. Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в 21 веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО // Метеорол. и гидрол. — 2008. — № 5. — С. 5–15.
10. Chernokulsky A. V., Mokhov I. I. Forest fire conditions in Eurasian regions from model simulations // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. — Geneva: World Climate Res. Programme, 2008. — Rep. 38. — P. 07.07–07.08.
11. Mokhov I. I. Spring-summer climate extremes in Eurasian midlatitude regions // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. — Geneva: World Climate Res. Programme, 2005. — N 1276. — P. 02.07–02.08.
12. Мохов И. И., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э. и др. Изменения режимов засух и биопродуктивности наземных экосистем в регионах Северной Евразии по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом // Докл. РАН. — 2005. — Т. 405, № 6 — С. 810–814.
13. Мохов И. И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: Оценки для атмосферных блокингов // Докл. РАН. — 2006. — Т. 409, № 3. — С. 403–406.

14. **Kasischke E. S., Hyer E. J., Novelli P. C. et al.** Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide // *Global Biogeochem. Cycles*. — 2005. — Vol. 19. — P. GB1012.
15. **Sukhinin A. I., French N. H., Kasischke E. S. et al.** AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — Vol. 93. — P. 546–564.
16. **Нестеров В. Г.** Горимость леса и методы ее определения. — М.: Гослесбумага, 1949. — 76 с.
17. **Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М.** Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири // *Метеорол. и гидрол.* — 2007. — № 6. — С. 5–18.
18. **Solomon S., Qin D., Manning M. et al.** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. — Cambridge; New York: Cambridge Univer. Press, 2007. — 996 p.
19. **Venevsky S., Thonicke K., Sitch S., Cramer W.** Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study // *Global Change Biol.* — 2002. — Vol. 8. — P. 984–998.
20. **Жданко В. А.** Современные проблемы защиты лесов от пожаров. — М.: Лесн. пром-сть, 1965. — С. 53–86.
21. **Жданко В. А., Гриценко М. В.** Метод анализа лесопожарных сезонов: Практик. рекомендации. — Л.: Изд-во Ленингр. НИИ лесного хоз-ва, 1980. — 45 с.
22. **Hansen M., De Fries R., Townshend J. R. G., Sohlberg R.** Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier // *Intern. Journ. of Remote Sensing*. — 2000. — Vol. 21. — P. 1331–1365.
23. **Изменение** окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / Под ред. Н. П. Лаверова. — М.: Изд-во Ин-та геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2007. — 200 с.

*Поступила в редакцию 24 апреля 2009 г.*

УДК: 528.855(235.222)

**И. Д. ЗОЛЬНИКОВ\*, В. А. ЛЯМИНА\*, А. Ю. КОРОЛЮК\*\***

\*Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

\*\*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск

## **КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ГЕТЕРОГЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА**

*Представлена комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенного растительного покрова с использованием методов дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования. Выделение контуров растительности с помощью этих методов позволяет картографировать не только гомогенные, но и гетерогенные наземные экосистемы, а также вести мониторинг их динамики, поскольку изменения удельных площадей элементов территориальных единиц растительности и пограничных образований представляют собой чувствительные индикаторы изменений глобальных и региональных экологических факторов.*

*Ключевые слова: растительный покров, гетерогенность, территориальные единицы, дистанционное зондирование, геоинформационные технологии.*

*We present a comprehensive technology of mapping and monitoring the heterogeneous vegetation cover by the use of remote sensing and geoinformation-based modeling techniques. Identification of vegetation contours through the use of these techniques offers a means of mapping not only homogeneous but also heterogeneous terrestrial ecosystems as well as monitoring their dynamics, because changes in specific areas of elements of territorial vegetation units and border formations represent sensitive indicators of changes of global and regional ecological factors.*

*Keywords: vegetation cover, heterogeneity, territorial units, remote sensing, geoinformation technologies.*

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

При проведении исследований природных систем какой-либо территории мы сталкиваемся с их пространственной неоднородностью. Существует широкий набор методов ее описания и анализа, в первую очередь в рамках картографических направлений отдельных наук. В картографировании ландшафтов, растительного и почвенного покрова разработан широкий арсенал методов изучения гетерогенных образований [1–4]. В последние десятилетия в изучении пространственной организации

© 2010 **Зольников И. Д.** (zol@uiggm.nsc.ru), **Лямина В. А.** (balandis@uiggm.nsc.ru), **Королук А. Ю.** (akorolyuk@rambler.ru)