

УДК 630, 614.841.2+551.583

## ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ В ГОРАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ К СЕРЕДИНЕ ВЕКА ПО СЦЕНАРИЯМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА CMIP6

Е. И. ПАРФЕНОВА \*, Н. М. ЧЕБАКОВА \*\*

*Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирское отделение РАН,  
Красноярск, Россия*

Для оценки потенциальной пожарной опасности по условиям погоды в регионе гор Южной Сибири (80–110° в.д. и 50–58° с.ш.) использована корреляционная зависимость числа дней с высокой пожарной опасностью (индекс Нестерова более 1000) от гидротермического коэффициента (ГТК), равного отношению количества осадков к суммам температур за месяц. На основе прогнозных расчетов ГТК за 2040–2060 гг. по климатической модели INM-CM5-0 для мягкого (ssp 126) и жесткого (ssp 585) сценариев CMIP6 были получены картосхемы распределения “горячих точек”, отражающих степень повышения засушливости климата и увеличения числа дней с высокой пожарной опасностью с фокусом на горные леса.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.473>

**Keywords:** hydrothermic coefficient, Nesterov index of fire danger, GCM INM-CM5-0, climate scenarios ssp 126 and ssp 585, mountain forests.

**Введение.** В последние десятилетия актуальной темой для лесных экологов является прогноз возможных изменений лесного покрова под воздействием текущих и прогнозируемых изменений климата. По мере появления моделей и сценариев изменения климата в научном сообществе появилось множество публикаций, прогнозирующих изменения ареалов отдельных видов растений и животных [1–6]. Следует отметить, что этому способствовало как развитие инструментов моделирования (BIOCLIM, MaxEnt, Random Forest и т.п.) [6–7], так и появление легкодоступных глобальных баз климатических слоев для настоящего, прошлого и будущего климатов (WorldClim) [8]. При естественных скоростях миграции растений, особенно древесных эдификаторов лесных сообществ, растительность может не успевать мигрировать за быстрыми текущими изменениями климата. В этом случае роль драйверов-ускорителей могут сыграть биотические, абиотические и антропогенные факторы нарушений. Одним из таких главных факторов являются пожары [9–11], отнести которые к природным или антропогенным факторам до сих пор является дискуссионным. В последние десятилетия в бореальных лесах

\* E-mail: [lyeti@ksc.krasn.ru](mailto:lyeti@ksc.krasn.ru)

\*\* E-mail: [ncheby@ksc.krasn.ru](mailto:ncheby@ksc.krasn.ru)

Северной Евразии наблюдается увеличение частоты пожаров и площадей, пройденных пожарами [12]. Это явление связывается с глобальным и региональным потеплением климата. В Сибири наибольшим разнообразием типов растительности характеризуются горы Южной Сибири [3, 11, 13], где в высотном-поясном спектре представлены тундры, степи и разнообразные типы лесов, до сих пор являющиеся рефугиумами элементов неморальной флоры.

В регионе гор Южной Сибири по данным [14] ежегодно под воздействие пожаров попадают около 1 млн га, четверть из которых являются лесами. Различные типы леса характеризуются различной пожарной опасностью вследствие приуроченности к различным климатическим условиям обитания, что выражается в характерных межпожарных интервалах [11]. Наибольшие межпожарные интервалы (более 100 лет) характерны для темнохвойных (кедрово-пихтовых) лесов; наименьшие – для светлохвойных (сосновых и лиственничных – 20–30 лет). Самая высокая частота пожаров характерна для степей.

Для появления и развития пожара растительности необходимо сочетание трех главных условий, так называемый “пожарный треугольник” (<https://ognebarer.ru/statyi/model-pozharnyj-treugolnik>):

- 1) выполнение условий пожарной опасности по условиям погоды, что выражается в развитии/накоплении засушливых погодных условий;
- 2) наличие и определенная степень пожарного созревания горючих материалов (подстилки, ветоши, хвойных молодняков, сухостоя и т.п.);
- 3) наличие источников воспламенения (молнии, искры, костры и т.п.).

Отсюда следует, что прогнозные биоклиматические модели изменения потенциальных ареалов зообиомов и отдельных видов растений должны включать блок прогноза пожарной опасности по условиям погоды.

Целью настоящей работы является – спрогнозировать изменение пожарной опасности по условиям погоды для растительности региона гор Южной Сибири к середине текущего века.

#### Материалы и методы.

**География.** Район наших исследований – горы Южной Сибири, расположенные на водоразделе рек Северного Ледовитого и Тихого океанов и водосборных бассейнов Северной Азии в пределах окна 80–110° в.д. и 50–58° с.ш. (рис. 1). Их широтная протяженность превышает 2000 км и характеризуется сложной орографией с самой высокой вершиной горы Белуха, 4505 м над у.м. [15].

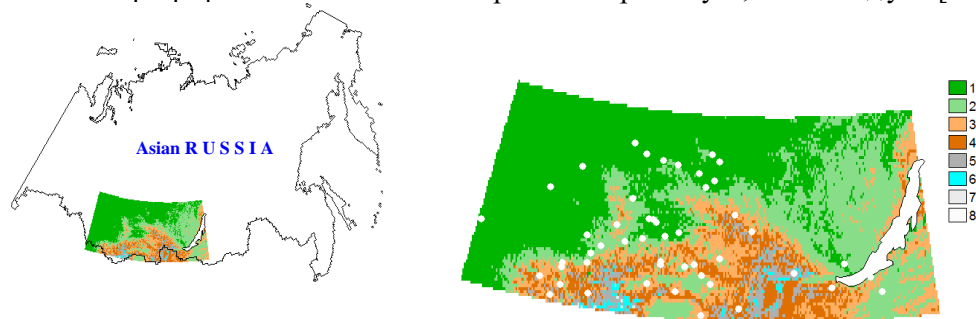


Рис. 1. Орография гор Южной Сибири (м над у.м.): 1 – <500; 2 – 500–1000; 3 – 1000–1500; 4 – 1500–2000; 5 – 2000–2500; 6 – 2500–3000; 7 – 3000–3500; 8 – >3500; белые точки – метеостанции для расчета.

*Климат.* Климат гор Южной Сибири определяется их положением в центре Евразийского континента и в целом характеризуется как континентальный и умеренно холодный. Сложная орография гор создает большое разнообразие климатических условий. В межгорных впадинах климат резко континентальный с годовой амплитудой температур около 60°C и индексом континентальности Конрада 90–100. На возвышенностях континентальность снижается до 60 на западе и до 80 на востоке региона [11, 15]. В котловинах также отмечаются самые низкие зимние и самые высокие летние температуры: средняя температура января достигает –38°C, средняя температура июля 25°C. На возвышенностях зимние температуры повышаются, а летние понижаются. Летом с усилением циклонической деятельности ежемесячное количество осадков увеличивается с максимумом в июле. Наибольшее количество осадков выпадает на наветренных северо-западных макросклонах с максимальными годовыми суммами 1500–1700 мм на вершинах. Меньше осадков выпадает на подветренных южных и юго-восточных макросклонах, снижаясь от 600–800 мм на возвышенностях и до 200 мм в межгорных котловинах. Зимние осадки в виде снежного покрова составляют минимум 5 см в котловинах подветренных склонов и максимум 200 см на наветренных высокогорьях.

*Растительность.* Различные климатические условия региона исследований создают разнообразие растительности, в частности лесной, получившее в российской классификации растительности [11, 13] термин “высотнопоясной комплекс растительности” (ВПК). Взаимодействие западных ветров, приходящих с Атлантики, и местной орографии создает четыре фации, основанные на различиях в режимах увлажнения и континентальности в горах Южной Сибири. Каждый экорегион характеризуется особенной структурой растительности и высотной поясностью. Для первого экорегиона с избыточно влажным климатом, расположенного на наветренном макросклоне, характерно преобладание темнохвойных лесов из *Pinus sibirica* и *Abies sibirica*. Во втором экорегионе влажного климата, расположенном на переходе между наветренными и подветренными макросклонами, на возвышенностях доминируют темнохвойные виды – кедр сибирский и пихта сибирская, на средних высотах – кедр с примесью сосны обыкновенной, а в низкогорье – лиственница сибирская. Третий экорегион умеренно влажного климата расположен на подветренных макросклонах с темнохвойным кедром в высокогорьях и со светлохвойной лиственницей, преобладающей в низкогорьях. В четвертом экорегионе недостаточно влажного климата, расположенном на подветренном макросклоне, до высоты 1200 м преобладает степь, которую сменяют лиственничные леса на высотах 1200–1600 м над у.м. [11, 13].

*Климатические слои базового климата* были созданы с помощью модулей *splina* и *lapgrd* программы ANUSPLIN путем сплайновой интерполяции [16] данных метеостанций региона из Справочников по климату СССР [17] и сайта ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)). За базовый период был принят период 1961–1990 гг.

*Слои будущего климата к 2050 г.* были построены по данным модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) INM-CM5-0 Института вычислительной математики РАН [18], единственной российской МОЦАО, вошедшей в базу данных IPCC [19]. Нами были взяты два крайних сценария:

ssp126 (мягкий, предполагающий переход на зеленую энергетику) и ssp585 (жесткий, предполагающий использование ископаемого топлива). Аномалии климатических показателей были рассчитаны как разница между средними за период 2040–2060 гг. (2050-е г.) и средними базового климата (1961–1990 гг.) по данным INM-CM5-0 и проинтерполированы в программе TerrSet (<https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/terrset/>) для пикселя с размером  $0,25^\circ$  (около 20–25 км). Среднемесячные значения температур и количества осадков к 2050 г. были рассчитаны путем суммирования аномалий показателей с базовыми показателями за 1961–1990 гг. Подробнее расчет аномалий будущего климата описан в [3].

*Расчет гидротермического коэффициента (ГТК), представляющего собой отношение суммы осадков за месяц к сумме положительных температур этого месяца, для каждого месяца вегетационного периода производился для пикселей с положительной температурой (рис. 2). Для каждого месяца вегетационного периода рассчитывался усредненный показатель ГТК для территории, пригодной для лесной растительности (рис. 3). В биоклиматических моделях высотно-поясных комплексов растительности эта территория ограничивается суммой градусо-дней выше  $300^\circ\text{C}$  и индексом сухости  $<3,5$ . Подробная характеристика климатических параметров ВПК описана в [3].*

*Показатели пожарной опасности по условиям погоды.* В лесопожарной практике существует несколько показателей, характеризующих степень пожарной опасности на основе текущих метеоданных. Самым известным из них является показатель Нестерова [20], представляющий из себя сумму произведений разностей температуры и точки росы в  $13^{00}$  дня, умноженную на температуру воздуха, накапливающуюся после выпадения осадков и обнуляемую следующим выпадением осадков. При этом величины показателя Нестерова в диапазоне 1000–4000 показывают пожарную опасность III степени, а более 4000 – IV степени. Малевский-Малевич и др. [21] нашли зависимость, связывающую количество дней в месяце, имеющих погодный показатель высокой пожарной опасности Нестерова и ГТК, основанный на среднемесячных температуре и осадках, что дает возможность прогнозировать ГТК, а следовательно, и показатель Нестерова:

$$N = \exp((3,233 - 1,21 X + 0,255 X^2) / (1 - 0,236 X + 0,1353 X^2)),$$

где  $X$  – ГТК данного месяца;  $N$  – число дней с высокой пожарной опасностью в данном месяце.

Эта эмпирическая зависимость была также проверена авторами [21] для Южной Сибири. Мы рассчитали показатель Нестерова для базового периода 1961–1990 г.г. и для прогнозного периода 2050-х на основе ГТК. Для каждого месяца вегетационного периода также рассчитывался усредненный показатель числа дней с высокой пожарной опасностью для территории, потенциально пригодной для лесной растительности.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Ранее было установлено, что потепление в середине века приведет к значительному сокращению холодных ВПК – горных тундр, субальпийского и подгольцового редколесий. Темнохвойная тайга частично перейдет в черневую на своей нижней границе,

а, в свою очередь, в нижней части черневой тайги создадутся условия для появления элементов широколиственных лесов [3].

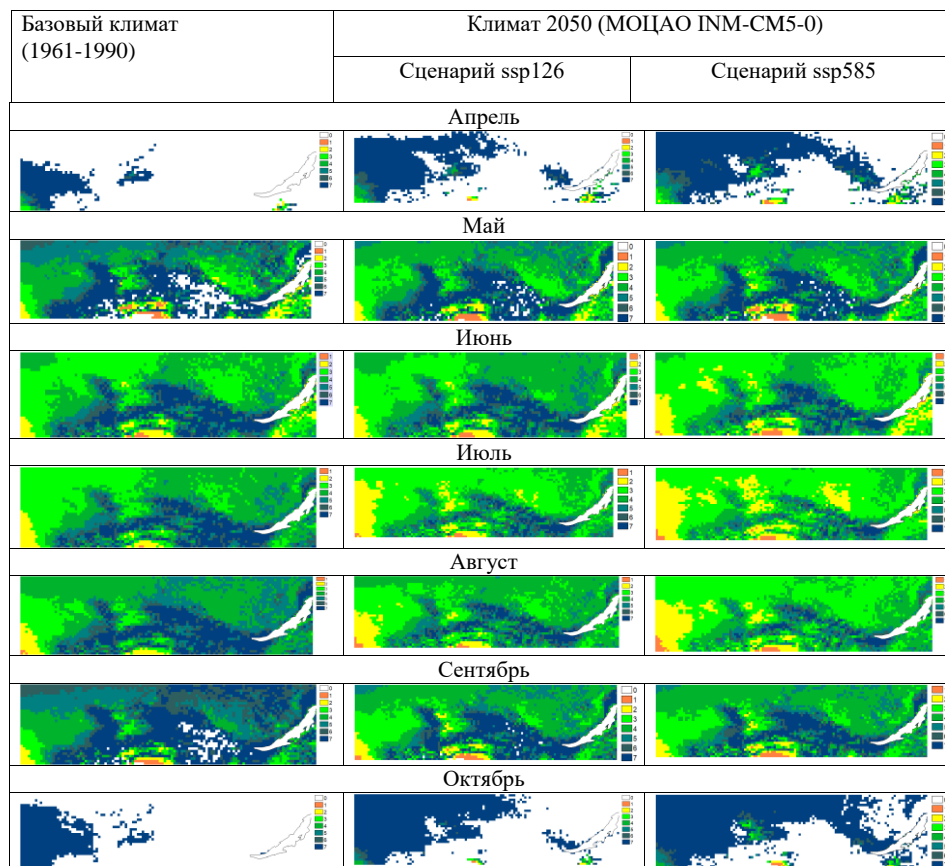


Рис. 2. Изменение ГТК в течение теплого периода в текущем климате (слева), при потеплении умеренном (в центре) и экстремальном (справа) в лесной области гор Южной Сибири. Обозначения классов ГТК: 0 – область отрицательных температур; 1 – ГТК < 0,5; 2 – 0,5–1,0; 3 – 1,0–1,5; 4 – 1,5–2,0; 5 – 2,0–2,5; 6 – 2,5–3,0; 7 – >3,0.

Результаты наших вычислений можно подразделить на два блока: оценка изменений ГТК по месяцам теплого периода в пространстве и во времени (рис. 2 и 3 слева) и оценка числа дней с высокой пожарной опасностью (рис. 3 справа, рис. 4) на территории гор Южной Сибири к 2050 г. при умеренном и экстремальном сценариях потепления. По обоим сценариям ssp126 и ssp585 МОЦАО INM-CM5-0 к середине текущего века прогнозируется небольшое увеличение засушливости, выраженное в снижении ГТК, особенно для июля и августа (рис. 2, 3).

Динамика пожарной опасности по месяцам вегетационного периода, выраженная числом дней с высокой пожарной опасностью и их аномалий для будущего климата, показана на рис. 4; для лесной области – на рис. 3 (справа).

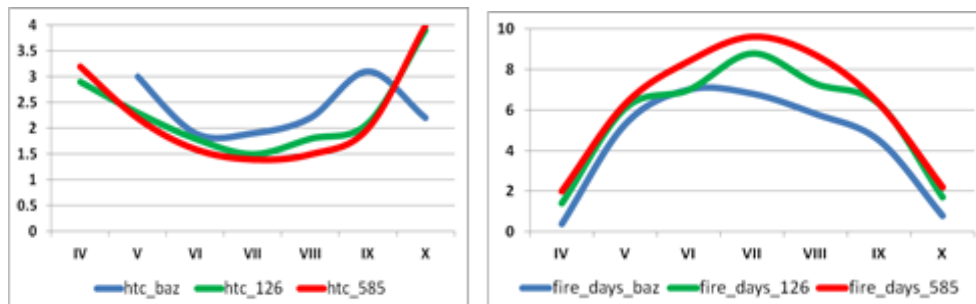


Рис. 3. Динамика ГТК (слева) и числа дней с высокой пожарной опасностью (справа) за теплый период в текущем климате (синий), при умеренном потеплении (зеленый) и экстремальном потеплении (красный) в лесной области гор Южной Сибири.

Базовый климат (1961-1990)	Климат 2050 (МОЦАО INM-CM5-0)	
	Сценарий ssp126	Сценарий ssp585
Апрель		
Май		
Июнь		
Июль		
Август		
Сентябрь		
Октябрь		

Рис. 4. Динамика числа дней с высокой пожарной опасностью в течение теплого периода в текущем климате (слева) и его аномалии при потеплении умеренном (центр) и экстремальном (справа) сценариям в лесной области гор Южной Сибири. Обозначения классов аномалий: 1 – (–10–5); 2 – (–5–0,5); 3 – (–0,5–0,5); 4 – 0,5–5,0; 5 – 5,0–10,0; 6 – 10,0–15,0; 7 – 15,0–20,0; 8 – >20,0.



Мониторинг реальных пожарных событий в регионе гор Южной Сибири, основанный на данных дистанционного зондирования [14], показывает, что наиболее пожароопасными месяцами вегетационного периода (апрель–октябрь) являются май–июнь. В наших расчетах для лесной территории таким месяцем для базового периода оказался июнь. Для будущего климата максимум пожарной опасности перемещается на июль. Суммарное число дней с высокой пожарной опасностью за вегетационный период для лесного пространства региона увеличивается на 8 дней при мягком сценарии и на 11 дней при жестком. Следует отметить, что наши расчетные оценки числа дней с высокой пожарной опасностью за сезон оказались в диапазоне реально наблюдаемых значений в Алтае-Саянском горно-таежном районе [9].

Расчетное число дней с высокой пожарной опасностью (левый столбец рис. 4) варьировало по территории в следующих пределах: апрель 0–20,5; май – 0–24,7; июнь – 3,0–20,1; июль – 3,0–19,6; август – 3,0–19,5; сентябрь – 0,0–24,9; октябрь – 0,0–5,5. Высокие значения показателя в апреле, мае и сентябре характерны для степной зоны, вследствие чего степные пожары могут представлять опасность и для граничащих с ними лесостепных насаждений. Для лесного пространства, как видно из рис. 3 (справа), значения этого показателя не достигают 10 дней.

В будущем климате в связи с умеренным увеличением засушливости, что демонстрирует снижение ГТК, произойдет увеличение числа дней с высокой пожарной опасностью на большей территории региона в пределах 1–5 дней, в зависимости от сценария, месяца и местоположения (рис. 4, центральный и правый столбцы).

**Заключение.** Расчет показателей пожарной опасности по условиям погоды открывает большие перспективы в отношении прогнозов пожарной опасности в лесах горных регионов. При этом дальнейшие исследования должны быть направлены на учет, как топографических особенностей выделов (экспозиции и крутизны), так и породно-возрастного состава насаждений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке базового проекта FWES-2024-0023.*

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 01.06.2025

Утверждена 15.08.2025

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власенко В.А., Турмунх Д. и др. Моделирование ниши и особенности распространения копробионтных грибов в Азии на примере *Suillus stercorius*. Самарский научный вестник 10 (2021), 41–46.  
<https://doi.org/10.17816/snv2021103105>
2. Исаев А.П., Борисов Б.З., Никифорова Е.Н. Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии. Природные ресурсы Арктики и Субарктики 24 (2019), 121–133.  
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-11>

3. Парфенова Е.И., Чебакова Н.М. Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Северной Монголии в связи с прогнозируемыми изменениями климата к середине века. *Изв. РАН, сер. геогр.* **87** (2023), 1–13.  
<https://doi.org/10.31857/S2587556623070129>
4. Санданов Д.В., Дугарова А.С., Селютин И.Ю. Моделирование распространения видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC. на территории Центральной Азии при климатических изменениях в прошлом и будущем. *Вестник Томского государственного университета. Биология* **52** (2020), 85–104.  
<https://doi.org/10.17223/19988591/52/5>
5. Parfenova E., Bazhina E., et al. Potential Changes in Distribution of Major Conifers and Their Seed Mass across Siberia by the Mid-Twenty-First Century in a Warming Climate. *Forests* **15** (2024), 1691.  
<https://doi.org/10.3390/f15101691>
6. Petrenko T.Y., Korznikov K.A., et al. Modeling of Cold-Temperate Tree *Pinus Koraiensis* (Pinaceae) Distribution in the Asia-Pacific Region: Climate Change Impact. *Forest Ecosystems* **9** (2022), 100015.  
<https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100015>
7. Elith J., Phillips S.J., et al. A Statistical Explanation of MaxEnt for Ecologists. *Diversity and Distributions* **17** (2011), 43–57.
8. Hijmans R.J., Cameron S.E., et al. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *Int. J. Climatology* **25** (2005), 1965–1978.  
<https://doi.org/10.1002/joc.1276>
9. Буряк Л.В., Кукавская Е.А. и др. Оценка пожарной опасности и ее динамики в лесных районах Сибири. *Лесоведение* **4** (2021), 339–353.  
<https://doi.org/10.31857/S0024114821040033>
10. Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н. и др. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем. *Вопросы лесной науки* **4** (2021), 1–76.  
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11>
11. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. *Климат и горные леса Южной Сибири*. Новосибирск, Наука (1986), 225.
12. Tyukavina A., Potapov P., et al. Global Trends of Forest Loss Due to Fire from 2001 to 2019. *Front. Remote Sens.* **3** (2022), 825190.  
<https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190>
13. Назимова Д.И., Молокова Н.И., Джансеитов К.К. Высотная поясность и климат в горах Южной Сибири. *География и природные ресурсы* **2** (1981), 68–78.
14. Shvetsov E.G., Golyukov A.S., Kharuk V.I. Long-Term Dynamics of Forest Fires in Southern Siberia. *Contemporary Problems of Ecology* **16** (2023), 205–216.  
<https://doi.org/10.1134/S1995425523020154>
15. Михайлов Н.И. *Горы Южной Сибири*. Москва, Географиз (1961), 238.
16. Hutchinson M.F. *ANUSPLIN version 4.3*. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University (2011). Available at 05.09.2024  
<http://fennergsschool.anu.edu.au/research/products/anusplin>
17. *Справочник по климату СССР*. Вып. **17**, 20–24. Ч. I–IV. Ленинград, Гидрометеиздат (1967–1970).  
<http://www.pogodaiklimat.ru; www.meteo.ru> (05.09.2024).
18. Володин Е.М. Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CM5-0. *Метеорология и гидрология* **5** (2022), 5–13.
19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, Cambridge University Press (2023), 3–32.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
20. Приказ Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 “Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды”. Москва, Рослесхоз (2011).
21. Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К. и др. К оценке изменения пожароопасной обстановки в лесах России при ожидаемом потеплении климата в веке. *Метеорология и гидрология* **3** (2005), 36–44.



Ե. Ի. ՊԱՐՖՅՈՆՈՎԱ, Ն. Մ. ՉԵԲԱԿՈՎԱ

**ՀԱՐԱՎԱՅԻՆ ՍԻԲԻՐԻ ԼԵՈՆԵՐՈՒՄ ՀՐԴԵՀԱՅԻՆ ՎՏԱՆԳԻ  
ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԴԱՐԻ ԿԵՍԵՐԻՆ՝ ԸՍՏ CMIP6 ԿԼԻՄԱՅԻ  
ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ՍՑԵՆԱՐՆԵՐԻ**

**Ամփոփում**

Հարավային Սիբիրի լեռնային շրջաններում (արլ. երկ. 80–110° և հս. լ. 50–58°) եղանակային պայմաններով պայմանավորված հրդեհավտանգ պոտենցիալի գնահատման համար օգտագործվել է բարձր հրդեհավտանգ օրերի թվի (Նեստերովի ինդեքսը՝ 1000-ից ավելի) և հիդրոթերմիկական գործակցի (ՀԹԳ) միջև կոռելյացիոն կապը: ՀԹԳ-ն հաշվարկվում է որպես տեղումների քանակի և ամսական ջերմաստիճանների գումարի հարաբերակցություն: 2040–2060 թվականների համար INM-CM5-0 կլիմայական մոդելով կատարված հիդրոթերմիկ գործակցի (ՀԹԳ) կանխատեսումների հիման վրա՝ ըստ CMIP6-ի մեղմ (ssp126) և խիստ (ssp585) սցենարների, կազմվել են «թեժ կետերի» բաշխման քարտեզներ: Դրանք արտացոլում են կլիմայի չորության մակարդակի բարձրացումն ու բարձր հրդեհավտանգ օրերի թվի ավելացումը՝ հատուկ ուշադրություն դարձնելով լեռնային անտառների վրա:

E. I. PARFENOVA, N. M. TCHEBAKOVA

**FIRE DANGER ASSESSMENT IN THE SOUTH SIBERIAN MOUNTAINS  
BY THE MIDCENTURY FROM CLIMATE CHANGE  
SCENARIOS CMIP6**

**Summary**

To evaluate potential fire danger based on weather conditions the region of South Siberia's Mountains (80–110° E and 50–58° N) we used a correlation relationship between a number of days with high fire danger (Nesterov Index > 1000) and the hydrothermal coefficient (HTC) of Selyaninov (Malevsky-Malevich et al., 2005), which is a ratio of monthly temperature to precipitation. Based on predicted HTC at 2040–2060 derived from the climate model INM-CM5-0 and moderate (ssp 126) and extreme (ssp 585) scenarios of CMIP6, “hot spots” of dryer climates and increased numbers of days with high fire danger were mapped across the study region with a focus on mountain forests.