

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

УДК 532.5.013

Влияние модельного пожара на характеристики турбулентности в атмосфере

Е.Л. Лобода^{1,2}, А.В. Луценко^{1,2}✉, Д.П. Касымов^{1,2},
М.В. Агафонцев^{1,2}, И.А. Колесников^{1*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.;

после доработки 27.06.2023 г.;

принята к печати 18.08.2023 г.

Представлен анализ и обобщение результатов исследований турбулентности в пламени и в окрестности очага горения при модельных степных и верховых пожарах в экспериментах, проведенных в период с 2019 по 2022 г. на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы СО РАН. Получены спектры изменения температуры воздуха и масштабы индуцированной атмосферной турбулентности в окрестности фронта модельного пожара. Установлены диапазоны частот пульсации температуры воздуха, соответствующие инерционному и диссипативному участкам энергетического спектра, для модельного степного пожара. Показано, что диссипативные процессы начинают формироваться на высоте 10 м при волновых числах k таких, что $\lg k > 1,58$, и соответствующей частоте пульсаций $f > 3$ Гц; на высоте 3 м диссипативные процессы не наблюдаются. При модельном верховом пожаре на высоте 10 м турбулентные процессы в атмосфере соответствуют инерционному участку энергетического спектра, а диссипативные процессы практически не проявляются.

Ключевые слова: природный пожар, верховой пожар, турбулентность, масштабы турбулентности, атмосфера, горение, диссипация; wildland fire, crown fire, turbulence, turbulence scale, atmosphere, combustion, dissipation.

Введение

Природный пожар является одной из самых крупных природных катастроф, которая влечет за собой серьезные последствия: загрязнение воздуха, уничтожение экосистем и биоразнообразия, деградацию лесов и экономические потери. Прогнозируемое рядом ученых и организаций глобальное изменение климата может привести к увеличению частоты лесных пожаров и длительности пожароопасного сезона, а следовательно, к росту числа крупных и катастрофических пожаров, расширению ареала их распространения и долгосрочной деградации лесорастительных условий [1]. Пожары оказывают влияние на радиационный фон, облачность, качество воздуха и климат в региональном и глобальном масштабах [2–4].

При горении выделяется значительное количество тепловой энергии, а интенсивные турбулентные

процессы в пламени природного пожара формируют турбулентность в конвективной колонке над очагом горения [5]. Это сказывается на метеорологических параметрах, а именно на скорости ветра, индуцированной атмосферной турбулентности, изменениях температуры и относительной влажности воздуха. Крупные лесные пожары формируют «собственный ветер», который, в свою очередь, стимулирует распространение пожара и препятствует его прекращению [6]. Также следует отметить, что массовые природные пожары сопровождаются устойчивыми антициклонами [7–9], которые препятствуют формированию и выпадению осадков. Большой выброс тепловой энергии при крупных пожарах, сопровождающийся турбулентными процессами, оказывает влияние на динамику атмосферных процессов, а в совокупности с выбросом оксида углерода и мелких аэрозолей — на глобальные климатические процессы. Изменения метеопараметров напрямую влияют на перенос газообразных продуктов горения, дыма и аэрозоля. Исследования в этой области ведутся с помощью как экспериментальных методов [10–12], так и математических моделей [13–16].

В зарубежных работах для моделирования природных пожаров часто используется модель [17],

* Егор Леонидович Лобода (loboda@mail.tsu.ru); Анастасия Владимировна Луценко (lu.anastasik@gmail.com); Денис Петрович Касымов (denkasymov@gmail.com); Михаил Владимирович Агафонцев (kim75mva@gmail.com); Иван Александрович Колесников (ia.kolesnikov@mail.ru).

разработанная на основе теории лесных пожаров А.М. Гришина [6]. Однако эта модель, как и [6], не описывает процесс формирования индуцированной атмосферной турбулентности.

Несмотря на разносторонние исследования влияния природных пожаров на экологию и состояние воздуха [18–20], до сих пор отсутствуют понимание комплексности явления и теоретические модели влияния пожаров на глобальные климатические процессы, связанные с изменениями климата как в локальном, так и в глобальном масштабах. Очевидно, что влияние природных пожаров на климат обусловлено не только изменениями ландшафта и биогеоценозов [21–22], но и физико-химическими процессами, протекающими как в зоне пожара, так и в атмосфере в результате выделения значительного количества энергии, газообразных и конденсированных продуктов горения.

В работе [23] представлены результаты экспериментальных исследований турбулентности в пламени и воздухе в окрестности фронта горения. Для анализа турбулентной структуры в пламени применяется обработка последовательности изображений в видимом диапазоне длин волн, выделяются яркие области в пламени, которые авторы сопоставляют с турбулентными структурами по аналогии с тем, как в работе [24] доказываются соответствие аналогичных структур в поле термодинамических и гидродинамических параметров с применением методов ИК-термографии и измерения скорости по изображениям частиц (particle image velocimetry – PIV). Следует заметить, что авторы [23], используя имеющееся у них оборудование, по сути, пытаются применять на кустарниковых пожарах подходы, полученные в результате многолетней совместной работы коллективов Томского государственного университета и Института оптики атмосферы СО РАН [5, 24–26].

Томский государственный университет совместно с Институтом оптики атмосферы СО РАН в течение многих лет исследует пожары в различных условиях, в том числе приближенных к натурным, на полигоне [25, 26]. В результате накоплены значительный опыт и знания как по организации и проведению таких исследований, так и по получению данных о характеристиках фронта природного пожара, его возникновению и распространению, влиянию пожара на метеопараметры, характеристики турбулентности в атмосфере, выбросах и переносе продуктов горения [26].

Цель работы – исследовать влияние степного и верхового лесных пожаров на формирование индуцированной атмосферной турбулентности в окрестности очага горения.

Описание экспериментов

Эксперименты проводились с 2019 по 2022 г. на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) ИОА СО РАН [5, 25]. Для моделирования степного пожара выбирались участки растительности размерами 15 × 3 м, а верхового пожара – 10 × 4 м. При

моделировании верхового пожара полог леса реконструировался из сосен высотой 4–5 м с естественным влагосодержанием ($w = 114\%$), заготовленных во время проведения рубок ухода на территории Томской области. Влагосодержание подстилки во всех экспериментах было естественным ($w = 6,08–21,83\%$). Формирование верхового пожара осуществлялось путем поэтапного перехода низового пожара на подрост и кустарники, а потом на кроны деревьев [5]. Схема экспериментальных участков и расположения измерительного оборудования приведена на рис. 1.

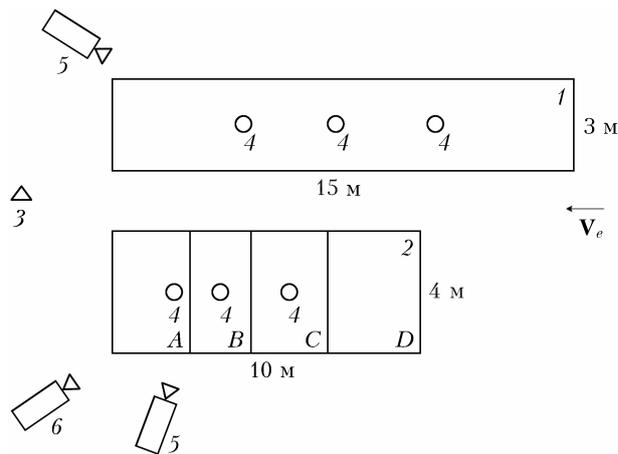


Рис. 1. Схема экспериментальных участков и расположения измерительного оборудования при моделировании степного (1) и верхового пожара (2): 3 – мачта; 4 – термопары; 5 – ИК-камера; 6 – видеокамера; A – полоса зажигания; B – «разгонный участок» низового пожара; C – участок подроста и кустарников; D – модельный полог леса

Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанций (ультразвуковая метеостанция АМК-03), размещаемых на мачте на высоте 3 и 10 м, с частотой дискретизации по времени до 70 Гц. Температура воздуха T варьировалась в пределах 275–278 К. Относительная влажность воздуха ϕ изменялась от 42 до 44%; атмосферное давление P_e – от 713 до 730 мм рт. ст. Скорость ветра варьировалась в диапазоне 1–6 м/с. Программное обеспечение метеостанций АМК-03 позволяло оценивать значения структурных постоянных флуктуации температуры C_T^2 , скорости ветра C_V^2 , а также показателя преломления воздуха C_n^2 , полученного оптическим и акустическим способами, которые рассчитывались по следующим выражениям [27]:

$$C_T^2 = \left\langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \right\rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}, \quad (1)$$

$$C_{na}^2 = \frac{C_T^2}{(2\langle T_k \rangle)^2} + \frac{C_V^2}{\langle c \rangle^2}, \quad (2)$$

$$C_{no}^2 = \left[8 \cdot 10^{-5} \frac{\langle P \rangle}{\langle T_k \rangle^2} \right]^2 C_T^2, \quad (3)$$

$$C_V^2 = \left\langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \right\rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}, \quad (4)$$

где C_{na}^2 – структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления; C_{no}^2 – структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления; T' – значение турбулентной пульсации температуры, °С; t – текущий момент времени, с; Δt – временной интервал между измерениями мгновенных значений метеовеличин, с; V_m – модуль среднего вектора скорости ветра, м/с; $\langle \rangle$ – символ статистического усреднения; T_k – температура воздуха, К; c – скорость звука, м/с; P – атмосферное давление, гПа; u' – значение турбулентной пульсации скорости ветра, м/с.

Поле температур во фронте пожара и структура пламени контролировались при помощи ИК-камеры JADE J530SB с частотой съемки 50 кадров/с в узком спектральном интервале 2,5–2,7 мкм. Выбор спектрального интервала обусловлен спектром излучения основных продуктов горения пламени [26]. Для корректировки коэффициента излучения пламени и контроля распространения фронта пожара внутри экспериментальной полосы размещались стойки с термодатчиками ХА (хромель-алюмель) типа К. На рис. 2 приведены фотографии и ИК-изображения верхового и степного пожаров.

Результаты и обсуждение

Анализ ИК-термограммы фронта верхового и степного пожаров показывает, что горение носит нестационарный характер и сопровождается турбулентными процессами, которые присутствуют как в термодинамической, так и в гидродинамической структурах пламени [24]. В работе [11] на основе гипотезы о подобии пульсаций гидродинамических и термодинамических параметров предложено выражение для оценки масштабов турбулентности в пламени:

$$b = f^{-1} \frac{\sqrt{\langle T'T' \rangle}}{T} \sqrt{gL}, \quad (5)$$

где f – частота пульсаций температуры; T – средняя температура; $\langle T'T' \rangle$ – пульсации температуры; L – высота факела пламени; g – ускорение свободного падения.

В соответствии с этим выражением внутренний масштаб турбулентности в пламени фронта степного пожара $b = 20$ –80 см, а верхового пожара – $b = 20$ –64 см.

В работе [5] показано, что в результате интенсивного тепловыделения в зоне горения и диссипации турбулентных структур в пламени формируется



a



б



в

<i>T</i> , К
1454,84
1417,19
1379,54
1335,56
1290,28
1239,12
1184,38
1118,24
1068,72
1055,90
1043,07
1030,25
1017,43
1004,61
991,79
978,96
963,25
945,07
926,90
908,73
890,56
871,50
832,33
798,39
767,47



г

<i>T</i> , К
955,39
943,24
931,13
919,01
906,90
894,75
882,63
867,48
841,37
815,81
793,16
774,15
760,42
754,35
748,29
742,23
736,17
730,10
724,04
717,98
711,92
705,84
697,80
688,17
678,54
668,89
659,26
649,63
637,68
620,90
604,16
587,42
570,68

Рис. 2. Верховой (*a*) и степной (*б*) модельные пожары; ИК-изображения пламени верхового (*в*) и степного пожаров (*г*)

индуцированная атмосферная турбулентность в окрестности очага горения, которая проявляется в пульсациях температуры воздуха и структурных постоянных температуры и показателей преломления воздуха (1)–(4).

Сравнивая на рис. 3 изменения и максимальные значения структурных постоянных флуктуации C_n^2 на высоте 10 м для степного и верхового модельных пожаров, можно сделать вывод, что изменение этих величин в ходе указанных двух типов модельных пожаров схожи, а максимальные значения на порядок выше фоновых и незначительно отличаются.

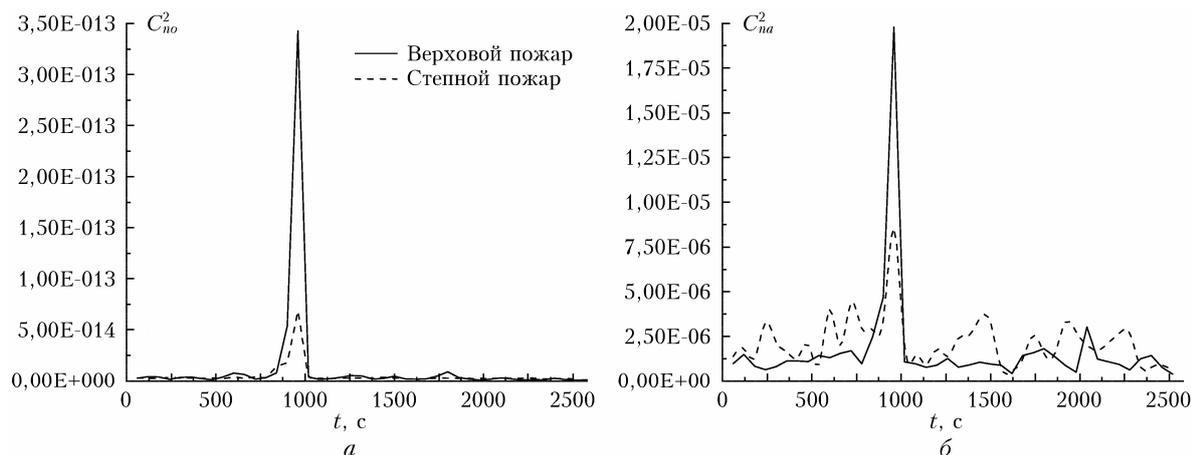


Рис. 3. Изменение структурного показателя флуктуаций оптического C_{no}^2 (а) и акустического C_{na}^2 (б) показателей преломления

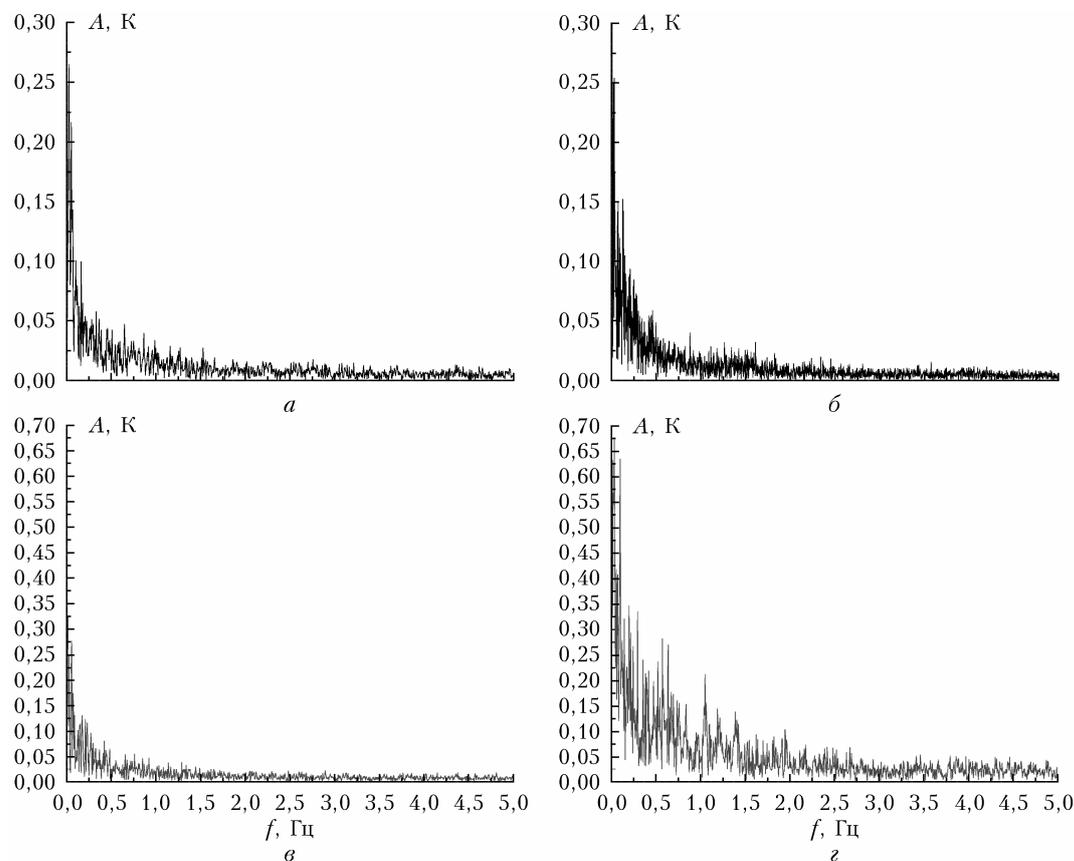


Рис. 4. Спектр изменения температуры воздуха на высоте 3 м при степном (а, б) и верховом (в, г) пожарах: а, в — до эксперимента; б, г — во время эксперимента (А — амплитуда пульсаций с частотой f в разложении в ряд функции температуры)

Масштабы турбулентности в атмосфере в окрестности очага модельного пожара

$f, \text{ Гц}$	Масштаб турбулентности, м			
	Степной пожар		Верховой пожар	
	высота 3 м	высота 10 м	высота 3 м	высота 10 м
0,1–0,5	0,192–0,835	0,936–2,868	0,494–2,712	0,576–4,555
0,5–1	0,104–0,155	0,550–0,807	0,138–0,332	0,291–0,847
1–2	0,068–0,076	0,218–0,437	0,103–0,226	0,179–0,229
2–3	–	0,151–0,231	–	0,137–0,179
3–4	–	0,114–0,136	–	–
4–6	–	0,079–0,111	–	–

На рис. 5 приведены графики зависимости логарифма амплитуды пульсации температуры от логарифма волнового числа $k = 2\pi/b$, которые подобны спектру кинетической энергии турбулентности [29, 30].

При анализе данных, представленных в таблице и на рис. 4, 5, очевидно, что принципиальным отличием параметров индуцированной атмосферной турбулентности в случае степного пожара является появление в спектре пульсаций температуры колебаний с частотами более 3 Гц на высоте 10 м, которым соответствуют меньшие масштабы турбулентности, что говорит о развитии диссипативных процессов, которые на высоте 3 м еще слабо проявлялись. Учитывая разную высоту пламени в случае степного и верхового пожаров (1–1,5 м для степного и 4–

5 м для верхового), можно констатировать, что в обоих случаях пульсациям температуры воздуха с частотой 0–0,5 Гц соответствует внешний масштаб турбулентности. Частотам 0,5–2 Гц соответствуют масштабы турбулентности, которые формируются в результате подъема и расширения турбулентных структур, сформированных в пламени, масштабами 0,1–0,9 м.

Следует отметить, что в случае верхового пожара диссипативные процессы начинают формироваться при $\lg k > 0,25$, которым соответствуют частоты $f > 1,4$ Гц на высоте 3 м и $f > 2,6$ Гц на высоте 10 м [28]. Проявление диссипативных процессов на высоте 3 м при верховом пожаре слабо выражено, вероятно, потому, что высота измерений меньше высоты пламени.

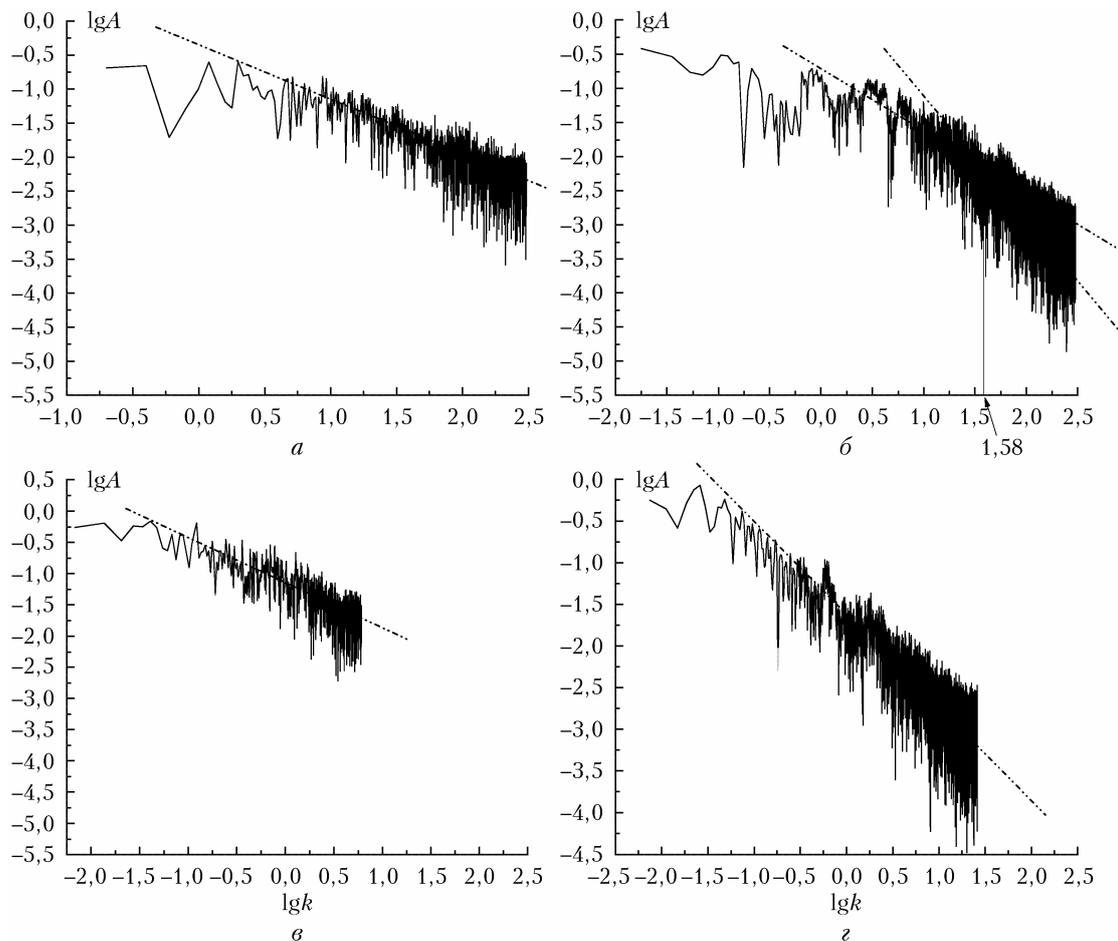


Рис. 5. Спектры пульсации температуры в воздухе при степном (а, б) и верховом (в, г) пожарах на высоте 3 (а, в) и 10 м (б, г)

Для степного пожара проявление диссипативных процессов (см. на рис. 5) начинается при $l_{gk} > 1,58$, что соответствует частотам $f > 3$ Гц на высоте 10 м. На высоте 3 м в этом случае диссипативные процессы не наблюдаются. Меньшие частоты пульсации температуры воздуха должны соответствовать инерционному интервалу энергетического спектра [31, 32].

Необходимо отдельно отметить, что в условиях экспериментов, исходя из объективных физических ограничений и необходимости обеспечить сохранность оборудования, все измерения метеопараметров осуществлялись не непосредственно над фронтом модельного пожара, а на небольшом удалении по направлению ветра. Также высота измерений ограничивалась размерами мачты. Это, безусловно, повлияло на результаты измерений, особенно на высоте 3 м. В будущем представляет интерес применение оптических способов измерения температуры и характеристик атмосферы непосредственно над фронтом пожара и на высотах больше 10 м.

Заключение

В результате анализа проведенных с 2019 по 2022 г. контролируемых натуральных экспериментов по распространению модельных верховых и степных пожаров можно сделать следующие выводы о влиянии пожаров на формирование индуцированной атмосферной турбулентности.

1. Фронт модельного пожара формирует индуцированную атмосферную турбулентность, сопровождающуюся пульсациями температуры воздуха на высоте до 10 м с частотами от 0 до 3 Гц в случае верхового и от 0 до 6 Гц в случае степного пожара.

2. Для степного пожара инерционному интервалу соответствует диапазон частот пульсации температуры воздуха $f = 0-3$ Гц; диссипативные процессы соответствуют частотам $f > 3$ Гц и проявляются на высоте 10 м.

3. Для верхового пожара на высотах до 10 м турбулентные процессы в атмосфере в основном соответствуют инерционному интервалу энергетического спектра, а диссипативные процессы проявляются слабо.

Динамика развития и диссипации индуцированной атмосферной турбулентности связана с внешним масштабом турбулентности в пламени (высотой пламени) и требует дальнейшего изучения с применением бесконтактных методов диагностики.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Kasischke E.S., Christensen N.L., Stocks B.J.* Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests // *Ecol. Appl.* 1995. V. 5, N 2. P. 437–451. DOI: 10.2307/1942034.

2. *Voulgarakis A., Field R.D.* Fire influences on atmospheric composition, air quality and climate // *Curr. Pollut. Rep.* 2015. V. 1. P. 70–81. DOI: 10.1007/s40726-015-0007-z.

3. *Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А.* Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 512–520; *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A.* Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 512–520.

4. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Джолд А.В.* Влияние сибирских пожаров на содержание монооксида углерода в атмосфере над европейской частью России летом 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 2. С. 146–152.

5. *Loboda E.L., Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Lutsenko A.V., Staroseltseva A.A., Perminov V.V., Martynov P.S., Loboda Ya.A., Orlov K.E.* Crown fire modeling and its effect on atmospheric characteristics // *Atmosphere.* 2022. V. 13, N 12. P. 1–9.

6. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука СО АН СССР, 1992. 407 с.

7. *Фомичев М.* РИА Новости [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20101126/297098566.html> (дата обращения: 20.04.2023).

8. *Сывороткин В.Л.* О природе природных пожаров // *Электронное научное издание Альманах Пространство и Время.* 2016. Т. 11, № 1. С. 1–29.

9. *Shultz D.* Seeding ice clouds with wildfire emissions [Electronic resource]. URL: <https://eos.org/research-spotlights/seeding-ice-clouds-with-wildfire-emissions> (last access: 20.04.2023).

10. *Clements C.B., Lareau N.P., Seto D., Conzeac J., Davis B., Teske C., Zajkowski T.J., Hudak A.T., Bright B.C., Dickinson M.B., Butler B.W., Jimenez D., Hiers J.K.* Fire weather conditions and fire – atmosphere interactions observed during low-intensity prescribed fires – RxCADRE 2012 // *Int. J. Wildl. Fire.* 2016. V. 25, N 1. P. 90–101. DOI: 10.1071/WF14173.

11. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Vasilov V.P., Reyno V.V.* Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // *Infrared Phys. Technol.* 2015. V. 72. P. 1–7.

12. *Mueller E.V., Skowronski N., Thomas J., Clark K., Gallagher M., Hadden R., Mell W., Simeoni A.* Local measurements of wildland fire dynamics in a field-scale experiment // *Combust. Flame.* 2018. V. 194. P. 452–463. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.05.028.

13. *Morvan D., Dupuy J.L., Rigolot E., Valette J.C.* FIRESTAR: A physically based model to study wildfire behaviour // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 234 (Supplement). P. S114. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.08.155.

14. *Mell W., Jenkins M.A., Gould J., Cheney Ph.* A physics-based approach to modelling grassland fires // *Int. J. Wildl. Fire.* 2007. V. 16, N 1. P. 1–22.

15. *Mell W., Maranghides A., McDermott R., Manzello S.L.* Numerical simulation and experiments of burning Douglas fir trees // *Comb. Flame.* 2009. V. 156. P. 2023–2041.

16. *Filippi J.B., Bosseur F., Mari C., Stradda S.* Numerical experiments using MESONH/FOREFIRE coupled atmospheric model // 8th Symposium on fire and forest meteorology. Kalispell, Montana USA, 13–15 October 2009. P. 10.

17. *Linn R.R., Reisner J., Colman J.J., Winterkamp J.* Studying wildfire behaviour using FIRETEC // *Int. J. Wildl. Fire.* 2002. V. 11. P. 233–246.

18. *Бережная Н.А., Ретина Е.М.* Влияние пожаров на окружающую природную среду и здоровье человека // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2013. № 1(4). С. 321–325.
19. *Синьков О.А., Почапский А.А.* Влияние лесных пожаров на окружающую среду // Актуальные проблемы геотехники, экологии и защиты населения в чрезвычайных ситуациях: материалы 73-й студенческой научно-технической конференции, 28 апреля 2017. Электрон. дан. Минск: БНТУ, 2017. С. 101–103.
20. *Шарагин А.М.* Влияние лесных пожаров на экологическую ситуацию // Усп. современного естествознания. 2011. № 7. С. 236–236.
21. *Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н., Ершов Д.В., Ручинская Е.В., Сибирцева Н.В., Лукина Н.В.* Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4(2). С. 1–76. DOI: 10.31509/2658-607X-202142-11.
22. *Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В.* Изучение проблемы лесных пожаров как фактора экологической опасности: региональный аспект // Фундаментальные исследования. 2014. № 12 (часть 6). С. 1207–1211.
23. *Katurji M., Noonan B., Zhang J., Valencia A., Shumacher B., Kerr J., Strand T., Pearce G., Zawar-Reza P.* Atmospheric turbulent structures and fire sweeps during shrub fires and implications for flaming zone behavior // Int. J. Wildl. Fire. 2022. V. 32, N 1. P. 43–55. DOI: 10.1071/WF22100.
24. *Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.I., Rejno V.V., Vavilov V.P., Lutsenko A.V.* Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV // Infrared Phys. Technol. 2018. V. 92. P. 240–243.
25. *Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Гордеев Е.В., Тараканова В.А., Мартынов П.С., Орлов К.Е., Савин К.В., Дутов А.И., Лобода Ю.А.* Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. DOI: 10.15372/АОО20201011.
26. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Применение термографии при исследовании процессов горения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. 80 с.
27. *Описание* типа средства измерений. Комплексы автоматизированные измерительные «Автономная метеорологическая станция АМК-03». URL: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/36115-07.pdf> (дата обращения: 20.04.2023).
28. *Лобода Е.Л., Луценко А.В., Агафонцев М.В.* Исследование турбулентности в пламени модельного пожара и возникновение индуцированной атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физ. 2023. Т. 66, № 4(785). С. 48–56.
29. *Pope S.B.* Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000. 810 p.
30. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
31. *Лукин В.П.* Внешний масштаб турбулентности и его влияние на флуктуации оптических волн // Усп. физ. наук. 2021. Т. 191, № 3. С. 292–317.
32. *Илюшин Б.Б.* Процессы переноса в турбулентных течениях. Новосибирск, 2009. 102 с.

E.L. Loboda, A.V. Lutsenko, D.P. Kasymov, M.V. Agafontsev, I.A. Kolesnikov. **Study of the influence of a model fire on the characteristics of turbulence in the atmosphere.**

This paper analyzes and generalizes the results of studies of turbulence in flame and in the vicinity of the combustion source during model steppe and crown fires in the period from 2019 to 2022 at the Base Experimental Complex of Institute of Atmospheric Optics SB RAS. The spectra of air temperature changes and the scales of induced atmospheric turbulence in the vicinity of the front of a model fire are obtained. For a steppe fire, the air temperature pulsation frequency ranges corresponding to the inertial and dissipative sections of the energy spectrum are found; dissipative processes begin to form at an altitude of 10 m at wave numbers with $\lg k > 1.58$ and the corresponding pulsation frequency $f > 3$ Hz; at an altitude of 3 m, dissipative processes are not observed. During a model crown fire, turbulent processes in the atmosphere correspond to the inertial part of the energy spectrum at an altitude of 10 m, and dissipative processes practically do not manifest themselves.