

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 614.7, 614.8

Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения

Е.Л. Лобода^{1,2}, Д.П. Касымов^{1,2}, М.В. Агафонцев^{1,2}, В.В. Рейно²,
Е.В. Гордеев², В.А. Тарканова^{1,2}, П.С. Мартынов^{1,2}, К.Е. Орлов¹,
К.В. Савин¹, А.И. Дутов¹, Ю.А. Лобода^{1,2*}

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

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

Поступила в редакцию 29.04.2020 г.

Представлены результаты мезомасштабных исследований степных пожаров, проведенных в 2011 и 2019 гг. на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы СО РАН. В результате исследований получены характеристики фронта горения и условия распространения модельного степного пожара. Установлены влияние модельного пожара на метеопараметры (температура и относительная влажность воздуха, вертикальная компонента скорости ветра), характеристики турбулентности в зоне горения, газовый и аэрозольный составы атмосферы в непосредственной близости от пожара.

Ключевые слова: степной пожар, природный пожар, горение, пламя, турбулентность, метеопараметры, выбросы в атмосферу; *steppe fire, wildland fire, combustion, flame, turbulence, meteorological parameters, air emissions.*

Введение

В мире ежегодно регистрируется большое количество природных пожаров (лесных, степных и торфяных) [1, 2]. К их последствиям относятся не только уничтожение биогеоценозов, но и выброс в атмосферу огромного количества продуктов горения (газов и аэрозолей), способных переноситься на значительные расстояния. А следы лесных пожаров, например, Красноярского края можно обнаружить в атмосфере других регионов Сибири даже без специальных приборов. Выбросы от лесных пожаров существенно влияют на качество местного воздуха и глобальный климат [3].

Предиктивные модели огня и дыма все чаще используются в планировании и принятии решений о способах и средствах борьбы с лесными пожарами. Однако эти модели часто используются без надлежащей проверки и оценки из-за полного или частичного отсутствия подходящих экспериментальных данных. Удовлетворительная оценка выбросов дыма от лесных пожаров сильно зависит от погрешности

приборов, площади сгоревшей области, характеристик сгоревшей биомассы растительности [4–6]. Рассеивание дыма, в свою очередь, зависит от крупномасштабных метеопараметров и высоты шлейфа дыма [7], на которую влияют геометрия и интенсивность пожара [8]. Таким образом, взаимодействие пожаров и атмосферы, включая распространение лесных пожаров и динамику шлейфа, имеет фундаментальное значение для улучшения оценок генерации и рассеивания дыма.

В [4] в большой аэрозольной камере ИОА СО РАН проведен цикл экспериментов для изучения влияния режимов сгорания типичных сибирских биомасс на оптико-микрофизиологические и физико-химические свойства дымовых аэрозолей. Существенные различия спектров распределения по размерам и значений комплексного показателя преломления частиц дымовых эмиссий указывают на определяющее влияние температурного режима горения на оптико-микрофизические характеристики аэрозолей.

Несмотря на то, что изучением природных пожаров в мире начали заниматься в XX в. [9–11], проблема моделирования механизмов распространения, прогнозирования возникновения и оценки последствий пожаров еще далека от конкретизации, которая позволила бы с уверенностью говорить о завершении этапа постановки задачи. В связи с этим учеными проводятся экспериментальные исследования, в том числе модельные [12], направленные на изучение механизмов распространения природных пожаров, оценку их влияния на атмосферу в виде выброса аэрозолей, влияния на ветер и пр.

* Егор Леонидович Лобода (loboda@mail.tsu.ru); Денис Петрович Касымов (denkasyimov@gmail.com); Михаил Владимирович Агафонцев (kim75mva@gmail.com); Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru); Вероника Алексеевна Тарканова (veronika.tarakanova@mail.ru); Павел Сергеевич Мартынов (martypavel@bk.ru); Константин Евгеньевич Орлов (humermor@yandex.ru); Кирилл Вячеславович Савин (fire@mail.tsu.ru); Андрей Игоревич Дутов (fire@mail.tsu.ru); Юлия Анатольевна Лобода (loboda@mail.tsu.ru).

В настоящей работе представлены результаты мезомасштабных экспериментальных исследований механизмов и характеристик распространения фронта степного пожара, его влияния на метеопараметры и выброс аэрозолей.

Описание эксперимента и применяемого оборудования

Эксперименты по моделированию степных пожаров проводились 4 мая 2019 г. на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН. В качестве основной экспериментальной площадки выбиралась полоса длиной 40 м и шириной 15 м.

Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанций (ультразвуковая метеостанция АМК-03). Температура воздуха T варьировалась в пределах 275–278 К, относительная влажность воздуха ϕ – в пределах 42–44%, атмосферное давление P – в пределах 751–759 мм рт. ст., скорость ветра – 1–6 м/с. Температура почвы на глубине 0,1 м составила 275 К, влагосодержание – 43%. Влагосодержание растительных горючих материалов (РГМ) определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью до 0,01% и составило $W = 5,61\%$. Запас РГМ на экспериментальной площадке изменялся в пределах 0,476–0,563 кг/м². Поле температур во фронте пожара и структура пламени контролировались инфракрасной камерой JADE J530SB с частотой съемки 50 кадров в секунду в узком спектральном интервале 2,5–2,7 мкм, выбор которого обусловлен спектром излучения основных продуктов горения [13]. Для корректировки коэффициента излучения пламени и контроля распространения фронта пожара внутри экспериментальной полосы размещались стойки с термопарами ХА (хромель-алюмель) типа К [14]. Фронт горения формировался равномерно по всей ширине площадки. В качестве дополнительных экспериментов проводилось сжигание небольших участков растительности размером 2×2 м (запас РГМ составлял 0,5 кг/м²) для исследования влияния низового пожара на изменение метеоусловий, которые регистрировались АМК-03, установленной на 3-метровой вышке. При этом также контролировались все основные параметры.

Результаты эксперимента и их анализ

С учетом удельной теплоты сгорания РГМ (используются данные, приведенные для соломы [15]), которая составляет 16 МДж/кг, можно оценить максимальное тепловыделение в результате сгорания растительности на экспериментальном участке. Оно не превышает 4996,8 МДж.

Результаты анализа распределения температур во фронте пожара говорят о том, что процесс горения нестационарен и сопровождается развитой турбулентностью в пламени. При этом максимум температуры во фронте пожара достигает 1200 К при средней высоте пламени 0,7 м. Эти данные согласу-

ются с результатами экспериментальных исследований 2009–2011 гг. [14–16].

На рис. 1 приведены спектр изменения температуры во фронте пожара, полученный по методике [17] за 6 с, и спектральная характеристика фронта пожара, полученная путем умножения амплитуды колебаний на частоту [18]. Видно, что в спектре изменения температуры присутствуют характерные частоты, которым соответствуют масштабы турбулентности $b = 20–64$ мм, рассчитанные по выражению [17]:

$$b = f^{-1} \frac{\sqrt{T'T''}}{T^2} \sqrt{gL},$$

где f – характерная частота пульсации температуры в пламени, 1/с; T' – пульсация температуры, К; T – температура в факеле пламени, К; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – высота факела пламени, м.

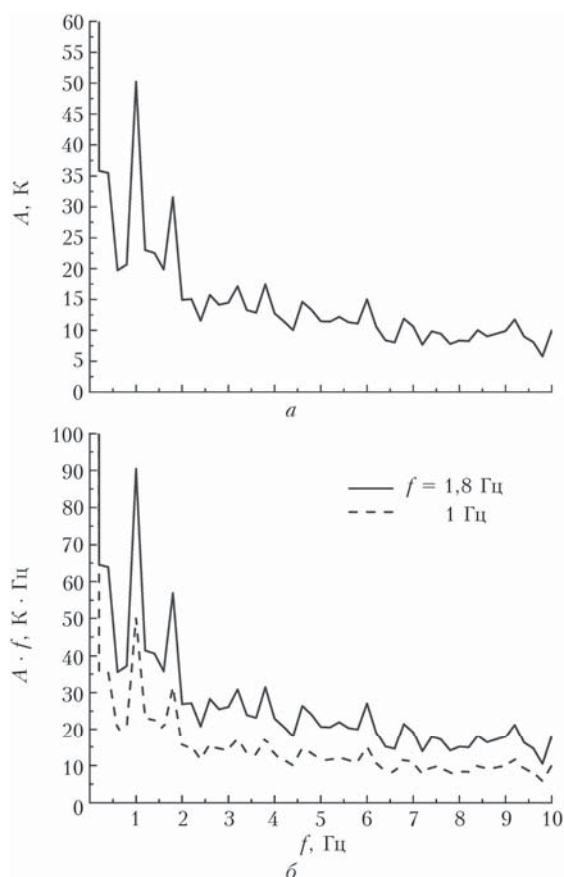


Рис. 1. Спектральные характеристики фронта степного пожара: a – спектр изменения температуры во фронте пожара; b – спектральная характеристика $A \cdot f$ фронта степного пожара (A – амплитуда пульсаций)

Очевидно, что интенсивное тепловыделение при пожаре, развитая турбулентность в пламени в результате диссипации турбулентных структур и выброс горячих аэрозольных и газовых компонент влияют на окружающую атмосферу в непосредственной близости от фронта горения. На рис. 2, a показано изменение температуры воздуха во время проведения эксперимента на высоте 3 и 10 м.

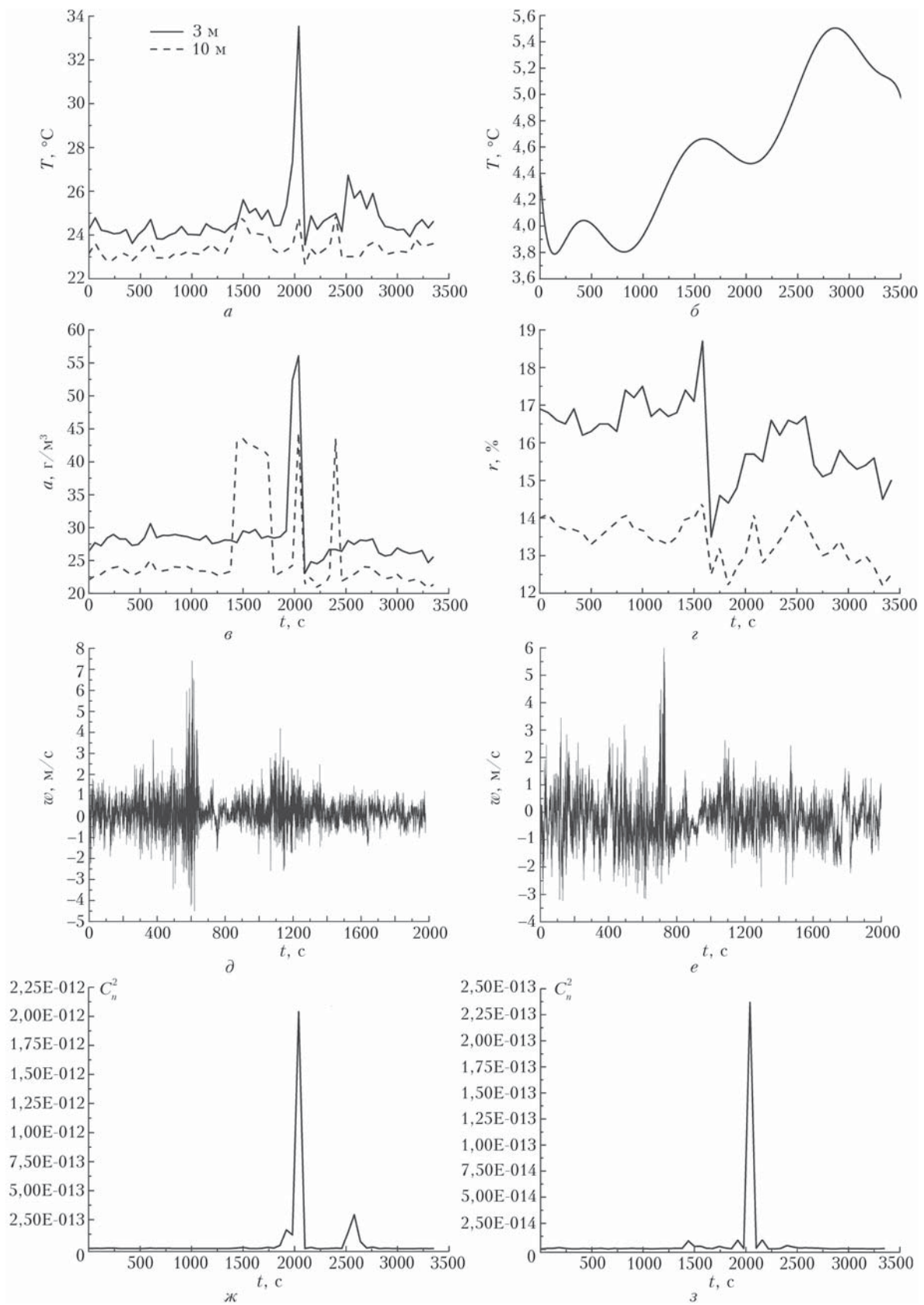


Рис. 2. Изменение метеопараметров во время проведения эксперимента: *a* – температура воздуха вблизи экспериментальной площадки (2019 г.), *б* – на посту мониторинга (2011 г.); *в* – абсолютная, *г* – относительная влажность воздуха; *д* – вертикальная компонента скорости ветра на высоте 3 м, *е* – на высоте 10 м; *ж* – флуктуации показателя преломления C_n^2 на высоте 3 м, *з* – на высоте 10 м

Следует отметить, что метеостанция на высоте 10 м была расположена в направлении ветра и распространения фронта пожара, а на высоте 3 м – сбоку от направления распространения фронта пожара и переноса продуктов горения. Также при проведении экспериментов в 2011 г. [16] было зафиксировано изменение температуры воздуха при помощи поста для мониторинга парниковых и окисляющих газов ИОА СО РАН [19], который располагался на мачте высотой 35 м. Мачта находилась сбоку от экспериментального участка, и ветер на нее не переносил продукты горения, т.е. в отношении распространения продуктов и фронта горения она находилась не по ветру, а сбоку (рис. 2, б).

Следует отметить, что при проведении эксперимента наблюдалось снижение относительной и изменение абсолютной влажности воздуха (рис. 2, в, з), рассчитанной по формуле [20]:

$$a = 217 \frac{e}{T}, \quad e = \frac{rE}{100\%},$$

где a – абсолютная влажность, $\text{г}/\text{м}^3$; e – парциальное давление водяного пара, мбар; T – абсолютная температура, К; r – относительная влажность, %; E – давление насыщенного пара, мбар.

Также во время проведения эксперимента за счет конвекции продуктов горения наблюдались флуктуации вертикальной составляющей скорости ветра (рис. 2, д, е). Очевидно, что на высоте 3 м они имеют большую амплитуду, несмотря на то что метеостанция находилась сбоку от направления распространения фронта пожара. При этом максимум флуктуаций соответствует прохождению фронта пожара

в непосредственной близости от места измерения. При анализе скорости ветра необходимо учитывать тот факт, что во время проведения эксперимента присутствовал значительный горизонтальный ветер, обеспечивающий снос продуктов горения. И, вероятно, при слабом ветре или его отсутствии влияние конвекции на рост вертикальной компоненты скорости ветра будет более существенным.

Особое внимание следует обратить на изменение флуктуаций показателя преломления атмосферы C_n^2 (рис. 2, ж, з) на обеих станциях. Отметим, что АМК-03 рассчитывает C_n^2 по флуктуациям скорости звука между ультразвуковыми датчиками. Поэтому флуктуации C_n^2 отражают турбулентные процессы, протекающие в воздухе между датчиками метеостанции. Следовательно, пульсации температуры также непосредственно связаны с турбулентными процессами, что было показано в [21] на примере сравнения тепловой структуры пламени и мгновенных трассерных PIV-изображений.

Во время проведения экспериментов по распространению степного пожара в 2011 г. на БЭК было также зафиксировано изменение газового и аэрозольного составов атмосферы, которые не были опубликованы ранее в [14]. Следует отметить, что состав растительности в экспериментах 2011 и 2019 гг. идентичен. На рис. 3 представлено изменение концентраций газовых компонент воздуха, а на рис. 4 – изменения аэрозольного состава.

Вследствие относительной удаленности поста мониторинга [19] и направления ветра во время эксперимента, изменения газового и аэрозольного составов атмосферы были зарегистрированы спустя некоторое время после начала горения.

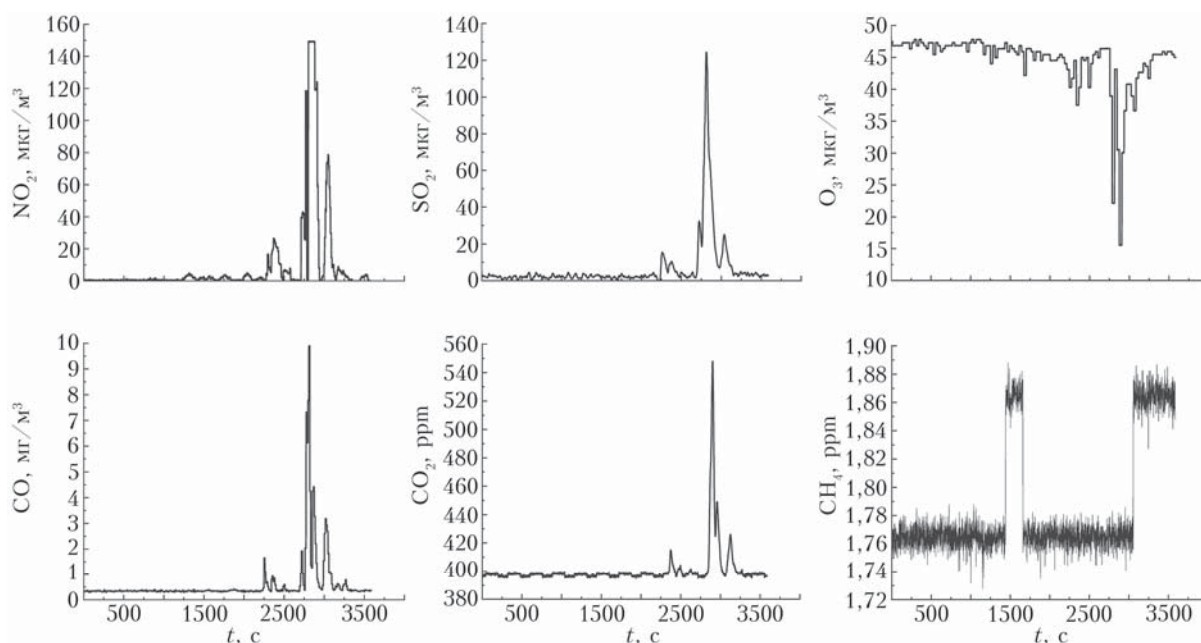


Рис. 3. Изменение концентраций газовых компонент атмосферы при модельном степном пожаре в 2011 г.

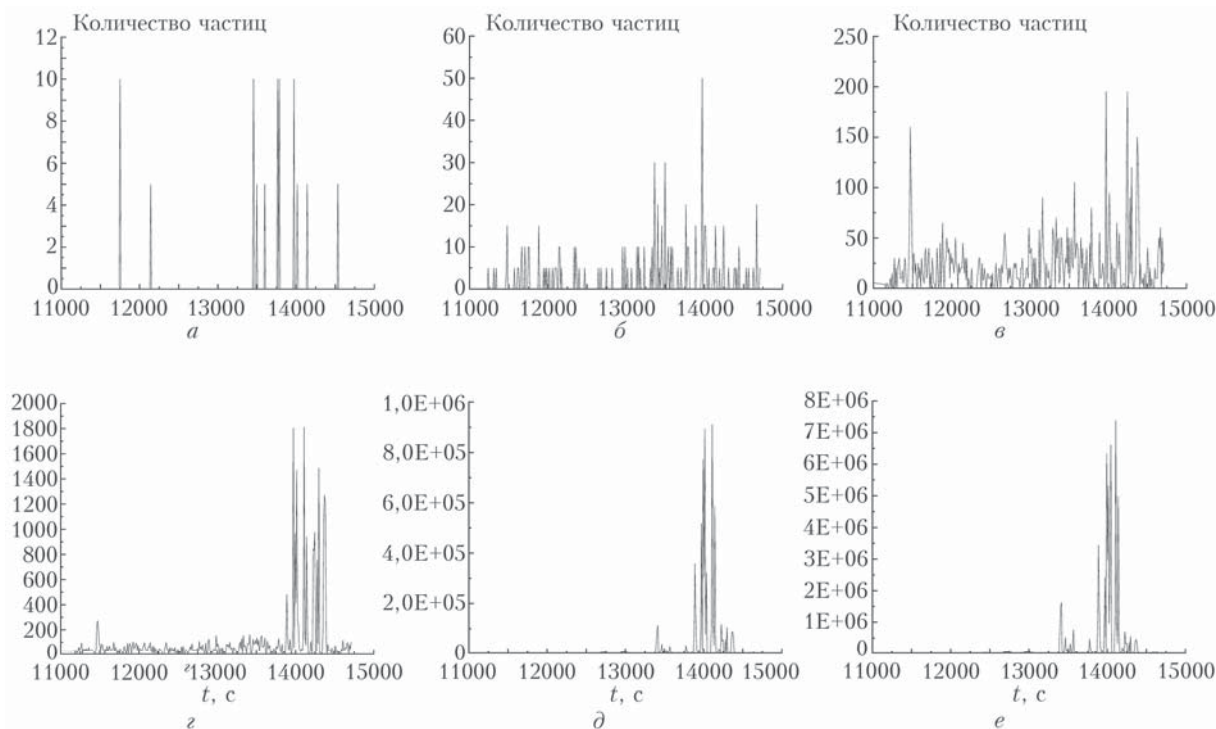


Рис. 4. Изменение аэрозольного состава атмосферы при модельном степном пожаре 2011 г. (b_a – диаметр частиц аэрозоля): $b_a > 15$ (a); 7,5 (б); 3 (в); 2 (z); 0,65 (д); 0,4 мкм (e)

С одной стороны, анализируя рис. 3 и 4 можно сделать достаточно очевидный вывод, что в результате природных пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество окисляющих газов и аэрозольных частиц разных размеров. Концентрация окисляющих газов возрастает в десятки раз по сравнению с фоновыми значениями. С другой стороны, во время проведения экспериментов было зафиксировано снижение концентрации озона и рост концентрации метана.

Заключение

1. Даже небольшие природные пожары приводят к росту температуры воздуха в районе пожара на 2–3° и к изменению относительной влажности воздуха.

2. Интенсивное тепловыделение в зоне горения и развитая турбулентная структура пламени вызывают рост вертикальной компоненты скорости ветра и усиление флуктуаций коэффициента преломления атмосферы, что является показателем турбулизации атмосферы не только в направлении распространения фронта пожара, но и в ближайшей окрестности.

3. В условиях модельного природного пожара во фронте горения наблюдаются достаточно крупные масштабы турбулентности, которые не встречаются в лабораторных условиях, зависят от размеров пожара и являются результатом масштабного эффекта и действия ветра.

4. Небольшой природный пожар приводит к росту концентраций парниковых и окисляющих газов в окрестностях.

5. Изменения аэрозольного и газового составов атмосферы при природном пожаре происходят с временной задержкой, вызванной процессами атмосферного переноса, и могут служить сигналом пожара.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Pagni P. Causes of the 20th October 1991 Oakland Hills conflagration // Fire Safety J. 1993. V. 21. P. 331–340. DOI: 10.1016/0379-7112(93)90020-Q.
2. Catry F.X., Rego F.C., Bação F.L., Moreira F. Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal // Int. J. Wildland Fire. 2009. V. 18, iss. 8. P. 921–931. DOI: 10.1071/WF07123.
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. 566–574.
4. Поповичева О.Б., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Куреева Е.Д., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Панченко М.В., Zimmermann R., Schnelle-kreis J. Оптико-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: эксперименты в аэрозольной камере // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 323–331; Popovichova O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli E., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-microphy-

- sical and physical-chemical characteristics of Siberian biomass burning: Experiments in aerosol chamber // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 492–500.
5. *Larkin N.K., O'Neill S.M., Solomon R., Raffuse S., Strand T., Sullivan D.C., Krull C., Rorig M., Peterson J., Ferguson S.A.* The BlueSky smoke modeling framework // *Int. J. Wildland Fire.* 2009. V. 18. P. 906–920. DOI:10.1071/WF07086.
 6. *Urbanski S.P., Hao W.M., Nordgren B.* The wildland fire emission inventory: Western United States emission estimates and an evaluation of uncertainty // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 12973–13000. DOI: 10.5194/acp-11-12973-2011.
 7. *Liu Y., Achtemeier G., Goodrick S.* Sensitivity of air quality simulation to smoke plume rise // *J. Appl. Remote Sens.* 2008. V. 2. P. 1–12. DOI: 10.1117/1.2938723.
 8. *Goodrick S.L., Achtemeier G.L., Larkin N.K., Liu Y., Strand T.M.* Modelling smoke transport from wildland fires: A review // *Int. J. Wildland Fire.* 2013. V. 22. P. 83–94. DOI: 10.1071/WF11116.
 9. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
 10. *Albini F.A.* Spot fire distance from burning trees—a predictive model. General Technical Report INT-GTR-56. Ogden, UT [Electronic resource]. URL: http://www.firemodels.org/downloads/behavplus/publications/Albini_GTRINT-056_1979.pdf (last access: 25.03.2020).
 11. *Stocks B.J., Alexander M.E., Wotton B.M., Steiner C.N., Flannigan M.D., Taylor S.W., Lavoie N., Mason J.A., Hartley G.R., Maffey M.E., Dalrymple G.N., Blake T.W., Cruz M.G., Lanoville R.A.* Crown fire behaviour in a northern jack pine—black spruce forest // *Canad. J. Forest Res.* 2004. V. 34. P. 1548–1560. DOI: 10.1139/X04-054.
 12. *Prichard S., Larkin N.S., Ottmar R., French N.H., Baker K., Brown T., Clements C., Dickinson M., Hudak A., Kochanski A., Linn R., Liu Y., Potter B., Mell W., Tanzer D., Urbanski S., Watts A.* The fire and smoke model evaluation experiment — A plan for integrated, large fire—atmosphere Field Campaigns // *Atmos.* 2019. V. 10, iss. 2. P. 1–66. DOI: 10.3390/atmos10020066.
 13. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // *Изв. вузов. Физика.* 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.
 14. *Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D., Reyno V.V., Kozlov A.V.* A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // *Int. J. Wildland Fire.* 2014. V. 23, iss. 3. P. 445–449.
 15. *Земский Г.Т.* Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений. Книга 2. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России. 454 с.
 16. *Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В.* Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // *Вестн. Томс. гос. ун-та. Математика и механика.* 2011. Т. 14, № 2. С. 91–102.
 17. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V.* Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // *Infrared Phys. Technol.* 2015. V. 72. P. 1–7.
 18. *Шерстобитов М.В., Сазанович В.М., Цвях П.Ш.* Исследование серий термограмм пламени модели огненного смерча // *Актуальные проблемы радиофизики.* Сб. тр. VII Междунар. научно-практ. конф. 2017. С. 223–226.
 19. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.
 20. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере М.: Советское радио, 1970. 496 с.
 21. *Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Reyno 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.

E.L. Loboda, D.P. Kasymov, M.V. Agafontsev, V.V. Reyno, Y.V. Gordeyev, V.A. Tarkanova, P.S. Martynov, K.Y. Orlov, K.V. Savin, A.I. Dutov, Yu.A. Loboda. **Impact of small-scale wild fires on the air parameters near burning centers.**

This paper presents some results of semi-natural studies of steppe fires conducted in 2019 and 2011 at the base experimental complex of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS. As a result of the research, the characteristics of the front of a model steppe fire and the conditions for its spread were established. The effect of a modal fire on meteorological parameters (temperature and relative humidity, vertical component of wind velocity), turbulence characteristics in the combustion zone, gas and aerosol composition of the atmosphere in the immediate vicinity of the fire was recorded.