

УДК 551.575.1

Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске в августе 2021 г.

Н.Я. Шапарев, А.В. Токарев[✉], О.Э. Якубайлик*

*Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44*

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.;
после доработки 29.03.2023 г.;
принята к печати 4.04.2023 г.

Зарегистрировано изменение состояния окружающей природной среды в Красноярске и его окрестностях в период существования дымов масштабных якутских пожаров в августе 2021 г. Показано, что с 7 по 9 августа 2021 г. пожары обуславливали изменение концентрации $PM_{2.5}$ от 25 до 300 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$. Появление дымовых аэрозолей в атмосфере привело к уменьшению температуры деятельного слоя почвы ($\Delta T = 5,6^\circ\text{C}$) и приземного слоя атмосферы ($\Delta T = 1,6^\circ\text{C}$). Экспериментально прослежена причинно-следственная связь: формирование дымов \rightarrow экранирование солнечной радиации \rightarrow уменьшение температуры деятельного слоя почвы \rightarrow уменьшение температуры приземного слоя атмосферы \rightarrow формирование тумана на р. Енисей.

Ключевые слова: лесные пожары, дымовые аэрозоли, охлаждение, почва, атмосфера, туманы; forest fires, smoke aerosols, cooling, soil, atmosphere, fogs.

Введение

Лесные пожары являются экстремальным явлением, нарушающим экологическое равновесие и приводящим к изменению погодных условий. Сведения о больших пожарах в России можно встретить в русских летописях начиная с 1092 г. Так, в «Никоновской летописи» повествуется об огромных лесных пожарах 1371 г., а также о лесных пожарах, бушевавших в Архангельской губернии летом 1881 г. [1]. Сильные лесные пожары, обусловленные засухой, начались в Сибири в мае 1915 г., наибольшей интенсивности достигли в августе, местами в июле, продолжались в среднем около 50 дней на пространстве между 52 и 70° с.ш. и 69 и 112° в.д. [2]. Пожары охватили площадь в 1800 тыс. км^2 , а площадь сгоревшего леса составила 140 тыс. км^2 . Дымами было покрыто около 6800 тыс. км^2 . В ряде мест пелена дыма была такой плотной, что видимость составляла 5–6 шагов. В августе было зарегистрировано снижение солнечной радиации до 65%. В результате хлеба созрели на полмесяца позднее, дав малую урожайность.

П. Крутцен и Д. Биркс [3] впервые отметили, что после «ядерного обмена» возможно сильное похолодание, которое может быть вызвано блокированием солнечного излучения смогом лесных, город-

ских и промышленных пожаров, что было позже названо «ядерной зимой» [4].

Первый сравнительный анализ массовых природных и «ядерных» пожаров был представлен в [5–7]. Образующиеся при сжигании биомассы дымовые аэрозоли поглощают и рассеивают солнечное излучение, тем самым уменьшая величину солнечной радиации, достигающей подстилающей поверхности Земли [8, 9]. Следует отметить, что атмосферный аэрозоль является одним из основных факторов, определяющих характеристики климата [10–13].

Глобальные климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, сопровождаются сильными региональными температурными, циркуляционными и гидрологическими аномалиями, которые способствуют возникновению мощных пожаров, например летом 2010 г. в европейской части России, летом 2012 г. и 2019 г. в Сибири [16, 17]. Отметим, что дымы пожаров приводят к серьезным экологическим последствиям и негативно влияют на здоровье населения [18].

В работе [14] показано, что в период длительных природных пожаров на территории Сибири летом 2012 г. дефицит суммарной суточной радиации на уровне подстилающей поверхности, обусловленный появлением оптически плотного дымового слоя, по сравнению с фоновыми условиями, составлял более 13 $\text{МДж}/\text{м}^2$. В статье [15] представлены количественные оценки вертикального распределения поглощенной солнечной радиации и температурных эффектов в фоновой и экстремально задымленной тропосфере Сибири на основе полученных

* Николай Якимович Шапарев (shaparev@icm.krasn.ru); Алексей Владимирович Токарев (tav@icm.krasn.ru); Олег Эдуардович Якубайлик (oleg@icm.krasn.ru).

эмпирических данных и численного моделирования. Показано, что вызванное поглощением солнечной радиации увеличение температуры воздуха в течение светового дня составляет около 2,5–5,5 °С при оптической толщине дымного аэрозоля в диапазоне $2 \leq \tau_{\text{дым}}(0,55 \text{ мкм}) \leq 4$.

Цель работы – сформировать массив экспериментальных данных и описать изменение состояния окружающей природной среды (температура деятельного слоя почвы, температура приземной атмосферы и возникающие последствия) в г. Красноярске и его окрестностях в период существования дымов от масштабных якутских пожаров в августе 2021 г.

Объект исследования

Объект нашего исследования – состояние окружающей природной среды в г. Красноярске и его пригороде (д. Минино) (рис. 1).

Город расположен в нижнем бьефе (части водоема, находящейся ниже по течению) Красноярской ГЭС на р. Енисей. Строительство ГЭС в 1967 г. привело к изменению гидротермического режима реки, главной особенностью которого стало понижение температуры воды летом и повышение зимой относительно естественного режима реки в прошлом. Таким образом, после строительства ГЭС в черте города в летнее время образуется «холодная» подстилающая поверхность, а в зимнее – «теплая». В результате над поверхностью реки стали формироваться адвективные туманы охлаждения летом и туманы парения зимой [19].

В Красноярске размещены девять постов наблюдения (рис. 1, 1–9), на которых регистрируются атмосферное давление, относительная влажность и температура воздуха, скорость и направление ветра,

концентрация $\text{PM}_{2.5}$. Для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц в атмосферном воздухе используются анализаторы пыли модели BAM-1020 (Met One Instruments Inc., США). Данные с постов с периодом в 20 мин передаются в краевую ведомственную информационно-аналитическую систему о состоянии окружающей среды Красноярского края и далее в реальном режиме времени обрабатываются на Геопортале (<http://gis.krasn.ru>), созданном авторами настоящей работы [20].

Результаты наблюдений за температурой воздуха в д. Минино брались с метеостанции государственной наблюдательной сети ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (рис. 1, Метеостанция), где они регистрируются с периодичностью в 3 ч.

Температура почвы измерялась на пробной площади, расположенной возле д. Минино (рис. 1, д. Минино) в 20 км от центра Красноярска, которая находилась под «парами», с помощью автономного регистратора, закопанного в почву на глубину 0,5 см, с периодичностью в 1 ч. В качестве регистраторов использовались приборы iButton DS1922L-F5 компании Maxim Integrated Products, Inc. Это автономные цифровые устройства во влагозащищенном корпусе F5cap (18×6 мм) со встроенным элементом питания. Производителем заявлена точность измерения температуры не хуже $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ в диапазоне от -10 до $+65 \text{ }^\circ\text{C}$. Для настройки и получения данных используется интерфейс 1-Wire.

Данные по температуре воды в р. Енисее в черте города получались с гидрологического поста (пост 09055, р. Енисей – Красноярск) сети мониторинга Росгидромета (рис. 1, Гидропост). Для визуальной оценки состояния атмосферы в городе использовались изображения с веб-камеры наружного наблюдения (рис. 1, Камера).

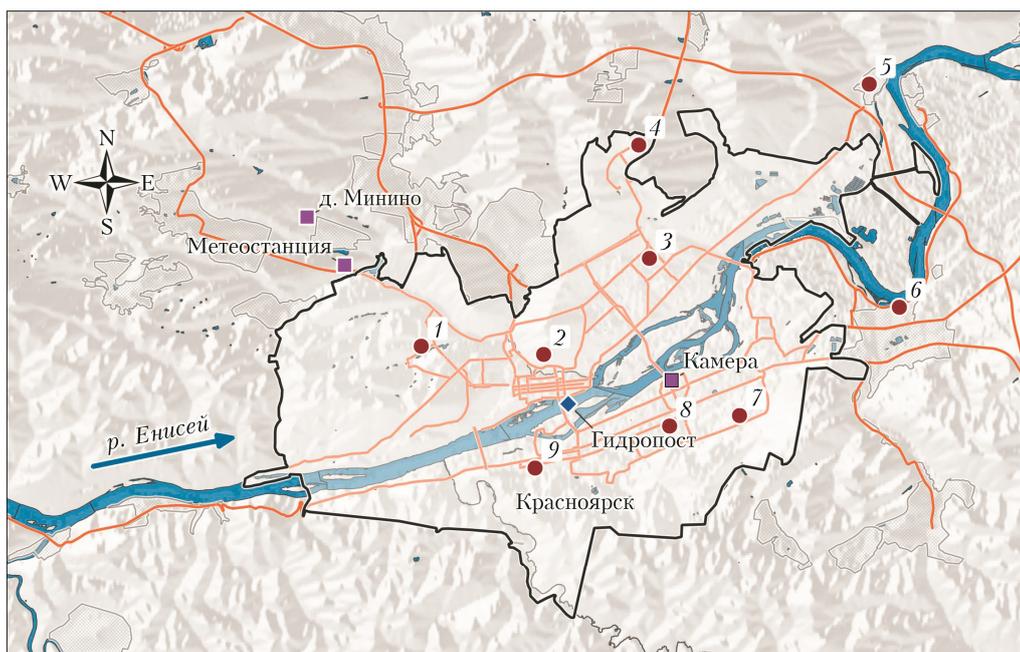


Рис. 1. Карта области исследования: 1–9 – посты наблюдения

Пространственно-временная динамика дымов якутских пожаров анализировалась с помощью ультрафиолетового аэрозольного индекса UVAI [21], рассчитываемого на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Результаты и обсуждение

Дистанционное зондирование дымов якутских пожаров

Серия масштабных лесных пожаров в Якутии в 2021 г. началась в мае и закончилась в августе, как и пожаров 1915 г. [2]. По данным информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства России «ИСДМ-Рослесхоз», площадь лесных пожаров в 2021 г. побила рекорды с начала XXI в. – в России сгорело около 18,8 млн га леса, из них почти 9,5 – в Якутии [22]. Год стал самым катастрофическим в пожарном отношении для российских лесов за весь период, по которому есть достаточно надежные и сравнимые спутниковые данные (с 2001 г.).

В нашем исследовании значения UVAI были получены с помощью прибора OMPS (Ozone Mapping Profiler Suite), установленного на метеорологическом спутнике Suomi-NPP. Данные имеют пространственное разрешение 50 км, генерируются один раз в день. Центр дистанционного зондирования Земли Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук получает данные с этого спутника [23]. Стоит отметить, что трудно проводить наземные наблюдения за распространением дыма от лесных пожаров на большие расстояния. Однако данные прибора OMPS позволяют нам строить карты аэрозольного индекса на каждый день.

А пространственное разрешение устройства позволяет отслеживать динамику распространения дымовых шлейфов от конкретных пожаров в глобальном и региональном масштабах [24].

Дымы якутских пожаров, согласно данным ДЗЗ по индексу UVAI, достигли г. Красноярска 7 августа 2021 г. (рис. 2). Динамика этого индекса в Красноярске показана на рис. 3, а значение индекса приведено на рис. 4.

Температура деятельного слоя почвы и приземной атмосферы

Солнечное излучение, достигая земной поверхности, частично поглощается ей. В результате возникают суточные и годовые колебания температуры верхнего деятельного слоя почвы. Поступление энергии в этот слой в летнее время обусловлено в основном поглощением прямого и рассеянного солнечного излучения (W_{SR}), а потери энергии (W_S) – излучением почвой тепловой радиации (ТИР).

На рис. 4 представлено поведение температуры деятельного слоя почвы, температуры воздуха и концентрации частиц $PM_{2.5}$ (пост № 1, рис. 1) в приземном слое атмосферы в д. Минино с 6 по 9 августа 2021 г., а также значение индекса UVAI. Анализ данных показывает, что концентрация частиц $PM_{2.5}$ начала увеличиваться после 22:00 6 августа, имела два максимума 7 и 8 августа и далее уменьшалась после 22:00 8 августа. Фоновые и максимальные значения концентрации $PM_{2.5}$ составляли соответственно 30 и 300 $\mu\text{г}/\text{м}^3$. При отсутствии дымов 6 августа значение индекса UVAI меньше единицы, что соответствует оптически тонкой атмосфере [21]. Повышение концентрации частиц $PM_{2.5}$ от дымов пожаров увеличивает оптическую толщину атмосферы

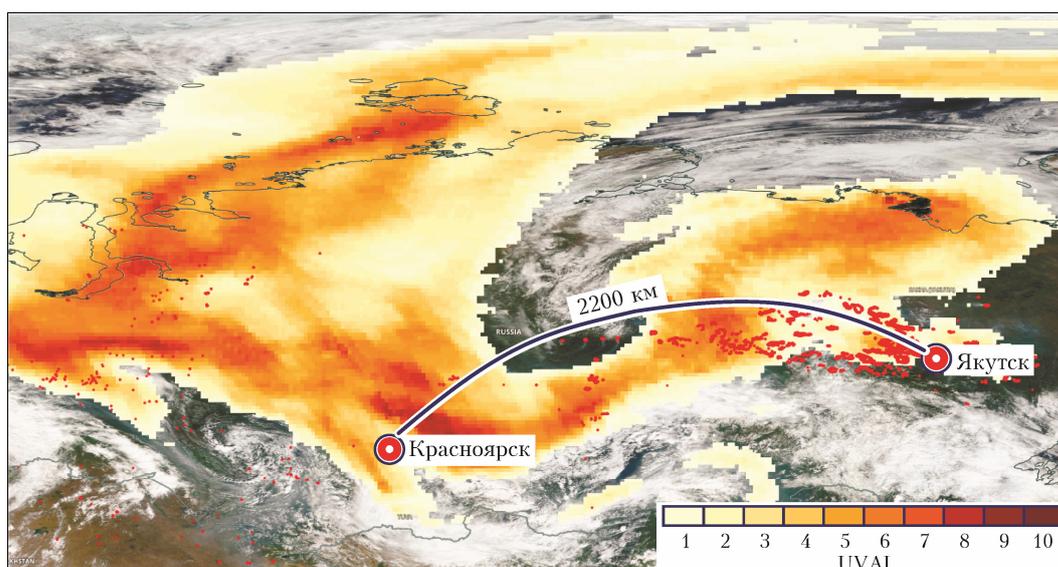


Рис. 2. Ультрафиолетовый аэрозольный индекс UVAI (OMPS Suomi NPP) и термоточки пожаров (VIIRS Suomi NPP) 7.08.2021 г. (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

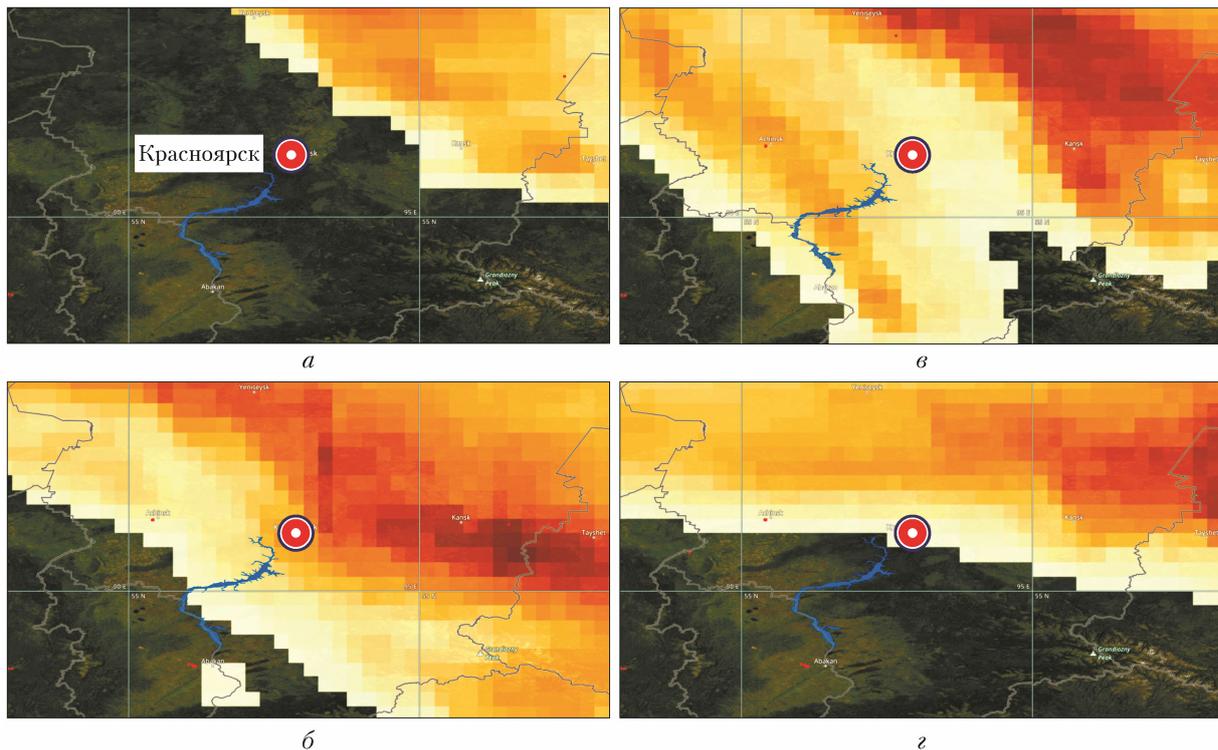


Рис. 3. Динамика индекса UVAI в Красноярске: *a* – 6.08, *б* – 8.08, *в* – 7.08, *г* – 9.08.2021 г. (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

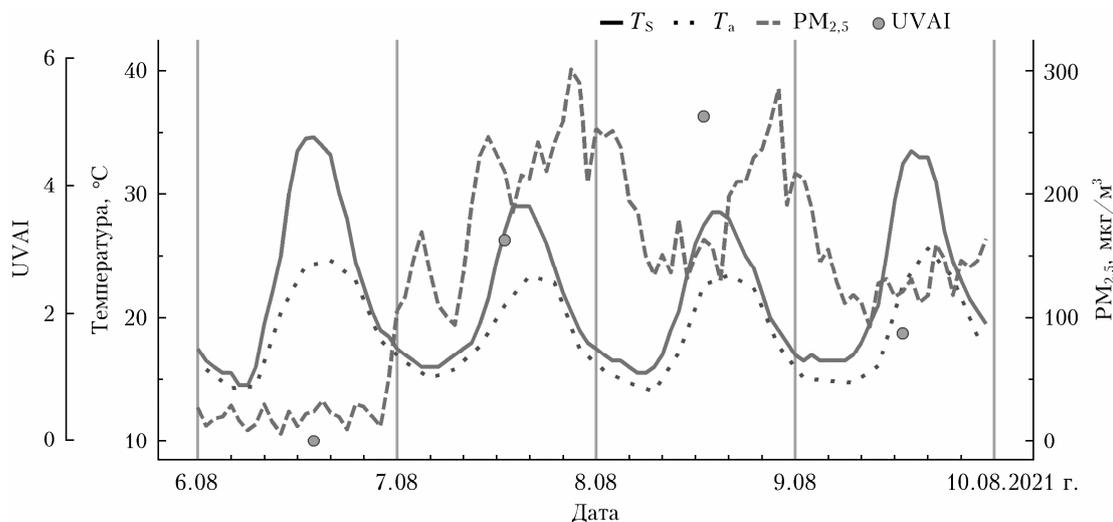


Рис. 4. Температура деятельного слоя почвы T_S на глубине 0,5 см, температура воздуха T_a , концентрация $PM_{2,5}$ на высоте 2 м и значение индекса UVAI в д. Минино

и, следовательно, уменьшает поток падающей солнечной радиации. Это приводит к уменьшению температуры деятельного слоя почвы. Теплообмен между почвой и атмосферой осуществляется за счет турбулентного процесса, и изменения температуры в нижнем приземном слое атмосферы в значительной степени определяются изменениями температуры земной поверхности [25].

На рис. 5 представлен суточный ход температуры деятельного слоя почвы (T_S) и температуры

воздуха (T_a) 6 августа без дымов и 7 августа с дымами пожаров. В начале суток 6 августа идет охлаждение почвы, обусловленное излучением ТИР (W_S), далее после восхода Солнца (05:00) начинается поглощение солнечного излучения (W_{SR}) и температура почвы достигает минимума. Положение минимума обусловлено равенством прихода и ухода энергии в деятельном слое почвы ($W_{SR} = W_S$). Далее за счет увеличения поглощаемого солнечного излучения температура почвы растет и достигает макси-

мума в полдень. После 13:00 интенсивность солнечного излучения падает, температура почвы уменьшается и после заката вновь определяющей является W_s . Видно, что в период больших концентраций $PM_{2,5}$ температура почвы и атмосферы в дневное время понижается. Температура атмосферы в обоих случаях «следует» за ходом температуры почвы за счет турбулентного теплообмена.

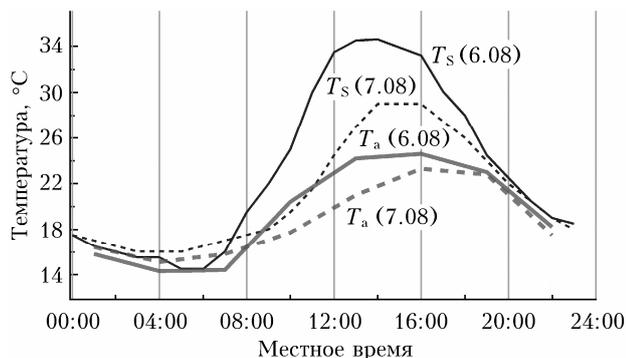


Рис. 5. Суточный ход температуры почвы и атмосферы 6 и 7.08.2021 г. в д. Минино

На рис. 6 представлены максимальные, минимальные и среднесуточные значения температуры почвы и атмосферы с 6 по 9 августа 2021 г. Видно,

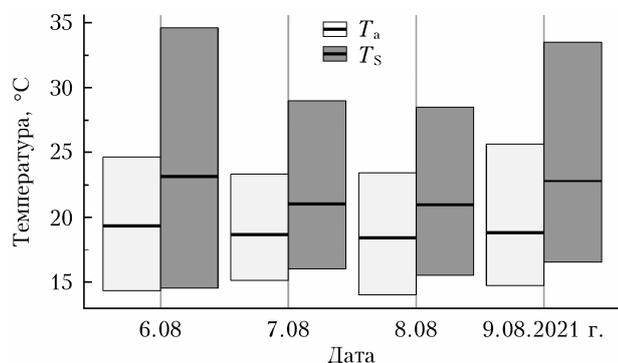


Рис. 6. Диапазоны изменения и среднесуточные значения температур воздуха и почвы в д. Минино

что изменение температуры почвы, вызванное дымами, гораздо сильнее, чем изменение температуры атмосферы. Снижение максимальной дневной температуры T_s составляет $5,6\text{ }^\circ\text{C}$, а T_a — $1,6\text{ }^\circ\text{C}$.

Формирование адвективного тумана охлаждения

Формирование туманов является результатом сложных взаимодействий микрофизических, термодинамических и динамических процессов в атмосфере [26]. Наиболее последовательно изучены туманы, которые обусловлены радиационным охлаждением суши и последующим охлаждением влажного воздуха при адвекции его над этой холодной подстилающей поверхностью [27].

На рис. 7 представлены данные с нашего Геопортала, усредненные по постам наблюдений в черте г. Красноярска для периода существования дымов якутских пожаров, о загрязнении атмосферы ($PM_{2,5}$), температуре (T_a) и относительной влажности воздуха (RH), скорости ветра.

Согласно критерию, полученному нами ранее в [19], адвективные туманы охлаждения формируются при условиях, когда $RH > 80\%$ и $0 < (T_a - T_w) < 6\text{ }^\circ\text{C}$ (T_w — температура воды). При $(T_a - T_w) = 0\text{ }^\circ\text{C}$ охлаждение атмосферы невозможно, а при $(T_a - T_w) \geq 6\text{ }^\circ\text{C}$ влажный атмосферный воздух не успевает охладиться до точки росы. Эти условия, согласно данным на рис. 7, выполнялись 9 августа 2021 г. в 05:10 ($T_w = 9,8\text{ }^\circ\text{C}$, $RH = 94\%$, $T_a - T_w = 5,2\text{ }^\circ\text{C}$).

На рис. 8 приведены изображения с городской веб-камеры за 6 и 8–10 августа в 05:10, которые дают представление о состоянии атмосферы: 6 августа нет загрязнений в атмосфере, воздух прозрачный; 8 августа город закрыт сплошной пеленой дымов; 9 августа фрагментарная пелена обусловлена формированием тумана с примесью дыма от пожаров; 10 августа воздух вновь становится прозрачным.

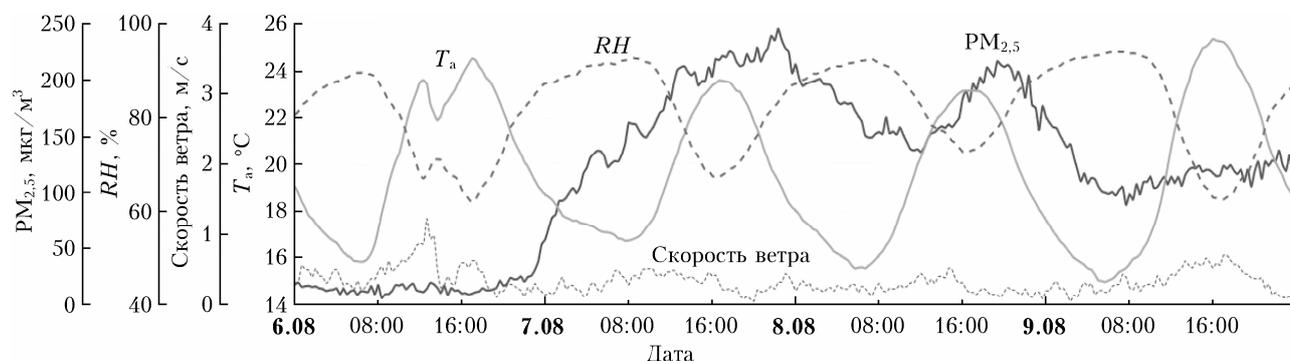


Рис. 7. Усредненные по городу метеоданные за 6–9.08.2021 г.



Рис. 8. Состояние атмосферы по данным городской веб-камеры: а – 6.08; б – 8.08; в – 9.08; з – 10.08.2021 г., 05:10

Заключение

Результаты нашего исследования показали, что в период с 7 по 9 августа 2021 г. якутские лесные пожары обуславливали изменение концентрации $PM_{2.5}$ от 25 до 300 мкг/м^3 в г. Красноярске. Наличие аэрозолей $PM_{2.5}$ вызвало увеличение оптической толщины атмосферы и уменьшение поглощаемой солнечной радиации почвой.

В период наблюдения мы зафиксировали: уменьшение температуры верхнего деятельного слоя почвы ($\Delta T = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$) из-за уменьшения солнечной радиации за счет аэрозолей дымов; уменьшение температуры нижней части приземного слоя атмосферы ($\Delta T = 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$), вызванное турбулентным теплообменом с почвой; формирование адвективных туманов охлаждения над поверхностью р. Енисей в г. Красноярске.

Мы экспериментально проследили причинно-следственную связь: формирование дымов → экранирование солнечной радиации → уменьшение температуры деятельного слоя почвы → уменьшение температуры приземного слоя атмосферы → формирование тумана на р. Енисей на расстоянии 2200 км от пожаров в Якутии.

Согласно современным модельным представлениям происходящие климатические изменения могут привести к удвоению числа пожаров в бореальных лесах к концу нынешнего века, которые будут создавать особое состояние атмосферы и сезонной погоды на огромных площадях и расстояниях в несколько тысяч километров. Поэтому влияние дымов от пожаров будет увеличиваться, и изменение температурных режимов окружающей природной среды будет проявляться все более четко.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМ СО РАН (тема FWES-2021-0004).

Список литературы

1. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Экстремальные природные явления в русских летописях XI–XVII вв. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
2. Shostakovitch V.B. Forest conflagrations in Siberia // J. For. 1925. V. 23, N 4. P. 365–371.
3. Crutzen P., Birks J. Twilight at noon: The atmosphere after a nuclear war // Ambio. 1982. V. 11, N 2–3. P. 114–125.
4. Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C. Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions // Science. 1983. V. 222, N 4630. P. 1283–1292.
5. Golitsyn G.S. New developments from USSR // Environ. Sci. Policy Sustain. Dev. 1986. V. 28, N 8. P. 2–44.
6. Seitz R. Siberian fire as “nuclear winter” guide // Nature. 1986. V. 323, N 6084. P. 116–117.
7. Вельтищев Н.Н., Гинзбург А.С., Голицын Г.С. Климатические эффекты массовых пожаров // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1988. Т. 24, № 3. С. 296–305.
8. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Radiative forcing and climate response // J. Geophys. Res.: Atmos. 1997. V. 102, N D6. P. 6831–6864.
9. Ackerman A.S., Toon O.B., Stevens D.E., Heymsfield A.J., Ramanathan V., Welton E.J. Reduction of tropical cloudiness by soot // Science. 2000. V. 288, N 5468. P. 1042–1047.
10. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 4. С. 301–320.
11. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное

- радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 565–575.
12. *Ramanathan V., Carmichael G.* Global and regional climate changes due to black carbon // *Nat. Geosci.* 2008. V. 1, N 4. P. 221–227.
 13. *Ивлев Л.С.* Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
 14. *Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полюкин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 2. С. 45–54.
 15. *Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полюкин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; *Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtidinov I.M., Pol'kin V.V., Terpuгова S.A., Chernov D.G.* Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 24–30.
 16. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // *Исслед. Земли из космоса.* 2011. № 3. С. 3–13.
 17. *Воронова О.С., Зима А.Л., Кладов В.Л., Черепанова Е.В.* Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 г. // *Исслед. Земли из космоса.* 2020. № 1. С. 70–82.
 18. *Швиденко А.З., Шепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКалум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // *Докл. РАН.* 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
 19. *Шапарев Н.Я., Токарев А.В., Якубайлик О.Э.* Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 5. С. 397–401.
 20. *Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O.* The state of the atmosphere in the city of Krasnoyarsk (Russia) in indicators of sustainable development // *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 2020. V. 27, N 4. P. 349–357.
 21. *Herman J.R., Bhartia P.K., Torres O., Hsu C., Sefstor C., Celarier E.* Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1997. V. 102, N D14. P. 16911–16922.
 22. *Сводный отчет о лесных пожарах (термических аномалиях) на всех видах территорий по данным космического мониторинга по состоянию на 31 декабря 2021 г.* // Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства России. URL: https://public.aviales.ru/main_pages/openform1.shtml?2021-12-31 (дата обращения: 1.12.2022).
 23. *Yakubailik O., Romas'ko V., Pavlichenko E.* Complex for reception and real time processing of remote sensing data // *E3S Web Conf.* 2019. V. 75. P. 03003.
 24. *Gosteva A.A., Yakubailik O.E., Shaparev N.Y.* Wildfires and the spread of smoke from forest fires in the Krasnoyarsk territory in summer 2019 // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 862, N 6. P. 062057.
 25. *Мамвеев Л.Т.* Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
 26. *Pérez-Díaz J.L., Ivanov O., Peshev Z., Álvarez-Valenzuela M.A., Valiente-Blanco I., Evgenieva T., Dreischuh T., Gueorguiev O., Todorov P.V., Vaseashta A.* Fogs: Physical basis, characteristic properties, and impacts on the environment and human health // *Water (Switzerland).* MDPI AG. 2017. V. 9, N 10. P. 807.
 27. *Gultepe I., Isaac G.A., Williams A., Marcotte D., Strawbridge K.B.* Turbulent heat fluxes over leads and polynyas, and their effects on arctic clouds during FIRE-ACE: Aircraft observations for April 1998 // *Atmosphere–Ocean.* 2003. V. 41, N 1. P. 15–34.

N.Ya. Shaparev, A.V. Tokarev, O.E. Yakubailik. **The influence of smoke from the Yakut fires on the state of the environment in Krasnoyarsk in August 2021.**

The paper considers changes in the state of the environment in Krasnoyarsk and its environs during the existence of the smoke of large-scale Yakut fires in August 2021. The appearance of smoke aerosols in the atmosphere led to a weakening of the passage of solar radiation to the Earth's surface and, accordingly, to a decrease in the temperature of the active soil layer and the surface air layer. Advection of cooled air with high relative humidity over the surface of the Yenisei River in the lower reaches of the Krasnoyarsk HPP formed cooling mists.