

## Особенности лесопожарной активности в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири

О. А. Томшин<sup>1</sup>, В. С. Соловьев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований и аэронавтики  
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677980, Россия  
E-mail: tomshinoa@gmail.com*

<sup>2</sup> *Северо-Восточный федеральный университет  
им. М. К. Аммосова, Якутск, 677000, Россия  
E-mail: solovyev@ikfia.ysn.ru*

Представлены результаты исследований лесопожарной активности, вариаций аэрозольной оптической толщины (АОТ), аэрозольного индекса (АИ), метана и угарного газа в Якутии (Восточная Сибирь) по данным спутниковых наблюдений. Анализ пространственно-временной картины распределения лесных пожаров показывает присутствие в центральной части Якутии локальной области с высокой горимостью лесов. Наблюдавшаяся в 2001, 2002, 2012–2014 гг. катастрофическая ситуация с лесными пожарами, предположительно, была во многом обусловлена аномально высокой температурой и низкой влажностью воздуха, зарегистрированными в предпожарный период. Показано, что в годы с высоким уровнем лесопожарной активности фактор лесных пожаров оказывается доминирующим в формировании сезонных вариаций аэрозольных показателей и угарного газа. В условиях плотных дымовых шлейфов от лесных пожаров, когда из-за методических ограничений расчёт АОТ невозможен, более адекватную оценку атмосферного аэрозоля даёт АИ-индекс.

**Ключевые слова:** лесные пожары, аэрозоль, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 11.10.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-261-271

### Введение

Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим значительное влияние на окружающую среду. В результате воздействия ЛП нарушается состояние, биоразнообразие и ресурсный потенциал лесных экосистем. Наибольший урон лесные пожары наносят лесным экосистемам с низким реабилитационным потенциалом, к числу которых относятся бореальные леса Восточной Сибири, произрастающие на вечной мерзлоте в суровых условиях резко-континентального климата (Лыткина, Миронова, 2009; Щербаков и др., 1979). В ходе пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ) и дымовых частиц (твёрдые аэрозоли), влияющих на физико-химические процессы в атмосфере, радиационный баланс и в целом на климат (Бондур и др., 2016; Гинзбург и др., 2008; Ершов и др., 2009; Швиденко, Щепашенко, 2013; van der Werf et al., 2010).

Выбросы от пожаров способны переноситься воздушными массами на значительные расстояния от очагов: в некоторых случаях (при западном переносе) дымовые шлейфы от сибирских пожаров пересекали Тихий океан и наблюдались над побережьем Америки, а в случаях восточного переноса достигали берегов Баренцева моря (Bertschi, Jaffe, 2005; Heilman et al., 2014; Sarkota et al., 2005; Tomshin, Solovyev, 2014). При определённой конфигурации барических и ветровых полей в атмосфере возможно образование застойных зон, где происходит аккумуляция дымовых частиц с формированием аэрозольных «облаков» с высокими значениями аэрозольной оптической толщины (АОТ) площадью в несколько миллионов квадратных километров, наблюдающихся после прекращения ЛП ещё около 5–7 суток (Томшин, Соловьев, 2016).

На гарях от лесных пожаров резко падают значения альбедо подстилающей поверхности, что приводит к нарушению баланса температурного режима почвы. В зоне вечной мерзлоты это обстоятельство может привести к формированию термокарстовых образований с изменением ландшафта и повышением обводнённости местности, а также к заметному увеличению выброса парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.), находящихся в большом количестве в вечномерзлых породах (Федоров и др., 2008). Следует отметить, что время жизни метана в атмосфере составляет ~10 лет, а «парниковый эффект» от него во много раз сильнее по сравнению с углекислым газом.

Одним из актуальных аспектов исследований лесных пожаров в мерзлотном регионе Восточной Сибири является инъекция парниковых газов в атмосферу в результате прямого и опосредованного эффекта от лесных пожаров, влияющих на процессы глобального потепления, наибольшие проявления которого наблюдаются на высоких широтах Северного полушария.

Работам по исследованию крупномасштабных лесных пожаров, атмосферных аэрозолей, их роли в радиационном балансе нижней атмосферы посвящён ряд публикаций (Афонин и др., 2008; Сакерин и др., 2012; Соловьев, Козлов, 2005; Соловьев и др., 2005; Томшин и др., 2012; Трофимова и др., 2008).

Целью работы является исследование особенностей пространственно-временной динамики лесных пожаров и связанных с ней возмущений параметров атмосферы в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири (на примере Якутии).

## Исследуемый регион

Территория Якутии находится в зоне вечной мерзлоты. Бореальные леса занимают около 47% её площади и почти на 90% состоят из лиственницы даурской. На севере преобладает арктическая и субарктическая тундра, представленная лишайниками и мхом. В южной части тундры встречаются карликовые сибирские сосны и лиственницы. Ниже по широте расположены бореальные леса, в северной части представленные лиственницей, в южной дополнительно встречается пихта и сосна. Плотность древостоя и сомкнутость крон лесного полога низкая, что способствует просушке сухостоя, валежника и лесной подстилки. Отсюда низовые пожары являются наиболее распространёнными в лесах Якутии. Низкий уровень осадков и высокие летние температуры воздуха, обусловленные резко-континентальным климатом Якутии, способствуют высокому риску возникновения крупномасштабных лесных пожаров. Основными причинами возникновения лесных пожаров в регионе являются человеческий фактор и грозовая активность; в районах с более высокой плотностью населения высока доля «антропогенных» пожаров, тогда как на периферии доминирует природный фактор (Соловьев и др., 2009). По данным дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз ФБУ «Авиалесоохрана» (<https://aviales.ru/>), ежегодно на территории Якутии регистрируется приблизительно от 150 до 2000 лесных пожаров общей площадью примерно от 0,1 до 4 млн га. Многолетние наблюдения показывают, что лесные пожары на территории Якутии наблюдаются с мая по сентябрь, в основном в течение трёх летних месяцев с максимумом во второй половине лета (Соловьев, Будищев, 2010; Соловьев и др., 2009). Растущая антропогенная нагрузка на окружающую среду заметно повышает уровень лесопожарной активности, что в результате наносит большой ущерб лесной экологии, экономике региона и в целом ухудшает качество жизни населения (Добрых, Захарычева, 2009; Королева и др., 2015; Liu et al., 2015).

## Данные и методы

Уровень лесопожарной активности на исследуемой территории оценивался количеством «хот-спотов» ( $N_{hs}$ ) — аномально горячих точек (пикселей), обнаруженных по данным многоканального радиометра MODIS/Terra (продукт MOD14A1 v6), полученных в период май — сентябрь 2001–2016 гг. В оценке лесопожарной активности также использованы данные радиометра

AVHRR/NOAA, полученные на приёмной станции в Якутске (Соловьев и др., 2009), и данные архива NOAA CLASS (<https://www.class.ncdc.noaa.gov>).

Расчёт среднемесячных значений АОТ (на длине волны 550 нм) и процента облачности над территорией Якутии осуществлялся по данным MODIS/Terra (продукт MOD08\_M3 v6). Среднесуточные значения аэрозольного индекса (АИ) получены по данным приборов OMI/Aura (продукт OMTO3d v003), TOMS/Earth Probe (продукт TOMSEPL3 v008). Для исследования сезонных вариаций общего содержания CO и CH<sub>4</sub> в атмосфере использованы среднемесячные данные прибора AIRS/Aqua (продукт AIRX3STM v006) за 2003–2016 гг.

При оценке влияния метеорологических факторов на объект исследования были использованы данные реанализа (температура, влажность, осадки) из архива NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996). Значения температуры и влажности были приведены к виду отклонений среднемесячных значений от среднемноголетних.

Данные приборов MODIS, OMI, AIRS имеют пространственное разрешение 1×1° (по северной широте и восточной долготе), данные TOMS — 1×1,25°, метеоданные — 2,5×2,5°. Все использованные в работе данные приборов MODIS, OMI, AIRS и TOMS взяты из открытых ресурсов Центра космических полётов им. Р. Годдарда НАСА (Acker, Leptoukh, 2007). Все исходные данные были приведены к пространственному разрешению 1×1°, после чего усреднялись по территории Якутии.

Для оценки возмущающего воздействия лесных пожаров на сезонный ход атмосферных аэрозолей рассматриваемый период 2001–2016 гг. был разделён на три группы пожароопасных сезонов: сезоны с наименьшим уровнем пожарной активности, выступающие в качестве наиболее близких к «фоновым» (2004, 2006, 2007, 2015, 2016 гг.); сезоны с наиболее высоким уровнем ЛП-активности (2001, 2002, 2012–2014 гг.); сезоны с промежуточным уровнем ЛП-активности. Далее по тексту используются сокращения НПА, ВПА и СПА соответственно. Средние значения  $N_{hs}$  составили: для ВПА-сезонов — 23 тыс., для СПА-сезонов — 6 тыс. и НПА-сезонов — 1 тыс.

## Обсуждение и результаты

Динамика активности лесных пожаров на территории Якутии в 2001–2016 гг. представлена на *рис. 1* (см. с. 264) в виде гистограммы  $N_{hs}$ , где ВПА-сезоны помечены сплошными чёрными столбцами, СПА и НПА — соответственно штриховыми и белыми; пунктирной линией показан ход 11-летнего цикла солнечной активности.

Можно отметить некоторую корреляцию вариаций  $N_{hs}$  с уровнем солнечной активности. Годы с высокой лесопожарной активностью приходятся на фазы максимумов 23-го и 24-го 11-летних солнечных циклов, тогда как в годы минимума солнечной активности в регионе наблюдался низкий уровень пожароопасности лесов.

На *рис. 2а* (см. с. 264) представлена карта распределения  $N_{hs}$  на территории России, обнуруженных по данным MODIS в 2001–2016 гг. Пространственное разрешение карты составляет 1×1°. Значения плотности  $N_{hs}$  в каждой градусной ячейке карты получены путём деления общего количества  $N_{hs}$ , зарегистрированных за период 2001–2016 гг. в данной ячейке, на её площадь в квадратных километрах. Цветовая шкала градаций отражает плотность  $N_{hs}$  на 1 км<sup>2</sup>. На южных широтах наблюдается «пояс» пожаров, протянувшийся от западных областей России до Дальнего Востока. Эти пожары, приходящиеся главным образом на нелесные земли и земли сельскохозяйственного назначения, в основном обусловлены сельскохозяйственной деятельностью и отличаются от лесных пожаров сезонным ходом — максимум их активности приходится на раннюю весну и позднюю осень. Группа «пятен» с высокой плотностью  $N_{hs}$  на Западно-Сибирской равнине и заметное «пятно» в западной части Казахстана — газовые факелы в районах нефтегазового промысла; локальное «пятно» на Камчатке — результат вулканической активности. Остальные области  $N_{hs}$  (Забайкалье, Якутия, Чукотка) приходятся на территорию лесного фонда и, соответственно, являются очагами лесных пожаров. Пожары в тундровой зоне редки и обычно не достигают больших размеров.

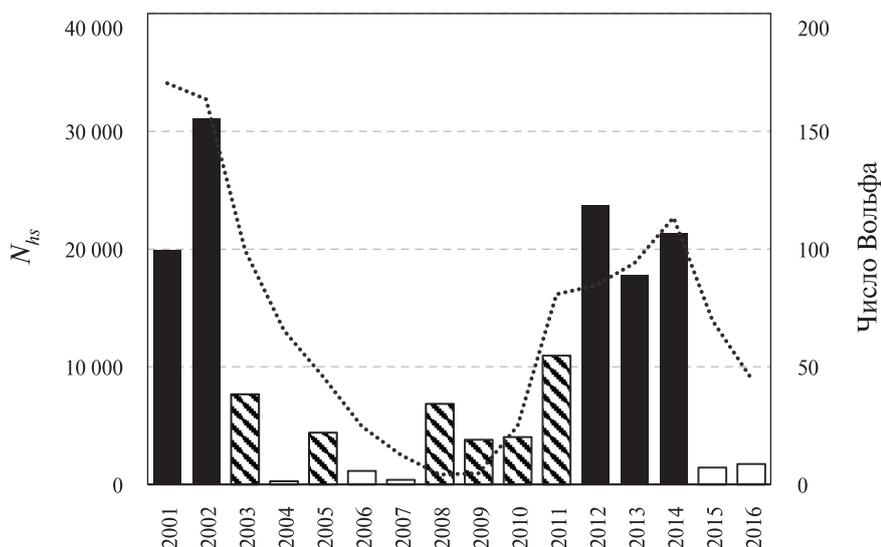


Рис. 1. Межгодовые вариации количества «хотспотов» ( $N_{hs}$ ) на территории Якутии в 2001–2016 гг. Сплошными чёрными столбцами отмечены ВПА-сезоны, со штриховкой — СПА, белыми — НПА. Пунктирной линией показаны вариации числа Вольфа (солнечных пятен)

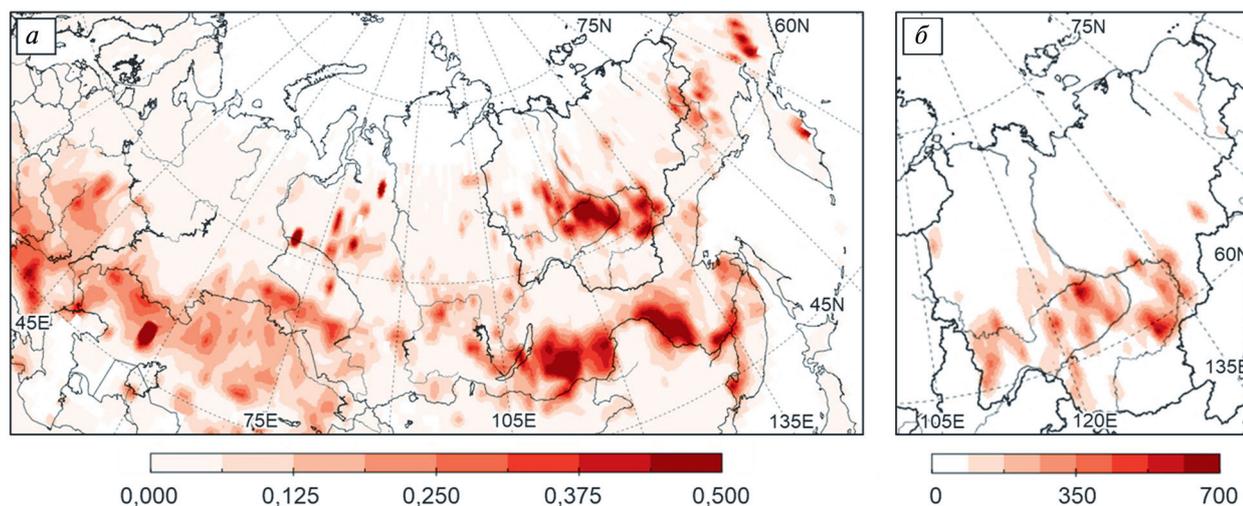


Рис. 2. Карта плотности  $N_{hs}$ , обнаруженных по данным MODIS (2001–2016),  $\text{км}^{-2}$  (а); относительная горимость на 1 тыс. га по данным AVHRR (1985–2015) (б)

Пожары на территории Якутии чаще наблюдаются в центральной её части, формируя область с повышенной горимостью лесов в междуречье Вилюй – Лена – Алдан (см. рис. 2а). Это подтверждается картой распределения гарей (см. рис. 2б), построенной по данным AVHRR/NOAA за более длительный период 1985–2015 гг., где повышенная горимость также наблюдается в центральной Якутии. Предположительно, эта область с высокой горимостью обусловлена сочетанием региональных метеорологических условий, особенностей рельефа и антропогенным фактором (высокой плотностью населения).

Сезонные вариации лесопожарной активности приведены на рис. 3а (см. с. 265): сплошными, штриховыми и пунктирными линиями представлены графики  $N_{hs}$  в ВПА-, СПА- и НПА-сезоны соответственно.

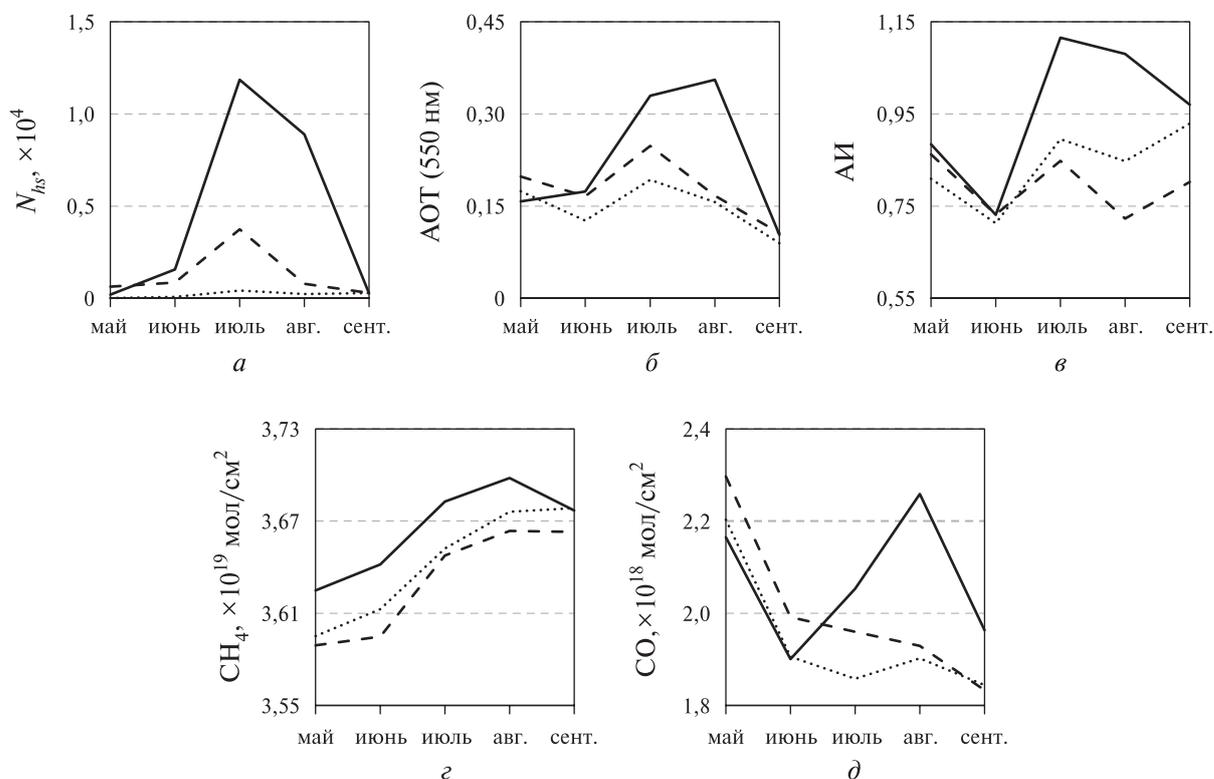
Количество пожаров в мае и июне в годы ВПА и СПА невысоко, в НПА-сезоны их практически нет. Максимум активности лесных пожаров приходится на июль, для ВПА-сезонов он составляет 12 000 «хотспотов», для СПА — 4000 и 400 — для наименее пожароопасных сезонов (НПА). В августе для СПА- и НПА-сезонов наблюдается резкий спад активности пожаров — в среднем на 70 % по сравнению с июлем, в то время как для ВПА-сезонов спад

составил 25%. Это объясняется тем, что основной максимум ЛП в 2002 и 2013 гг. (ВПА) пришёлся на август. В сентябре лесопожарная активность в Якутии в целом прекращается; в отдельные годы возможно присутствие незначительного количества очагов пожаров, которые быстро заканчиваются под осенними дождями.

Вариации АОТ в период май – сентябрь представлены на *рис. 3б*. Сезонный ход АОТ в СПА- и НПА-годы различается несущественно: значения АОТ снижаются с мая по июнь, затем наблюдается небольшой рост с максимумом в июле (~0,2–0,25), возможно, обусловленный активным развитием вегетации, далее следует плавное снижение АОТ до минимума в сентябре (~0,1). Иная картина наблюдается в ВПА-сезоны: рост значений в июле более существенный и достигает ~0,3, после чего следует максимум в августе (~0,35) и резкий спад до минимума в сентябре (~0,1). Очевидно, что такой сезонный ход АОТ обусловлен динамикой лесных пожаров.

Аэрозольный индекс, рассчитываемый по измерениям на длинах волн 331 и 360 нм, наиболее чувствителен к присутствию в атмосфере поглощающих УФ-излучение аэрозолей (сажевым и пылевым частицам) и не критичен к альбедо подстилающей поверхности. Вследствие этого реакция на ЛП-активность в вариациях АИ (см. *рис. 3в*) в ВПА-сезоны выше по сравнению с АОТ и лучше согласуется с вариациями пожаров — резкий рост значений с максимумом в июле, после чего следует небольшой спад в августе.

На *рис. 3д* представлены вариации общего содержания угарного газа. В годы СПА и НПА характер сезонного хода СО имеет одинаковый вид — максимальные значения наблюдаются в мае, после чего следует постепенный спад, длящийся до сентября. Вариации СО в ВПА-сезоны показывают значительные отличия — после спада в мае – июне наблюдается рост значений в июле, в августе наступает максимум ( $2,2 \cdot 10^{18}$  мол./см<sup>2</sup>) и спад — в сентябре. Очевидно, рост общего содержания СО в этот период вызван лесными пожарами, в результате которых в атмосферу выбрасывается большое количество угарного газа. Поскольку спутник Aqua (AIRS) был запущен в 2003 г., то в анализе вариаций СО отсутствуют данные за 2001 и 2002 гг., когда уровень лесопожарной активности был очень высок.



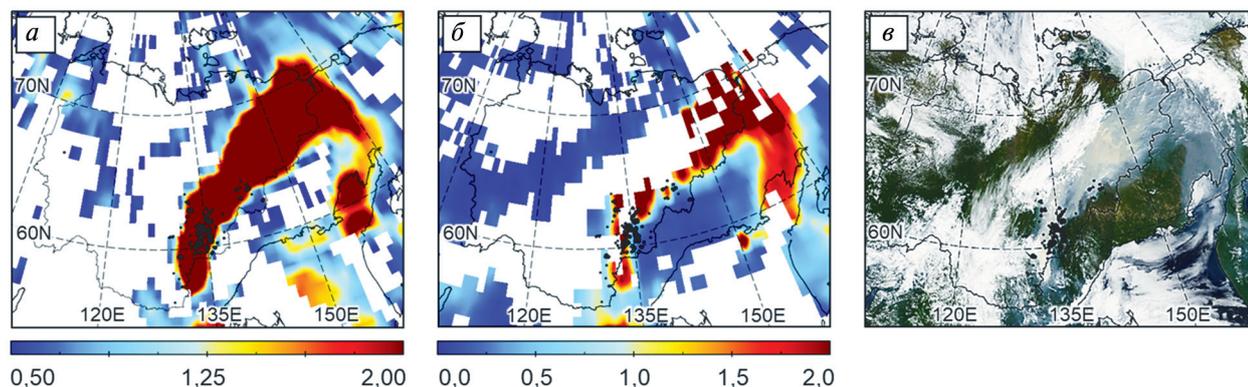
*Рис. 3.* Сезонные вариации: а —  $N_{hs}$ ; б — АОТ; в — АИ; г — общего содержания  $CH_4$ ; д — общего содержания СО в годы ВПА (сплошные линии), СПА (штриховые линии) и НПА (пунктирные линии)

Сезонные вариации метана в целом имеют одинаковый вид для всех сезонов (см. *рис. 3г*): графики  $CH_4$  плавно растут в течение трёх месяцев с мая по август, в сентябре темпы роста спадают. Заметно отличается поведение  $CH_4$  в годы с ВПА — наблюдаются более высокие абсолютные значения, а также имеется небольшой локальный максимум в августе, который, возможно, обусловлен поступлением метана в атмосферу вследствие ЛП.

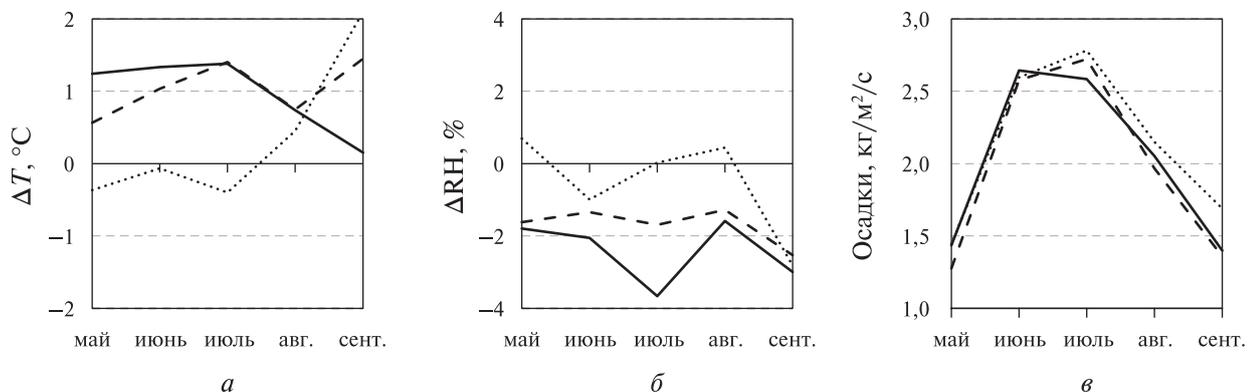
Можно заметить, что максимумы в вариациях лесопожарной активности (см. *рис. 3а*) и АОТ (см. *рис. 3б*) не совпадают. Одним из объяснений служит ограничение алгоритма восстановления АОТ по данным MODIS, связанное с пороговым значением альbedo подстилающей поверхности, выше которого АОТ не рассчитывается. Учитывая, что альbedo некоторых участков плотных дымовых шлейфов зачастую оказывается выше порогового и расчёт АОТ для них невозможен, то среднемесячные значения АОТ оказываются заведомо заниженными. Эта ситуация проиллюстрирована на *рис. 4*, на котором представлены карты распределений среднесуточных значений АИ, АОТ и облачности за 15 июля 2012 г.

Белые пиксели в распределении АИ (см. *рис. 4а*) соответствуют значениям  $АИ < 0,5$ , т.е. облачности и непоглощающим УФ аэрозолям. Основная облачность на *рис. 4в* показана белыми пикселями, дымовым шлейфам от пожаров соответствуют серые пиксели, земной поверхности — тёмные пиксели. Сравнение *рис. 4б* и *в* показывает, что пробелы в АОТ во многом совпадают с пикселями облачности и дыма от пожаров с высокими значениями альbedo (выше пороговой), для которых расчёт АОТ невозможен. Более целостную картину распределения дымовых частиц даёт аэрозольный индекс АИ, распределение которого хорошо повторяет конфигурацию дымового шлейфа от лесных пожаров.

Безусловно, значительную роль в возникновении и развитии лесных пожаров играют погодные условия. На *рис. 5а, б* представлены вариации отклонений значений температуры и относительной влажности от средних многолетних значений.



*Рис. 4.* Карты распределения среднесуточных значений: *а* — АИ; *б* — АОТ; *в* — снимок MODIS/Terra за 15 июля 2012 г. Чёрными точками отмечены «хотспоты»



*Рис. 5.* Сезонные вариации: *а* —  $\Delta T$ ; *б* —  $\Delta RH$ ; *в* — интенсивности осадков в годы ВПА (сплошные линии), СПА (штриховые линии) и НПА (пунктирные линии)

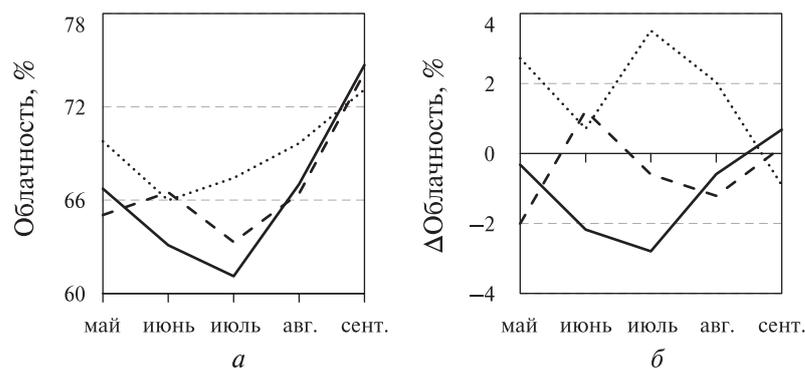


Рис. 6. Сезонные вариации: а — облачности; б — отклонений значений облачности от среднееголетних в годы ВПА (сплошные линии), СПА (штриховые линии) и НПА (пунктирные линии)

В годы с ВПА и СПА наблюдались повышенные значения температуры воздуха в период май — июль относительно среднееголетних (см. рис. 5а), что способствовало просушке лесного горючего материала и, как следствие, повышало риск возникновения и интенсивного развития ЛП. Этому также способствовали низкие значения относительной влажности (см. рис. 5б) в период май — сентябрь в ВПА- и СПА-сезоны, тогда как в НПА-годы значения влажности были близки к среднееголетним. Из характера вариаций температуры и влажности следует, что одним из условий развития крупномасштабных лесных пожаров в Якутии является аномально высокая температура воздуха в первой половине лета (май — июль) при низкой влажности воздуха. Как следует из рис. 5в, сезонный ход интенсивности осадков для всех сезонов приблизительно одинаков. По годовой сумме осадков (~240 мм) территория Якутии относится к зонам степей и полупустынь и, соответственно, осадки, способные оказывать заметное влияние на динамику крупномасштабных пожаров, здесь случаются редко.

На рис. 6 представлены сезонные вариации облачности (рис. 6а) и отклонений значений облачности от средних многолетних значений (рис. 6б). На рис. 6б видно, что в НПА-сезоны общее количество облачности над Якутией в течение большей части пожароопасного сезона (май — сентябрь) было выше среднееголетних значений, в то время как в ВПА-сезоны количество облачности преимущественно меньше среднееголетних значений. Сезонный ход облачности в годы с разным уровнем лесопожарной активности (см. рис. 6а) имеет заметные различия. Минимум сезонного хода облачности (см. рис. 6а) в НПА-сезоны приходится на июнь (66%), после чего начинается плавный рост значений с максимумом в сентябре (73%). В СПА- и ВПА-сезоны минимум сезонного хода приходится на июль (63 и 61% соответственно), за которым следует резкий рост значений с максимумом также в сентябре (74 и 75%).

## Заключение

Исследование лесных пожаров в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири является одной из актуальных задач экологии в условиях современного глобального изменения климата.

На карте распределения лесных пожаров (см. рис. 1), построенной по данным многолетних спутниковых наблюдений, в центральной части Якутии (междуречье Вилюй — Лена — Алдан) выделяется область с высоким уровнем горимости лесов. Предположительно, эта зона обусловлена сочетанием региональных метеорологических факторов, особенностей рельефа и высокой плотностью населения.

Лесные пожары являются важным фактором, влияющим на нижнюю атмосферу и определяющим сезонные вариации атмосферного аэрозоля в пожароопасный сезон. В годы с наиболее высоким уровнем пирогенной активности среднемесячные значения аэрозольной оптической толщины по центральной Якутии в два раза превышали фоновые, достигая ~0,48. При этом среднемесячные локальные (пиксельные) значения АОТ увеличивались до 1,73.

Среднегодовой уровень осадков в Якутии невысок (~240 мм) и сравним с аналогичными показателями зон степей и полупустынь, поэтому решающего влияния на уровень лесопожарной активности в масштабах рассматриваемой территории осадки не оказывают. Более существенными факторами пожароопасности являются быстрый сход снежного покрова, просушка потенциального топлива лесных пожаров (сухостоя, валежника, лесной подстилки) и сухая жаркая погода. Такое стечение обстоятельств наблюдалось в 2001, 2002, 2012–2014 гг. и, предположительно, обусловило чрезвычайный уровень лесопожарной обстановки в регионе. В наименее пожароопасные сезоны значения температуры и влажности воздуха незначительно отличались от среднесезонных показателей.

Ограничения методики расчёта аэрозольной оптической толщины по данным MODIS, связанные с пороговыми значениями альbedo подстилающей поверхности, в случаях, когда альbedo дымовых шлейфов от лесных пожаров оказывается за пределами высокого, не позволяют рассчитывать АОТ или занижают среднюю оценку. В подобных ситуациях предпочтительнее использовать аэрозольный индекс (АИ), не имеющий таких методических ограничений и более чувствительный к «пожарным» аэрозолям.

Сезоны с высокой активностью лесных пожаров пришлись на фазы максимумов 23-го и 24-го солнечных циклов, тогда как в годы с низкой солнечной активностью наблюдался низкий уровень горимости лесов.

Работа выполнена при поддержке грантом Главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов.

## Литература

1. Афонин С. В., Белов В. В., Панченко М. В., Сакерин С. М., Энгель М. В. Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщины на основе спутниковых данных MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 6. С. 510–515.
2. Бондур В. Г., Гордо К. А., Кладов В. Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
3. Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журн. 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.
4. Добрых В. А., Захарычева Т. А. Дым лесных пожаров и здоровье. Хабаровск: Дальневосточный гос. мед. ун-т, 2009. 201 с.
5. Ершов Д. В., Ковганко К. А., Соколова Е. Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-Modis и государственного учета лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 365–372.
6. Королева Т. С., Константинов А. В., Шунькина Е. А. Угрозы и социально-экономические последствия изменения климата для лесного сектора // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского ин-та лесного хозяйства. 2015. № 3. С. 55–71.
7. Лыткина Л. П., Миронова С. И. Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
8. Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарева Т. В., Кабанов Д. М. Особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщины атмосферы в азиатской части России // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 484–490.
9. Соловьев В. С., Будищев А. А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 7. С. 626–629.
10. Соловьев В. С., Козлов В. И. Исследование пространственно-временной динамики лесных пожаров и облачности в Северо-Азиатском регионе по данным спутников NOAA // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 01–02. С. 146–149.
11. Соловьев В. С., Козлов В. И., Муллаяров В. А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.
12. Соловьев В. С., Козлов В. И., Смирнов И. Ф. Пространственно-временная динамика лесных пожаров в Якутии // Наука и образование. 2005. № 1. С. 67–73.

13. Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 145–150.
14. Томшин О.А., Соловьев В.С. Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 598–602.
15. Трофимова Н.В., Сухинин А.И., Дубровская О.А. Дистанционная оценка дымовых эмиссий от крупных лесных пожаров // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2008. № 1 (18). С. 65–69.
16. Федоров А.Н., Мачимура Т., Герасимов Е.Ю., Петров М.И., Константинов П.Я., Ивахана Г., Хаясака Х., Кушида К., Такакай Ф., Десяткин А., Сайто Х. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии // Наука и образование. 2008. № 4. С. 64–72.
17. Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
18. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 226 с.
19. Acker J. G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos Trans. AGU. 2007. V. 88. No. 2. P. 14–17.
20. Bertschi I. T., Jaffe D. A. Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. Iss. D5. CiteID D05303.
21. Heilman W. E., Liu Y., Urbanski S., Kovalev V., Mickler R. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes // Forest Ecology and Management. 2014. V. 317. P. 70–79.
22. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. American Meteorological Soc. 1996. V. 77. No. 3. P. 437–470.
23. Liu J. C., Pereira G., Uhl S. A., Bravo M. A., Bell M. L. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke // Environmental Research. 2015. V. 136. P. 120–132.
24. Sapkota A., Symons J. M., Kleissl J., Wang L., Parlange M. B., Ondov J., Breyse P. N., Diette G. B., Eggleston P. A., Buckley T. J. Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city // Environmental Science and Technology. 2005. V. 39. No. 1. P. 24–32.
25. Tomshin O. A., Solovyev V. S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5742–5749.
26. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Mu M., Kasibhatla P. S., Morton D. C., Defries R. S., Jin Y., van Leeuwen T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. No. 23. P. 11707–11735.

## Features of forest fire activity in boreal forests of the permafrost region of Eastern Siberia

O. A. Tomshin<sup>1</sup>, V. S. Solovyev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS  
Yakutsk 677980, Russia  
E-mail: tomshinoa@gmail.com

<sup>2</sup> M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk 677000, Russia  
E-mail: solovyev@ikfia.ysn.ru

The results of a study on forest fire activity, variations in aerosol optical thickness (AOT), aerosol index (AI), methane and carbon monoxide in Yakutia (Eastern Siberia) according to satellite observations are presented. Analysis of the spatiotemporal distribution of forest fires indicates the presence of a local

area with high frequency of forest fires in the central part of Yakutia. The catastrophic forest fires observed in 2001, 2002 and 2012–2014 presumably were caused by abnormally high temperatures and low humidity in the pre-fire period. It is shown that in years with a high level of forest fire activity, the forest fire factor proves to be the dominant one in the formation of seasonal variations of aerosol indicators and carbon monoxide. In conditions of dense smoke from forest fires, when the calculation of AOT is impossible due to methodological limitations, the AI index is more adequate for estimating the atmospheric aerosol.

**Keywords:** forest fires, aerosols, remote sensing

Accepted: 11.10.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-261-271

## References

1. Afonin S. V., Belov V. V., Panchenko M. V., Sakerin S. M., Engel' M. V., Korrelyatsionnyi analiz prostranstvennykh polei aerazol'noi opticheskoi tolshchi na osnove sputnikovykh dannykh MODIS (Correlation analysis of spatial fields of aerosol optical thickness based on MODIS satellite data), *Optika atmosfery i okeana*, 2008, Vol. 21, No. 6, pp. 510–515.
2. Bondur V. G., Gordo K. A., Kladov V. L., Prostranstvenno-vremennye raspredeleniya ploshchadei prirodnykh pozharov i emissii uglerodsoderzhashchikh gazov i aerazolei na territorii Severnoi Evrazii po dannym kosmicheskogo monitoringa (Spatio-temporal distributions of areas of natural fires and emissions of carbon-containing gases and aerosols in Northern Eurasia by space monitoring data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 6, pp. 3–20.
3. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M., Vliyanie estestvennykh i antropogennykh aerazolei na global'nyi i regional'nyi klimat (The impact of natural and anthropogenic aerosols on the global and regional climate), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, Vol. LII, No. 5, pp. 112–119.
4. Dobrykh V. A., Zakharycheva T. A., *Dym lesnykh pozharov i zdorov'e* (Smoke of forest fires and health), Khabarovsk: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi meditsinskii universitet, 2009, 201 p.
5. Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N., GIS-tehnologiya otsenki pirogennykh emissii ugleroda po dannym Terra-Modis i gosudarstvennogo ucheta lesov (GIS technology for estimating pyrogenic carbon emissions from Terra-Modis data and state forest inventory), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 365–372.
6. Koroleva T. S., Konstantinov A. V., Shun'kina E. A., Ugrozy i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata dlya lesnogo sektora (Threats and socio-economic consequences of climate change for the forest sector), *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*, 2015, No. 3, pp. 55–71.
7. Lytkina L. P., Mironova S. I., Poslepozhar'naya suksessiya v lesakh kriolitozony (na primere Tsentral'noi Yakutii) (Post-fire succession in the forests of the permafrost zone (on example of Central Yakutia)), *Ekologiya*, 2009, No. 3, pp. 168–173.
8. Sakerin S. M., Andreev S. Yu., Bedareva T. V., Kabanov D. M., Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya aerazol'noi opticheskoi tolshchi atmosfery v aziatskoi chasti Rossii (Features of the spatial distribution of the aerosol optical thickness of the atmosphere in the Asian part of Russia), *Optika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 6, pp. 484–490.
9. Solov'ev V. S., Budishchev A. A., Vozmushcheniya aerazol'noi opticheskoi tolshchiny atmosfery, vyzvannyye lesnymi pozharami v Yakutii (Disturbances of aerosol optical thickness of atmosphere caused by forest fires in Yakutia), *Optika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 23, No. 7, pp. 626–629.
10. Solov'ev V. S., Kozlov V. I., Issledovanie prostranstvenno-vremennoi dinamiki lesnykh pozharov i oblachnosti v Severo-Aziatskom regione po dannym sputnikov NOAA (Investigation of the spatiotemporal dynamics of forest fires and clouds in the North-Asian region from NOAA satellite data), *Optika atmosfery i okeana*, 2005, Vol. 18, No. 01–02, pp. 146–149.
11. Solov'ev V. S., Kozlov V. I., Mullayarov V. A., *Distantsionnyi monitoring lesnykh pozharov i groz v Yakutii* (Remote monitoring of forest fires and thunderstorms in Yakutia), Yakutsk: YaNTs SO RAN, 2009, 108 p.
12. Solov'ev V. S., Kozlov V. I., Smirnov I. F., Prostranstvenno-vremennaya dinamika lesnykh pozharov v Yakutii (Spatial-temporal dynamics of forest fires in Yakutia), *Nauka i obrazovanie*, 2005, No. 1, pp. 67–73.
13. Tomshin O. A., Protopopov A. V., Solov'ev V. S., Issledovanie variatsii atmosfernogo aerolya i ugar'nogo gaza v oblasti lesnykh pozharov (Study of atmospheric aerosol and carbon monoxide variations over

- forest fires), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 145–150.
14. Tomshin O. A., Solov'ev V. S., Issledovanie krupnomasshtabnykh neodnorodnostei aerazol'nykh polei, vyzvannykh lesnymi pozharami v Sibiri (Studying of large-scale inhomogeneities of aerosol fields caused by forest fires in Siberia), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 598–602.
  15. Trofimova N. V., Sukhinin A. I., Dubrovskaya O. A., Distantsionnaya otsenka dymovykh emissii ot krupnykh lesnykh pozharov (Remote assessment of smoke emissions from large forest fires), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva*, 2008, No. 1 (18), pp. 65–69.
  16. Fedorov A. N., Machimura T., Gerasimov E. Yu., Petrov M. I., Konstantinov P. Ya., Ivakhana G., Khayasaka X., Kushida K., Takakai F., Desyatkin A., Saito X., Vliyanie pozharov na merzlotnye landshafty v Tsentral'noi Yakutii (Influence of fires on permafrost landscapes in Central Yakutia), *Nauka i obrazovanie*, 2008, No. 4, pp. 64–72.
  17. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii (Climate change and forest fires in Russia), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61.
  18. Shcherbakov I. P., Zabelin O. F., Karpel' B. A., *Lesnye pozhary v Yakutii i ikh vliyanie na prirodu lesa* (Forest fires in Yakutia and their impact on the nature of the forest), Novosibirsk: Nauka, 1979, 226 p.
  19. Acker J. G., Leptoukh G., Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data, *Eos Trans. AGU*, 2007, Vol. 88, No. 2, pp. 14–17.
  20. Bertschi I. T., Jaffe D. A., Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires, *Journal of Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Issue D5, CiteID D05303.
  21. Heilman W. E., Liu Y., Urbanski S., Kovalev V., Mickler R., Wildland fire emissions, carbon, and climate: Plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 317, pp. 70–79.
  22. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, Vol. 77, No. 3, pp. 437–470.
  23. Liu J. C., Pereira G., Uhl S. A., Bravo M. A., Bell M. L., A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke, *Environmental Research*, 2015, Vol. 136, pp. 120–132.
  24. Sapkota A., Symons J. M., Kleissl J., Wang L., Parlange M. B., Ondov J., Breyssse P. N., Diette G. B., Eggleston P. A., Buckley T. J., Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city, *Environmental Science and Technology*, 2005, Vol. 39, No. 1, pp. 24–32.
  25. Tomshin O. A., Solovyev V. S., The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5742–5749.
  26. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Mu M., Kasibhatla P. S., Morton D. C., Defries R. S., Jin Y., van Leeuwen T. T., Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, Vol. 10, No. 23, pp. 11707–11735.