

Вариации аэрозольной оптической толщи, чёрного углерода, угарного газа и метана по спутниковым наблюдениям атмосферы в сезон лесных пожаров в районе Якутска в 2013–2021 гг.

Н. В. Родионова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

Представлены результаты исследований вариаций аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, чёрного углерода (ЧУ), концентрации угарного газа (СО) и метана (СН₄) в условиях лесных пожаров в районе Якутска (Центральная часть Якутии) в летний сезон 2013–2021 гг. Работа проведена на базе спутниковых наблюдений системы анализа и визуализации данных Giovanni. Сделано сравнение измерений АОТ по данным инструмента OMI/AURA с наземными измерениями солнечным фотометром на станции глобальной сети AERONET в Якутске. Определена корреляция между наземными и спутниковыми данными. Показаны сезонные и межгодовые вариации АОТ для Якутска за 2013–2021 гг., где отмечен рост значений АОТ с 2019 г. Для оценки концентрации ЧУ использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2. Определены сезонные и межгодовые вариации ЧУ для Якутска со стабильным ростом концентрации ЧУ с 2013 г. Оценка концентрации угарного газа и метана проведена по данным AIRS/Aqua. Для сезонного хода концентрации СО характерно снижение значений в летний период, в пределах которого есть локальные максимумы для лет с высокой пирогенной активностью. Межгодовой ход концентрации СО характеризуется ростом значений в пирогенные годы. Межгодовой ход концентрации метана характерен стабильным ростом значений.

Ключевые слова: лесные пожары, дистанционное зондирование, аэрозольная оптическая толщина, чёрный углерод, угарный газ, метан

Одобрена к печати: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242

Введение

Лесопожарная обстановка в Якутии традиционно достаточно сложная, что связано прежде всего с тем, что в республике очень сухое и жаркое лето: апрель, май, июнь, июль — это обычно засушливый период, когда выпадает крайне мало осадков, в некоторые годы их вообще не бывает. Июнь 2021 г. для центральных районов республики выдался самым жарким и сухим за всю историю наблюдений с 1888 г. Масштабные пожары, уничтожающие десятки тысяч гектаров тайги, — традиционные для региона события. Бореальные леса в Якутии, занимающие около 47 % её площади, в 2021 г. горели с мая. В Якутске, где проживает треть всего населения региона, плотность взвешенных частиц в воздухе порой в 15–30 раз превышала предельно допустимую концентрацию (<https://regnum.ru/news/society/3335864.html>).

В настоящей работе исследовались вариации атмосферного аэрозоля, чёрного углерода (ЧУ), концентрации угарного газа (СО) и метана (СН₄), вызванные лесными пожарами в центральной части Якутии (междуречье Вилюй — Лена — Алдан) в летний сезон 2013–2021 гг. Работа проведена на базе системы анализа и визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>).

Исходные данные

Объектом исследования выступает Якутск с окрестностями в период 2013–2021 гг. Столица региона в летний период 2021 г. была регулярно затянута дымом, концентрация загрязняющих

веществ в воздухе превышала норму в несколько раз. На *рис. 1* показаны снимки Landsat-8 (уровень L2) за 28 июня, 30 июля и 31 августа 2021 г. (<https://earthexplorer.usgs.gov>), демонстрирующие динамику изменения площади гарей в регионе вблизи Якутска (красный четырёхугольник).

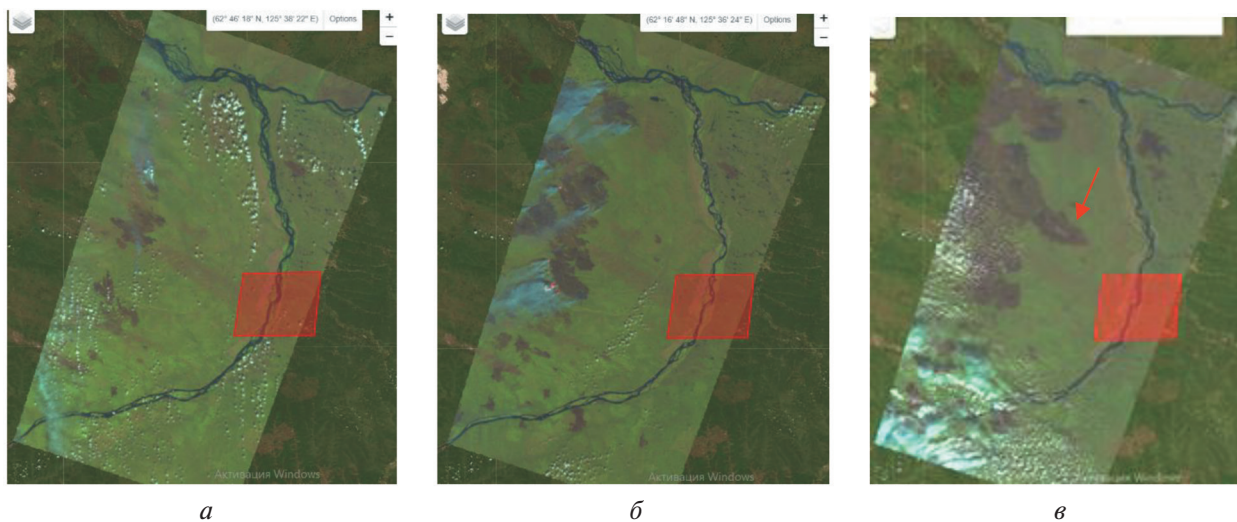


Рис. 1. Снимки Landsat-8 за 28 июня (а), 30 июля (б) и 31 августа (в) 2021 г.

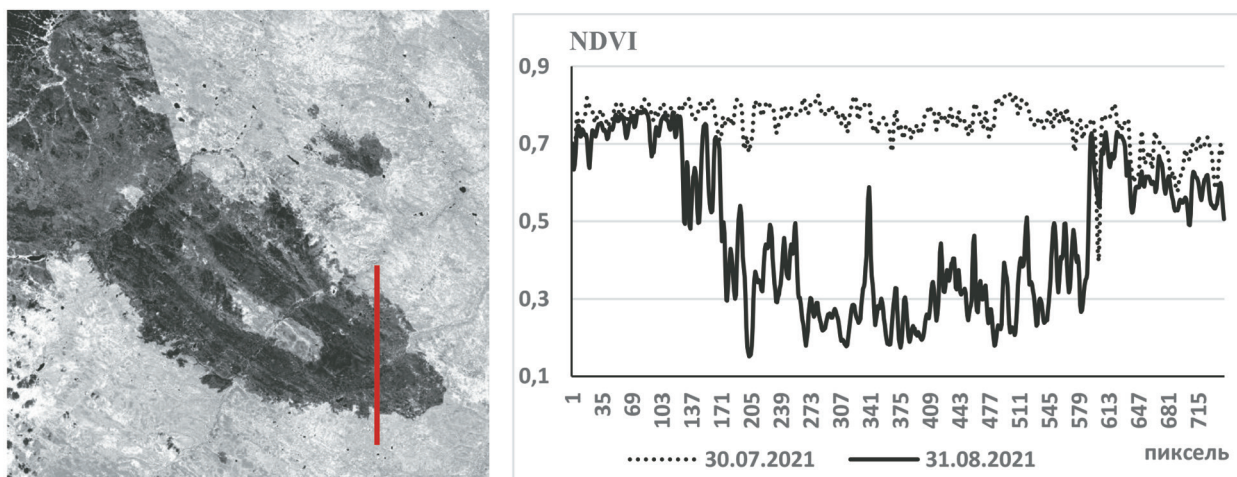


Рис. 2. Положение профиля и значения NDVI для сеансов Landsat-8 30 июля и 31 августа

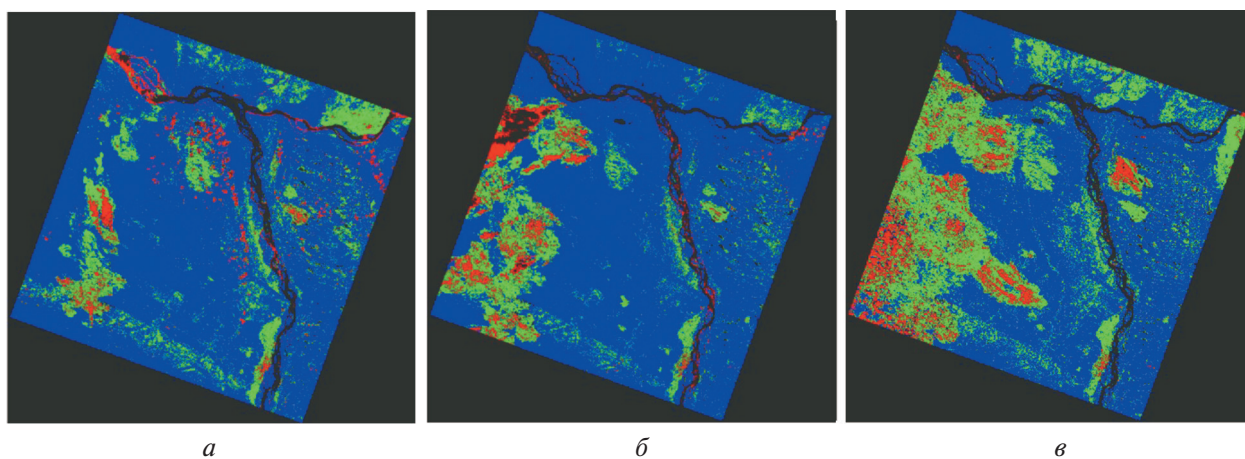


Рис. 3. RGB-изображения NDVI для 28 июня (а), 30 июля (б) и 31 августа (в)

Наибольшая территория с гарями отмечена в августе. Для фрагмента, обозначенного на *рис. 1* за 31 августа красной стрелкой, определено изменение индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) вдоль вертикального профиля с координатами $62^{\circ} 29' 03''$ с. ш., $128^{\circ} 54' 45''$ в. д. по прямой до $62^{\circ} 21' 31''$ в. д., проходящего через территорию с гарью (*рис. 2*, см. с. 233), для 30 июля и 31 августа 2021 г. Длина профиля — 22,75 км. Верхняя и нижняя части профиля находятся вне гари. Среднее значение NDVI равно $0,754 \pm 0,054$ для 30 июля и значительно меньше для 31 августа — $0,464 \pm 0,192$.

Изображения NDVI для рассматриваемой территории показаны на *рис. 3* (см. с. 233) в RGB-кодировке (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий): red — $0 < \text{NDVI} \leq 0,3$; green — $0,3 < \text{NDVI} \leq 0,6$; blue — $\text{NDVI} > 0,6$ для 28.06.2021 (см. *рис. 3а*), 30.07.2021 (см. *рис. 3б*) и 31.08.2021 (см. *рис. 3в*).

Спутниковая оценка состояния атмосферы

В настоящей работе исследовались вариации аэрозольной оптической толщи (АОТ), чёрного углерода, концентрации CO и CH₄ на фоне лесных пожаров в Якутии в летний сезон 2013–2021 гг.

Наземная и спутниковая оценка АОТ

Среди радиационно-значимых компонентов атмосферы наряду с парниковыми газами и облаками важную роль играет атмосферный аэрозоль, основная оптическая характеристика которого — АОТ атмосферы. Аэрозольная оптическая толщина (безразмерная величина) характеризует ослабление интенсивности светового потока при прохождении через атмосферный аэрозоль. Аэрозольные частицы оказывают значительное влияние на температурный баланс атмосферы, поскольку они способны поглощать, рассеивать, отражать солнечное излучение и инициировать процессы образования облаков. Основные природные факторы, влияющие на долгосрочную изменчивость АОТ, — извержения вулканов (Bryson, Goodman, 1980), лесные пожары (Сакерин и др., 2008), песчаные и пылевые бури.

В работе (Томшин, Соловьев, 2018) предложена оценка лесопожарной активности (ЛПА) по количеству аномально горячих точек (хотспотов), обнаруженных по спутниковым данным. Так, период май–сентябрь 2001–2016 гг. для центральной части Якутии был разделён по ЛПА на три группы: 2004, 2006, 2007, 2015, 2016 гг. — с наименьшим уровнем ЛПА (наиболее близкие к «фоновым»); 2001, 2002, 2012–2014 гг. — с наиболее высоким уровнем ЛПА; остальные годы — промежуточный уровень ЛПА. В группу с высоким уровнем ЛПА из периода 2017–2021 гг. следует добавить 2019 и 2021 гг. Авторами работы (Томшин, Соловьев, 2018) продемонстрировано, что доминантой в формировании сезонных вариаций аэрозольных показателей (АОТ и АИ (аэрозольный индекс)) и угарного газа выступает фактор лесных пожаров в годы с высоким уровнем ЛПА.

В данной работе проводится сопоставление наземных измерений значений АОТ солнечным фотометром CIMEL-318 (уровень 1,5, усреднение за день, длина волны 500 нм) на станции AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork) в Якутске (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) с измерениями инструмента OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura (длина волны 500 нм, продукт OMI OMAERUVd v003, пространственное разрешение $1 \times 1^{\circ}$ (широта \times долгота)).

На *рис. 4* (см. с. 235) приведены графики наземных (AERONET) измерений значений АОТ и спутниковых данных OMI (Aura) для Якутска за период апрель–август 2013–2015, 2018, 2020–2021 гг. Для 2019 г. данные АОТ AERONET для Якутска есть только до 7 июня. Для определения возможной корреляции наземных и спутниковых измерений выбраны сеансы, для которых одновременно были проведены и наземные, и спутниковые измерения. Для этих измерений определялись коэффициенты корреляции Спирмена ρ_s на основе программы Attestat,

находящейся в свободном доступе. В *таблице* приведены значения ρ_s , p (уровень статистической значимости) и N (количество измерений) для 2013–2021 гг. Самая высокая корреляция получена для 2021 г.: $\rho_s = 0,94$. Значения АОТ для 2021 г. по данным OMI и AERONET практически не различаются с апреля по июнь и не превышают 0,4. В июле и августе (период сильной пирогенной обстановки) значения АОТ сильно возрастают и достигают 5 августа локальных значений порядка 4,4 по наземным данным и 3,4 по спутниковым, что превышает значения для остальных рассмотренных лет. Для 2020 г. корреляция наземных и спутниковых данных отсутствует. Причиной является недостаточность данных OMI для Якутска для летнего периода (см. *рис. 4*).

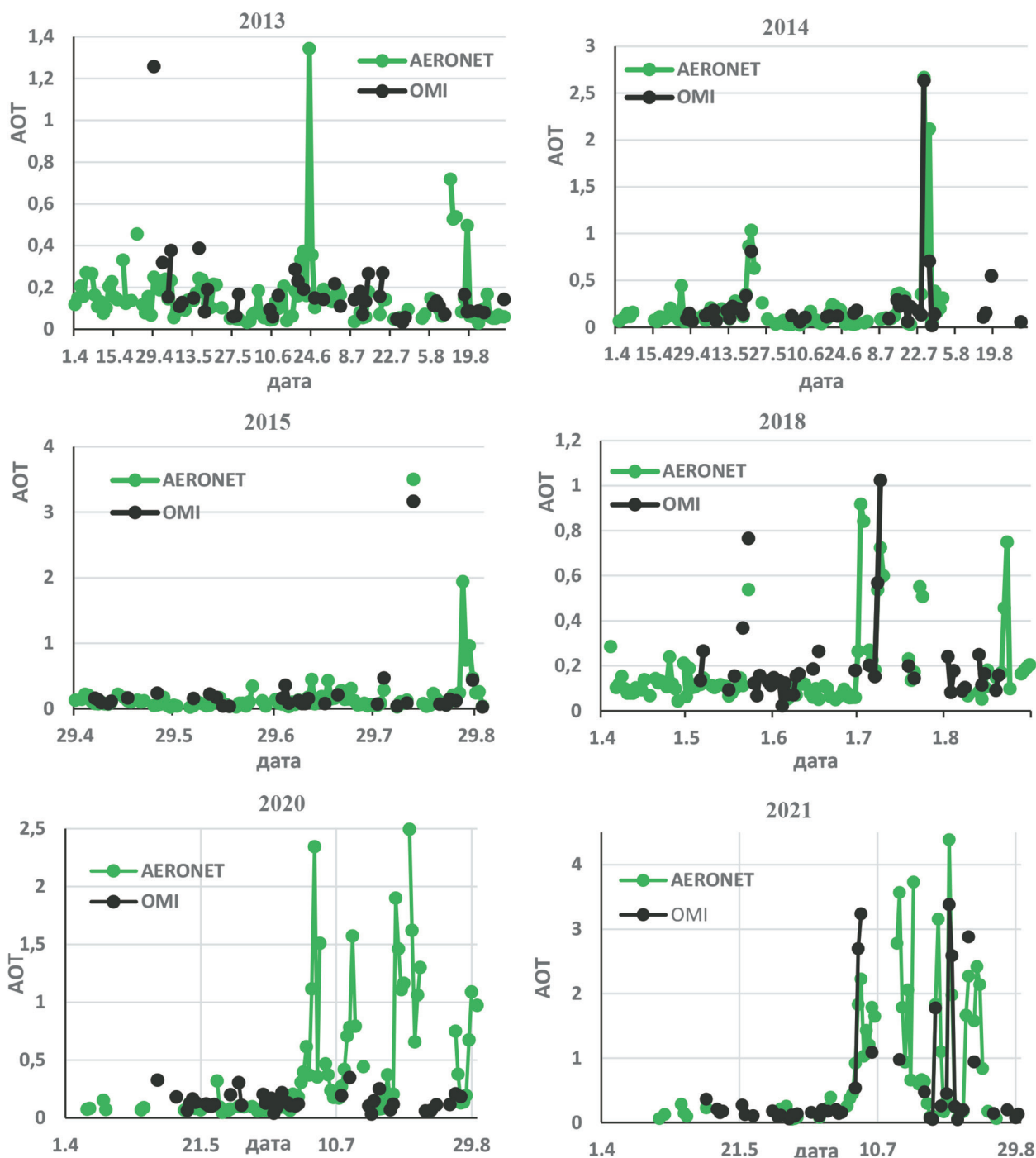


Рис. 4. AERONET и OMI измерения АОТ для Якутска в апреле – августе 2013–2015, 2018, 2020–2021 гг.

Коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми измерениями АОТ

Год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ρ_S	0,66	0,63	0,56	0,38	0,36	0,42	—	0,06	0,94
p	0	4,8e-5	4,1e-4	0,024	0,01	0,02	—	0,38	0
N	42	33	32	28	40	23	2	26	28

Для определения сезонного хода и межгодовых вариаций значений АОТ для Якутска за период 2013–2021 гг. использованы данные MODIS-Terra (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (продукт MOD08_M3 v6.1, длина волны 550 нм, пространственное разрешение $1 \times 1^\circ$) (*рис. 5*). Сезонный ход значений АОТ характерен снижением значений с апреля к июню, далее ростом значений в июле и августе и снижением значений в сентябре. В июле и августе 2021 г. значение АОТ превышало значения в летние месяцы за все рассматриваемые годы и составляло $\sim 1,2$ в июле и ~ 1 в августе.

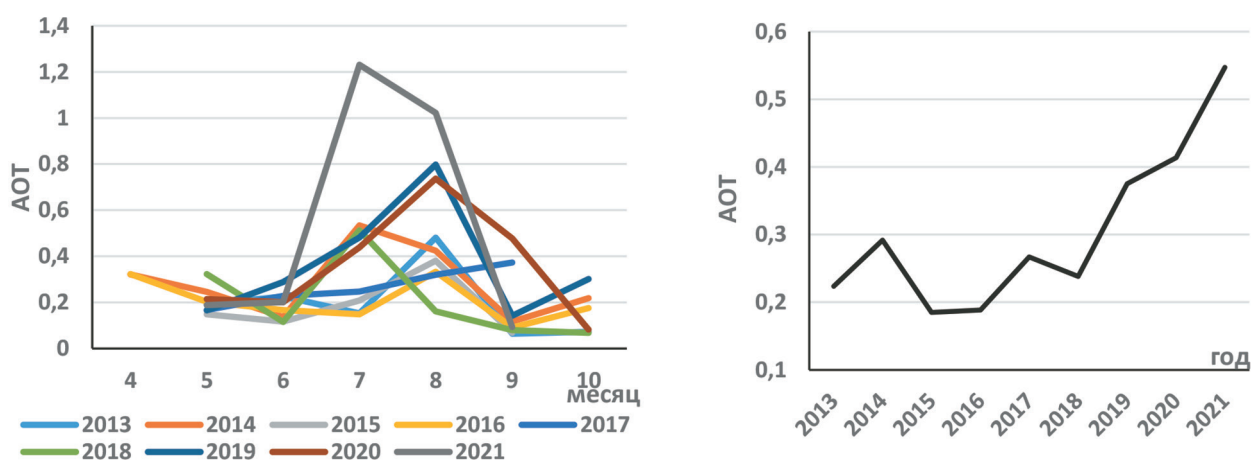


Рис. 5. Сезонные и межгодовые вариации значений АОТ для Якутска для периода 2013–2021 гг. (май – сентябрь)

Известно, что среднегодовое глобальное значение АОТ, полученное по спутниковым данным MODIS, TOMS (*англ.* Total Ozone Mapping Spectrometer), AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) (Chubarova et al., 2012), равно 0,16. Оценим по данным MODIS среднегодовые значения АОТ для Якутска за период 2013–2021 гг. График межгодовых вариаций АОТ проведён при усреднении значений АОТ за 5 мес (май – сентябрь) (данные за месяцы с ноября по март отсутствуют). График имеет две характерные области: 2013–2018 гг. — значения АОТ не превышают 0,3 и 2019–2021 гг. — значительный рост АОТ (2019 г. — 0,375, 2021 г. — 0,547). В качестве фонового значения АОТ было взято 0,186 как среднее за май – сентябрь 2015 и 2016 гг. Тогда превышение значений АОТ над фоновыми для 2019 г. составляет 2 раза, для 2020 г. — 2,2 раза и для 2021 г. — 2,9 раза.

Спутниковая оценка содержания чёрного углерода в атмосфере

Крупнейшие источники выбросов чёрного углерода — лесные пожары. ЧУ — это «твёрдые частицы, в основном состоящие из чистого углерода, которые адсорбируют солнечную радиацию на всех длинах волн» (Report..., 2012). Чёрный углерод — основной компонент сажи. Время его жизни в атмосфере — от нескольких дней до недель. Частицы ЧУ легко вымываются осадками. ЧУ оказывает влияние на климат, поглощая солнечную энергию и излучая тепловую, а при выпадении на земную поверхность изменяет альбедо, приводя к дополнительному нагреванию поверхности (Смирнов и др., 2015).

Регулярный мониторинг содержания ЧУ в приземной атмосфере и выпадениях осуществляется с начала 2010-х гг. на Полярной геофизической обсерватории «Тикси». Но для остальной территории редко удаётся проводить измерения непрерывно в течение года и более. Спутниковый мониторинг выступает основным помощником в этой проблеме. Данные реанализа спутниковой информации MERRA-2 (*англ.* Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) включают определение содержания ЧУ в атмосфере. Одной из первых работ, касающихся верификации данных реанализа MERRA-2 о содержании ЧУ в атмосфере, стало исследование (Виноградова и др., 2019), где приведено сравнение среднемесячных результатов мониторинга концентрации ЧУ в приземном воздухе в пункте наблюдений на территории Печоро-Илычского биосферного заповедника со спутниковыми данными (реанализ MERRA-2), показавшее удовлетворительное соответствие, которое можно считать их взаимной верификацией и подтверждением достоверности.

Для оценки поверхностной концентрации массы ЧУ (*англ.* surface mass concentration — SMC, $\text{кг}/\text{м}^3$) использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2 за 2013–2021 гг. (продукт MERRA-2 model M2TMNXAER v5.12.4, пространственное разрешение $0,5 \times 0,625^\circ$ (широта \times долгота)). Данные усреднены по площадке с центром $61^\circ 39' 42''$ с. ш., $129^\circ 22'$ в. д. (Якутск).

На рис. 6 приведены графики сезонных и межгодовых вариаций SMC ЧУ для Якутска. Сезонный и межгодовой ходы значений ЧУ близки по форме с соответствующими вариациями АОТ для Якутска. Для сезонного хода ЧУ характерны малые значения с октября по июнь, скачок значений в июле–августе–сентябре и резкий спад значений к октябрю. В непирогенные годы (2015–2016) рост значений в летний сезон небольшой, в отличие от лет с высокой ЛПА (2019–2021). Локальный максимум ЧУ принадлежит июлю 2021 г. со значением $10\,450 \text{ нг}/\text{м}^3$. Для межгодовых вариаций ЧУ отметим стабильный рост значений с 2019 г. Наименьшие межгодовые значения SMC ЧУ относятся к непирогенным годам и равны порядка $120 \text{ нг}/\text{м}^3$ для 2015 г., наибольшее значение $1260 \text{ нг}/\text{м}^3$ принадлежит 2021 г. Для сравнения на графике межгодовых вариаций приведён фоновый график межгодовых вариаций содержания ЧУ для Тикси. Отмечаем разительное отличие данных графиков для пирогенных годов.

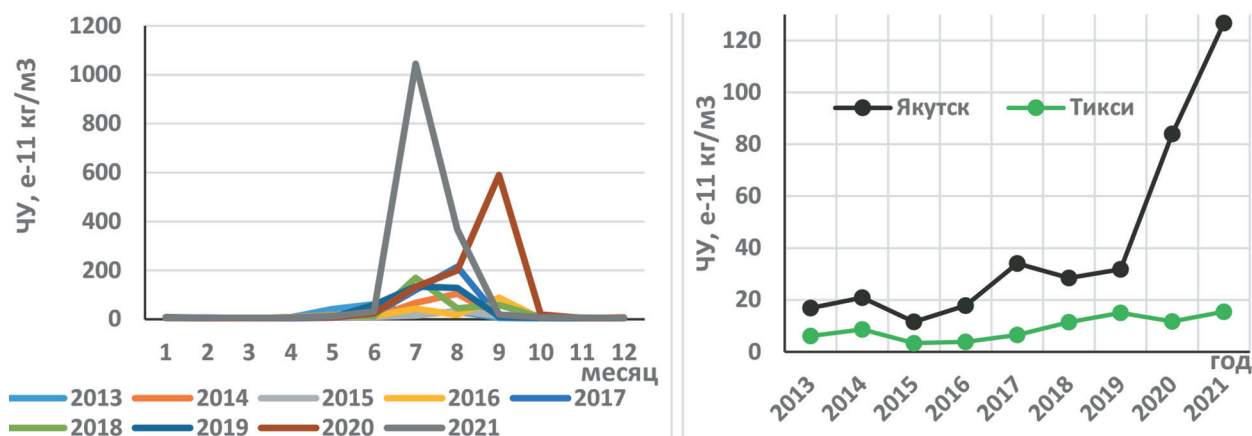


Рис. 6. Сезонные (слева) и межгодовые (справа) вариации ЧУ SMC для Якутска

Сезонные и межгодовые вариации CO

Угарный газ попадает в атмосферный воздух при любом типе горения. Преобладающая часть (~90 %) атмосферного CO образуется в результате природных процессов (вулканические и болотные газы, лесные и степные пожары, жизнедеятельность земной и океанической флоры и фауны). Время жизни CO в атмосфере — около месяца (Дерюгина, 2017).

Для исследования вариаций концентрации CO в атмосфере использовались ежедневные (дневные) данные AIRS/Aqua (англ. Atmospheric Infrared Sounder) (продукт AIRS3STM v7.0), усреднённые по площадке с центром 61° 39' 42" с. ш., 129° 22' в. д. (Якутск) (пространственное разрешение 1×1°, барический уровень 1000 гПа). На рис. 7а показаны среднемесячные значения концентрации CO (данные за июль отсутствуют) для Якутска.

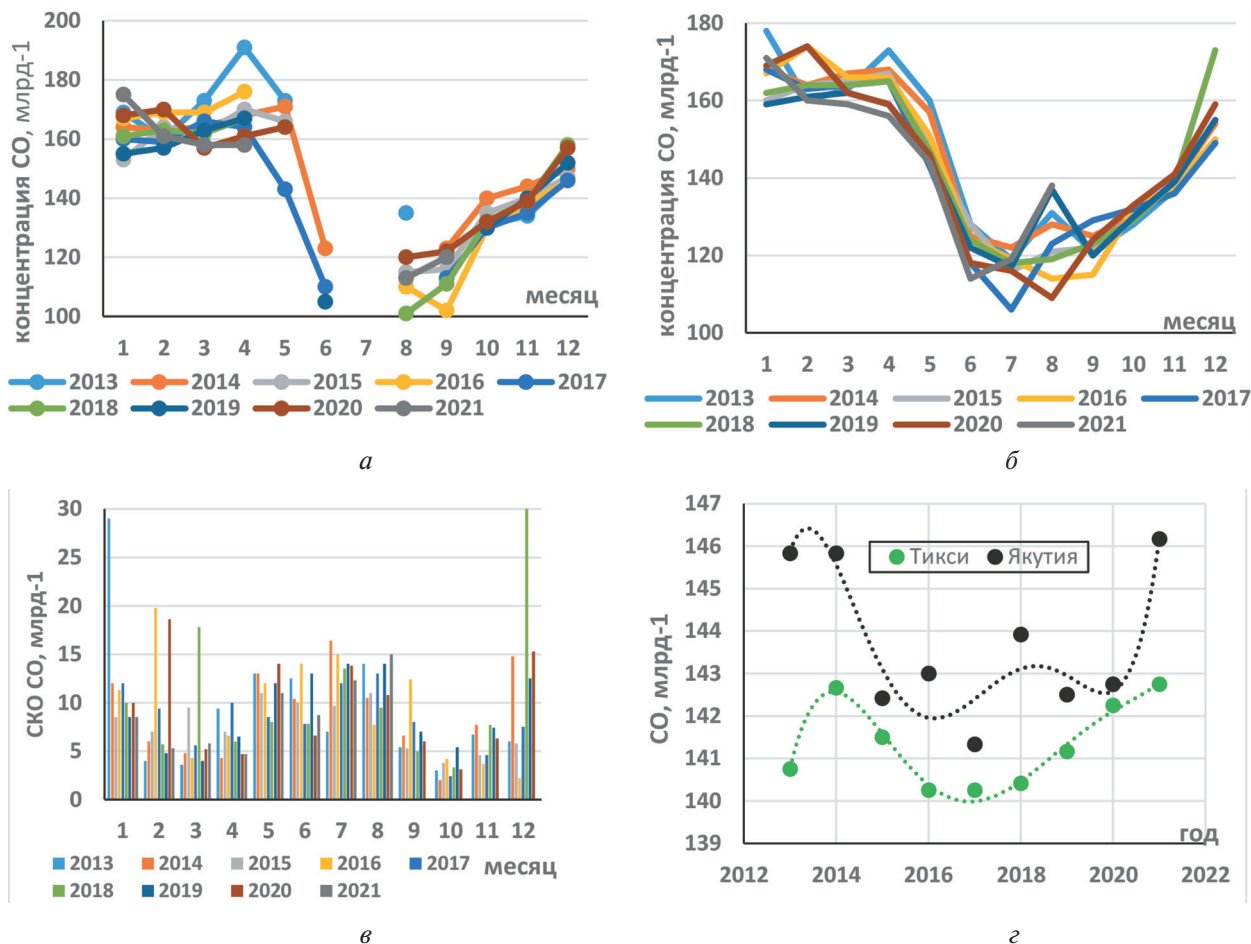


Рис. 7. Сезонные и межгодовые вариации концентрации угарного газа для Якутска (а) и Центральной Якутии (б, г) и СКО CO (в) за 2013–2021 гг.

Сезонные вариации отличаются высокими концентрациями CO в зимние и весенние (март–апрель) месяцы и снижением значений концентрации CO в летние месяцы. Нехватка данных за летний сезон не позволила оценить влияние лесных пожаров на эмиссию CO. Для решения проблемы были рассмотрены вариации CO на более обширной территории в Центральной Якутии с координатами 58–68,5° с. ш., 103–141° в. д., для которой спутниковые данные за летний сезон были. На рис. 7б показан сезонный ход концентрации CO и среднеквадратичные отклонения (рис. 7в) для Центральной Якутии. В летний сезон выявился локальный максимум концентрации CO в августе для 2019 и 2021 гг. со значениями 137–138 частиц·млрд⁻¹. Для 2020 г. в августе отмечен минимум концентрации CO, равный 109 частиц·млрд⁻¹. На графике межгодовых вариаций содержания CO (рис. 7г) приведены данные для Якутии и в качестве фоновых — данные для Тикси. Линии тренда для обоих графиков наилучшим образом, в смысле наибольших коэффициентов детерминации R^2 , описываются полиномами 5-й степени ($R^2 = 0,85$ для Якутии и $R^2 = 0,98$ для Тикси). Для Якутии в пирогенные годы (2013, 2014, 2021) наблюдается скачкообразный рост содержания CO. Межгодовые фоновые (Тикси) значения содержания CO для всех лет меньше соответствующих значений для Якутии.

Сезонные и межгодовые вариации CH₄

Метан попадает в атмосферу в результате как природных, так и антропогенных процессов. Основным естественным источником выбросов метана в атмосферу выступают водно-болотные угодья. Кроме того, метан выделяется через трещины в земной коре на дне водоёмов, при добыче полезных ископаемых и при лесных пожарах. Антропогенными источниками метана в атмосфере становятся производство энергии из угля и природного газа, свалки, очистные сооружения, сельское хозяйство (переработка навоза), рисоводство и сжигание биомассы.

В зонах вечной мерзлоты в условиях аномального жаркого лета и лесных пожаров в Якутии слой вечной мерзлоты тает и не может эффективно удерживать метан под землёй. По результатам наземных измерений глубины протаивания (ГП) на тестовой площадке CALM (англ. Circumpolar Active Layer Monitoring) R42 вблизи Якутска (координаты 62,013306° с. ш., 129,656991° в. д.), значение ГП выросло на 4 см в 2019 г. (высокий уровень ЛПА) в сравнении с непирогенными 2015–2016 гг. (<https://www2.gwu.edu/~calm/data.north.html>). После выброса метан остаётся в атмосфере примерно 10 лет, после чего удаляется, в основном химическим окислением в тропосфере. По силе влияния на климат метан опаснее углекислого газа, поскольку более чем в 20 раз эффективнее удерживает тепло в атмосфере.

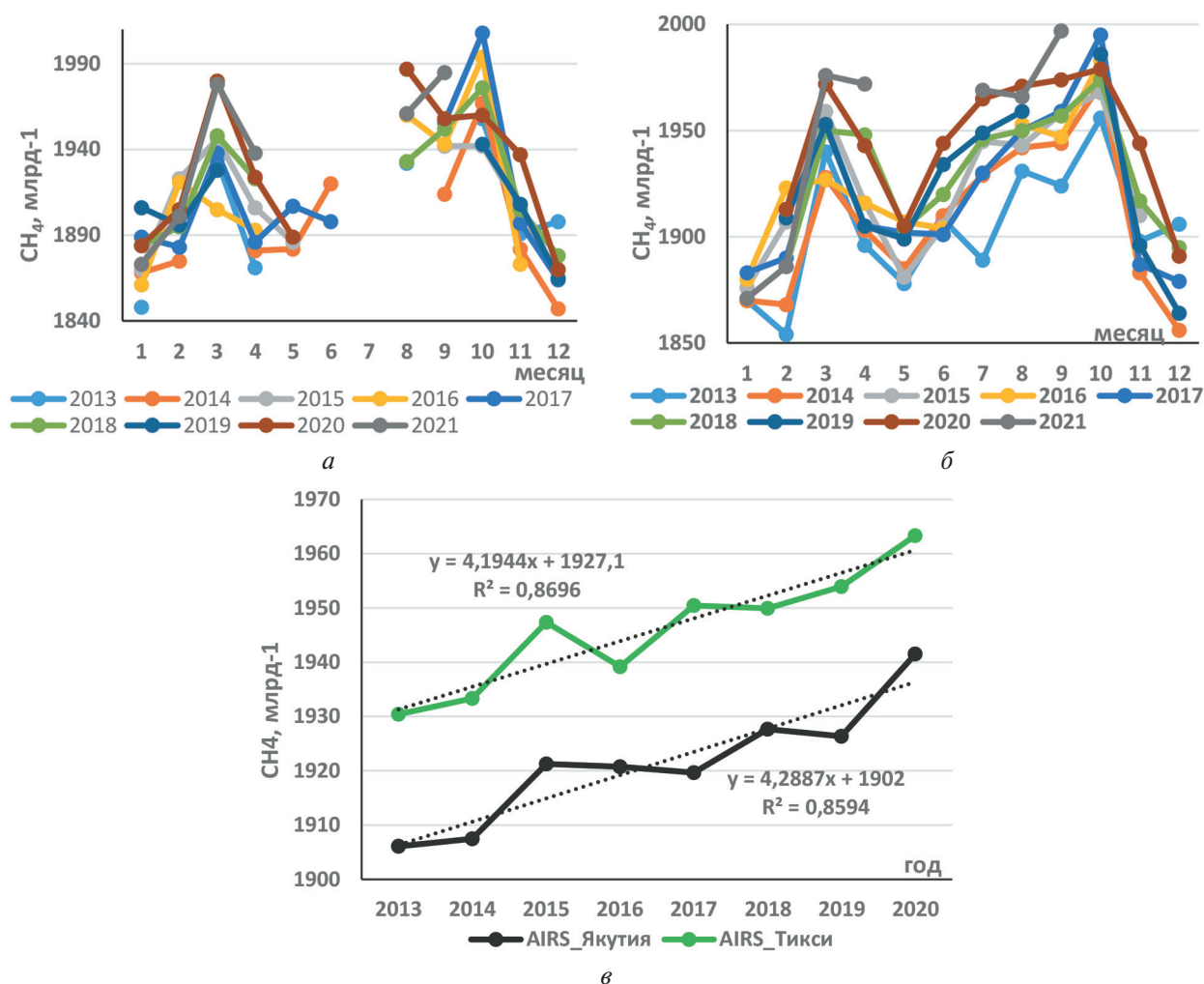


Рис. 8. Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана для Якутска (а) и Центральной Якутии (б, в) за 2013–2021 гг.

Для исследования вариаций содержания CH₄ в атмосфере использовались среднемесячные (дневные) данные AIRS/Aqua, усреднённые по площадке с центром 61° 39' 42" с. ш.,

129° 22' в.д. (Якутск) (пространственное разрешение $1 \times 1^\circ$, барический уровень 1000 гПа). Алгоритм восстановления концентрации метана с помощью инструмента AIRS дан в работе (Xiong et al., 2008). На *рис. 8а* (см. с. 239) показаны сезонные вариации концентрации метана (данные за июль отсутствуют) с минимальными значениями в зимние месяцы и двумя локальными максимумами в марте (наибольшее значение принадлежит 2021 г. и равно $1,98$ частиц·млн⁻¹) и октябре. Спад значений отмечен в апреле–мае (данные за летние месяцы редки). Средняя концентрация CH_4 в атмосфере составляет $1,86$ частиц·млн⁻¹ (Climate change..., 2022; Репина, 2015). Для Якутска лишь в зимние месяцы и весенние (апрель–май) концентрация метана в атмосфере находится на уровне средней, превышая его в остальные месяцы.

Следует отметить, что приборы AIRS, использующие уходящее излучение Земли в средней инфракрасной области около $7,8$ мкм, имеют пониженную чувствительность к нижней тропосфере. Основная причина снижения спутниковых значений концентрации метана в зимний сезон в том, что спутник не видит поверхность и значения концентрации метана определяет не у поверхности, а у более высоких слоёв (Юрганов и др., 2016).

Рассмотрим вариации концентрации метана на территории Центральной Якутии для сектора с координатами, приведёнными выше для угарного газа, что позволит выяснить характер изменения вариаций метана в летние месяцы. На *рис. 8б* представлен график значений концентрации метана для барической высоты 1000 гПа. В марте наблюдается первый максимум, далее — уменьшение значений с локальным минимумом в мае и последующий рост значений с максимумом в августе–октябре. Локальные максимумы концентрации метана в марте, июле и сентябре принадлежат 2021 г. График межгодовых вариаций (*рис. 8в*) приведён для 2013–2020 гг. Отмечаем положительный тренд межгодовых вариаций концентрации метана с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,86$. На этом же рисунке показан график межгодовой изменчивости фоновых значений концентрации метана по измерениям для Тикси. Положительный тренд изменений концентрации метана для обеих территорий с вечной мерзлотой практически одинаков.

Заключение

В работе представлены результаты исследований вариаций аэрозольной оптической толщи, чёрного углерода, концентрации угарного газа и метана в условиях лесных пожаров в районе Якутска в летний сезон 2013–2021 гг. Работа проведена на базе спутниковых наблюдений системы анализа и визуализации данных Giovanni. Аномальный по масштабам лесных пожаров в Якутии 2021 г. отразился как в сезонных, так и межгодовых вариациях аэрозольной оптической толщи, чёрного углерода, СО и метана. Сезонные вариации АОТ по данным MODIS-Terra за 2013–2021 гг. показали, что в июле 2021 г. значение АОТ — наибольшее за весь рассматриваемый период и равно $\sim 1,2$. В межгодовых вариациях превышение значений АОТ над фоновыми (средние значения за 2015–2016 гг.) составляет: для 2019 г. — 2 раза, для 2020 г. — 2,2 раза и 2021 г. — 2,9 раза. Сравнение измерений АОТ по данным инструмента OMI/AURA с наземными измерениями солнечным фотометром на станции глобальной сети AERONET в Якутске показало хорошую корреляцию между наземными и спутниковыми данными с коэффициентом корреляции Спирмена равным $\sim 0,94$ для 2021 г.

Для оценки концентрации ЧУ использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2. Для Якутска среднемесячное значение SMC ЧУ в июле 2021 г. превышало значение ЧУ для остальных лет и составляло $\sim 10,5 \cdot 10^{-3}$ мг/м³. Отмечен стабильный межгодовой рост концентрации ЧУ с 2013 г.

Оценка концентрации угарного газа и метана проведена по данным AIRS/Aqua. Для сезонного хода концентрации СО характерно снижение значений в летний период, в пределах которого есть локальные максимумы для годов с высокой пирогенной активностью, наибольший из максимумов принадлежит 2021 г. В межгодовых вариациях содержания СО наблюдается скачкообразный рост в содержании СО для пирогенных сезонов (2013, 2014, 2021). Межгодовой ход концентрации метана характерен стабильным ростом значений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН по теме № 0030-2019-0008 «Космос».

Литература

1. *Виноградова А. А., Копейкин В. М., Смирнов Н. С.* Мониторинг концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе Печоро-Ильчского биосферного заповедника // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 11. С. 64–69.
2. *Дерюгина А. Б.* Анализ локальных измерений концентрации СО в г. Петергоф: выпускная квалификац. работа. СПб., 2017. 52 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_8cfe04d7c0304f5587627e49f20d451a.PDF.
3. *Репина И. А.* Дистанционные исследования концентраций и потоков метана в атмосфере: лекция // 6-я международ. Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли». ИКИ РАН, Гаруса, 2–6 марта 2015. 49 с. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2015/07.pdf.
4. *Сакерин С. М., Горбаренко Е. В., Кабанов Д. М.* Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы и оценки влияния различных факторов // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 7. С. 625–631.
5. *Смирнов Н. С., Коротков В. Н., Романовская А. А.* Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 7. С. 5–17.
6. *Томишин О. А., Соловьев В. С.* Особенности лесопожарной активности в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 261–271. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-261-271.
7. *Юрганов Л. Н., Лейфер А., Лунд Майр К.* Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119.
8. *Bryson R. A., Goodman B. M.* Volcanic activity and climatic changes // *Science*. 1980. V. 207. P. 1041–1044.
9. *Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I.* Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2012. V. 5. P. 557–568.
10. *Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: IPCC Sixth Assessment Report*. 2022. 3675 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
11. *Report to Congress on Black Carbon*. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies. Appropriations Act, 2010. EPA-450/R-12-001. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2012. 338 p. URL: <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>.
12. *Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M.* Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113.

Variations of aerosol optical depth, black carbon, carbon monoxide and methane from satellite observations of the atmosphere during the forest fire season in the Yakutsk Region in 2013–2021

N. V. Rodionova

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow region, Russia
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

The paper presents the results of a study of variations in aerosol optical depth (AOD), black carbon (BC), carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) concentrations in the atmosphere during forest fires in the Yakutsk Region (central part of Yakutia) in 2013–2021 summer seasons. The work was based

on satellite observations of the Giovanni data analysis and visualization system. AOD measurements based on OMI/AURA instrument data were compared with ground measurements by a solar photometer at the AERONET global network station in Yakutsk. The correlation between ground and satellite data was determined. Seasonal and interannual variations of AOD for Yakutsk in 2013–2021 show an increase in AOD values since 2019. To estimate BC concentration, monthly mean MERRA-2 re-analysis data were used. Seasonal and interannual variations of BC for Yakutsk with a stable increase in BC concentration since 2013 were determined. CO and CH₄ concentrations were estimated using AIRS/Aqua data. The seasonal course of CO concentration is distinguished by a decrease in values in the summer period, within which there are local highs for years with high pyrogenic activity. The interannual course of CO concentration shows increases in pyrogenic years. The interannual course of CH₄ concentration is characterized by a stable increase in values.

Keywords: forest fires, remote sensing, aerosol optical depth, black carbon, carbon monoxide, methane

Accepted: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242

References

1. Vinogradova A. A., Kopeikin V. M., Smirnov N. S., Monitoring of the concentration of black carbon in the surface air in the area of the Pechora-Ilych Biosphere Reserve, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, No. 11, pp. 64–69 (in Russian).
2. Deryugina A. B., *Analiz lokal'nykh izmerenii kontsentratsii SO v g. Peterhof* (Analysis of local measurements of CO concentration in Peterhof), Saint Petersburg, 2017, 52 p. (in Russian), available at: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_8cfe04d7c0304f5587627e49f20d451a.PDF.
3. Repina I. A., Remote studies of methane concentrations and fluxes in the atmosphere, *6-ya mezhdunarodnaya Shkola-seminar "Sputnikovye metody i sistemy issledovaniya Zemli"* ("Satellite methods and systems of Earth exploration"), 2015, 49 p. (in Russian), available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/taru-sa2015/07.pdf.
4. Sakerin S. M., Gorbarenko E. V., Kabanov D. M., Peculiarities of many-year variations of atmospheric aerosol optical depth and estimates of influence of different factors, *Optika atmosfery i okeana*, 2008, Vol. 21, No. 7, pp. 625–631 (in Russian).
5. Smirnov N. S., Korotkov V. N., Romanovskaya A. A., Black carbon emissions from wildfires forest lands of the Russian Federation in 2007–2012, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, Vol. 40, No. 7, pp. 435–442.
6. Tomshin O. A., Solovyev V. S., Features of forest fire activity in the boreal forests of the permafrost region of Eastern Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 261–271 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-261-271.
7. Yurganov L. N., Leifer A., Lund Mair K., Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over the seas of the Arctic Ocean according to satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 107–119 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119.
8. Bryson R. A., Goodman B. M., Volcanic activity and climatic changes, *Science*, 1980, Vol. 207, pp. 1041–1044.
9. Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I., Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, Vol. 5, pp. 557–568.
10. *Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: IPCC Sixth Assessment Report*, 2022, 3675 p., available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
11. *Report to Congress on Black Carbon, Department of the Interior, Environment, and Related Agencies, Appropriations Act, 2010, EPA-450/R-12-001*, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2012, 338 p., available at: <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>.
12. Xiong X., Barnett C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M., Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113.