

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ И СОДЕРЖАНИЕ УГАРНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ НАД РАЙОНАМИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И БУРЯТИИ В 2010–2021 гг.

© 2023 г. Н. В. Родионова*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Московская обл., Фрязино, Россия*

**E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.08.2022 г.

В работе определены сезонные и межгодовые вариации аэрозольной оптической толщины (АОТ) и общего содержания угарного газа в столбе атмосферы за период 2010–2021 гг. по измерениям приборов MODIS и MOPITT спутника Тетра для нескольких городов Иркутской области (Иркутск, Зима, Вихоревка, Железнодорожск-Илимский, Усть-Кут) и Бурятии (Селенгинск и Улан-Удэ), входящих в категорию городов с высоким уровнем загрязнением атмосферы (ЗА). Для Иркутска показано уменьшение межгодового значения АОТ с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. с общим отрицательным трендом. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22. Для Иркутска показан отрицательный тренд для межгодовых вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы. При сравнении многолетних сезонных вариаций АОТ по наземным измерениям фотометром CIMEL в п. Торы (Бурятия), входящем с систему сети AERONET, и спутниковыми OMI/Aura данными отмечена близость значений АОТ для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение АОТ по спутниковым данным над наземными измерениями для весенних месяцев. Наибольший коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми измерениями АОТ принадлежит 2021 г. и равен $\rho_s = 0.64$.

Ключевые слова: наземные и спутниковые измерения, аэрозольные оптические характеристики атмосферы, общее содержание угарного газа в столбе атмосферы, загрязнение атмосферы, коэффициент корреляции Спирмена

DOI: 10.31857/S0205961423020033, **EDN:** TCXJCB

ВВЕДЕНИЕ

По итогам экологического состояния атмосферы в 2021 г. (<https://rtneo-irk.ru/news/irkutskaya-oblast-voshla-v-top-5-regionov-po-kolichestvu-zagryazneniy-vozdukha-v-2021-godu/>) Иркутская область (города Братск, Байкальск, Свирск, Шелехов, Вихоревка) вошла в пятерку лидеров среди регионов РФ по количеству загрязнений воздуха в 2021 г. За Иркутской областью следует Бурятия (города Селенгинск, Улан-Удэ). “В отслеженных случаях основными загрязняющими веществами выступали сероводород, бензпирен, а также диоксид серы. Также отмечались загрязнения взвешенными веществами, которые образуются в результате сгорания всех видов топлива и при производственных процессах, но могут иметь и естественное происхождение, например, выделяться в результате эрозии почв”. В докладе Министерства природных ресурсов и экологии РФ “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации”, посвященный экологической ситуации в 2020 году ([https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-](https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu)

[prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu](https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu)) отмечалась положительная динамика в сравнении с 2019 годом по некоторым показателям для Иркутской области. Так, Иркутск был переведен из списка городов с очень высоким уровнем загрязняющих веществ (ЗВ) в список городов с высоким уровнем ЗВ. Снизились средние за год концентрации взвешенных веществ (ВВ) на 20–30% благодаря теплой зиме и большому количеству осадков. В табл. 1 приведен список некоторых городов в Иркутской области и Бурятии с высоким уровнем загрязнения атмосферы (ЗА) в 2020 г. и указаны вещества, определяющие эти загрязнения (<https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2021/12/13/900429-min-prirodi-opublikovalo-doklad-o-sostoyanii-okruzhayuschei-sredi-v-rossii-v-2020-godu>), где БП – бенз(а)пирен, ВВ – взвешенные вещества, NO₂ – диоксид азота, СО – оксид углерода, SO₂ – диоксид серы, Ф – формальдегид, РМ – взвешенные частицы фракций РМ10 и РМ2.5, О₃ – приземный озон, ВС – черный углерод, HCl – хлорид водорода.

Таблица 1. Города с наибольшим уровнем ЗА в 2020 г. и вещества, его определяющие

Города	Вещества ЗА	Города	Вещества ЗА
Вихоревка	БП, ВВ, NO ₂ , CO, SO ₂	Селенгинск	БП, ВВ, PM _{2.5} , PM ₁₀ , O ₃
Зима	БП, NO ₂ , CO, Ф, HCl	Улан-Удэ	БП, ВВ, NO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀
Иркутск	БП, ВВ, NO ₂ , CO, Ф, BC	Чита	БП, ВВ, NO ₂ , O ₃ , фенол

Целью данной работы является определение вариаций и возможных трендов содержания ВВ и СО в атмосфере некоторых городов Иркутской области и Бурятии, находящихся в списке городов с высоким уровнем ЗА и сравнение наземных измерений АОТ с помощью прибора Cimel (www.cimel.fr) на станции AERONET в поселке Торы недалеко от Иркутска (103 км по прямой) (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) со спутниковыми измерениями OMI/Aura, находящимися в свободном доступе в системе анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov>) за период 2010–2021 гг.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В район исследования входят несколько городов Иркутской области: Иркутск (52°17'52" с.ш., 104°17'47" в.д.), Зима (53°55' с.ш., 102°03' в.д.), Вихоревка (56.1207° с.ш., 101.1704° в.д.), Железногорск-Илимский (56°34'36" с.ш., 104°07'18" в.д.), Усть-Кут (56°48' с.ш., 105°50' в.д.) и три пункта Бурятии: п. Торы (51.8° с.ш., 103.087° в.д.), Селенгинск (52°00'23" с.ш., 106°51'52" в.д.), Улан-Удэ (51°49'26" с.ш., 107°36'27" в.д.) (рис. 1).

Включение в район исследования Железногорска-Илимского и Усть-Кута, расположенных к востоку от Братска (города не входят в категорию городов с высоким уровнем ЗА), связано с повышением значениями индекса качества воздуха (ИКВ) (AQI – Air Quality Index) для этих территорий на карте ИКВ (<https://air.plumelabs.com/air-quality-map>) для отдельных дат 2022 г., что вызвало интерес к этому району. Так, на рис. 2 показаны два фрагмента карты ИКВ для исследуемой территории для 16 июня и 27 июля 2022 г. (расшифровку цветовой легенды можно найти, к примеру, на сайте <https://aqicn.org/scale/ru>). ИКВ включает в себя суммарную оценку содержания в воздухе двуокиси азота, озона и взвешенных веществ PM_{2.5} и PM₁₀.

НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА СТАНЦИИ СЕТИ AERONET В П. ТОРЫ

Данные об оптических свойствах аэрозолей ученые, в основном, получают по спутниковым наблюдениям. Но наиболее точную информацию дают наземные системы. Так, аэрозольная роботизированная сеть AERONET, распространенная

по всему миру и оснащенная солнечными и небесными фотометрами, обеспечивает непрерывные точные измерения ряда аэрозольных параметров.

Одна из нескольких станций сети AERONET в России расположена в 150 км на юго-запад от Иркутска (рис. 1) вблизи п. Торы (Бурятия), станция под названием “Иркутск” (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН).

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в районе п. Торы

Аэрозоли (от греч. — воздух; нем. — коллоидный раствор) — твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в газообразной среде. Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) вычисляется как логарифм пропускания столба атмосферы за вычетом рэлеевского рассеяния воздуха и вкладов от ослабления света парниковыми газами. Эта величина характеризует уменьшение прозрачности атмосферы за счет рассеяния и поглощения света на частицах аэрозоля. Чем выше концентрация частиц в воздухе, тем выше АОТ. АОТ на длине волны 500 нм позволяет оценить вклад аэрозольной составляющей в радиационный баланс атмосферы. К сожалению, использование солнечного фотометра не позволяет его применять ночью, а также в дождливую и пасмурную погоду.

Данные AERONET находятся в свободном доступе на сайте (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). В работе использовались данные АОТ AERONET уровня 1.5 версии 3.0 на длине волны 500 нм. На рис. 3 показан график вариаций АОТ (рис. 3, а), гистограмма единичных измерений N фотометра по месяцам за 2010–2021 гг. (рис. 3, б), график многолетних среднемесячных значений АОТ с отклонениями от средних значений (рис. 3, в) по наземным измерениям фотометра на станции сети AERONET “Иркутск” в п. Торы. Наибольшие вариации значений АОТ в пределах года отмечены для 2021, 2017, 2016, 2014 и 2012 гг. Для сезонных вариаций локальные максимумы принадлежат августу 2021 г. и июлю 2016 г. Многолетние сезонные вариации значений АОТ (рис. 3, в) характеризуются ростом значений в летние месяцы с максимумом в августе, уменьшением значений АОТ осенью и весной. Для весны есть локальный минимум в мае и локальный максимум в апреле.

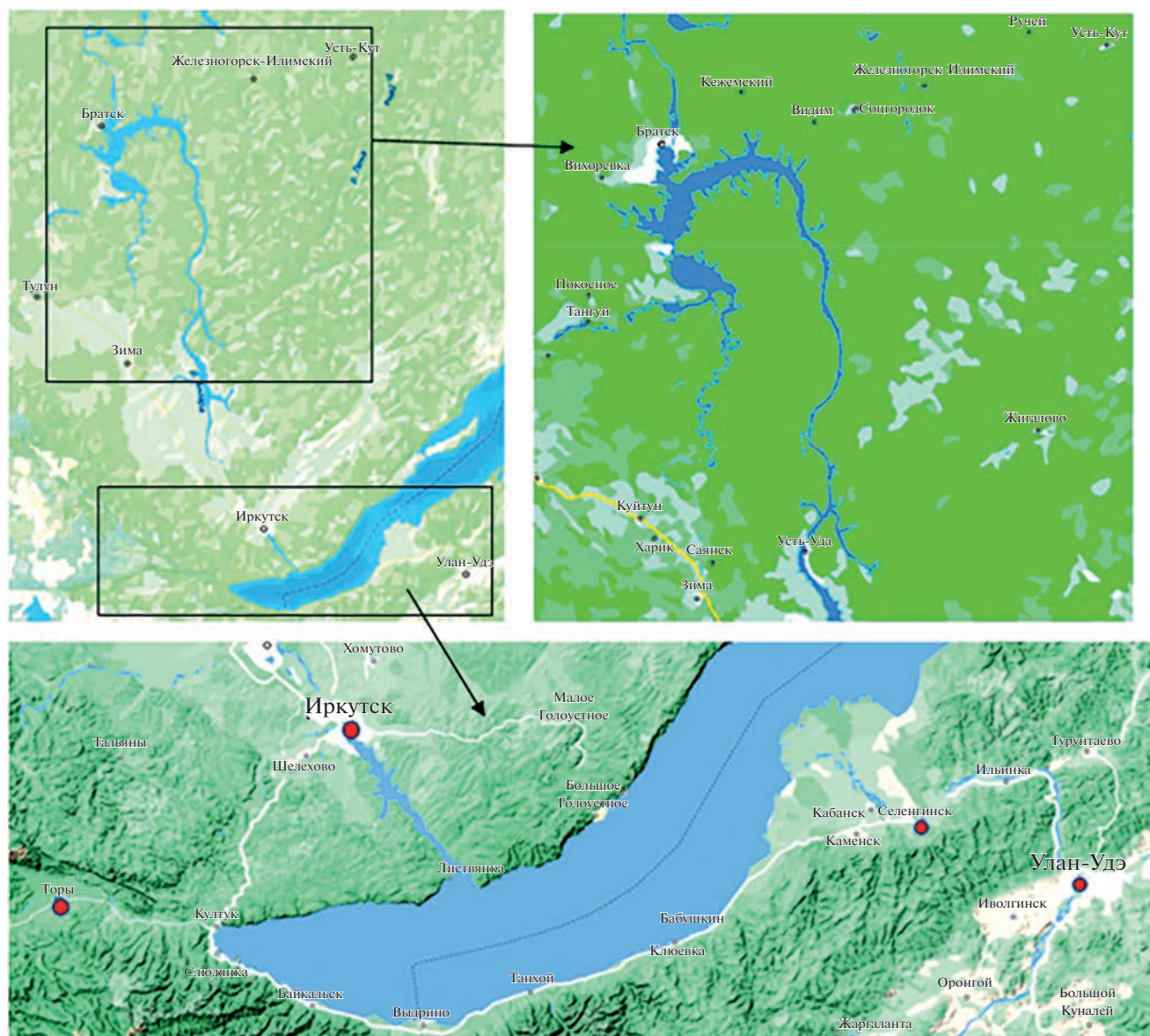


Рис. 1. Район исследования в Иркутской области и Бурятии.

Идентификация некоторых параметров аэрозоля по данным AERONET в районе п. Торы

Параметр Ангстрема. Определение типа аэрозоля в атмосфере важно для получения информации о качестве воздуха, источниках загрязнения. В стандартную интерпретацию данных AERONET, помимо AOT, входят следующие два параметра: спектральная зависимость AOT от длины волны $\alpha = -\lg(AOT_\lambda/AOT_{\lambda_0})/\lg(\lambda/\lambda_0)$ – параметр Ангстрема, и альbedo однократного рассеяния (AOP, SSA- single scattering albedo) (Eck et al., 1999). По наземным измерениям солнечными фотометрами сети станций AERONET можно выделить основные типы аэрозоля по спектральной

зависимости AOT от длины волны в интервале длин волн 440–870 нм (Giles et al., 2012).

Параметр Ангстрема α характеризует степень дисперсности частиц в атмосфере. Чем меньше параметр Ангстрема, тем больше размер частиц. Так, значения α меньше 1.0 указывает на преобладание крупных по размеру частиц с радиусом от 0.5 мкм. При значениях α выше 2.0 аэрозоль мелкодисперсный (Schuster et al., 2006).

По значениям AOP определяют поглощающие свойства аэрозоля. Чем ближе значение AOP к 1, тем преобладают рассеивающие частицы в аэрозолях. При значениях AOP вблизи 0 указывает на преобладание поглощающих частиц. Примером работы, где рассматривались аэрозольные опти-

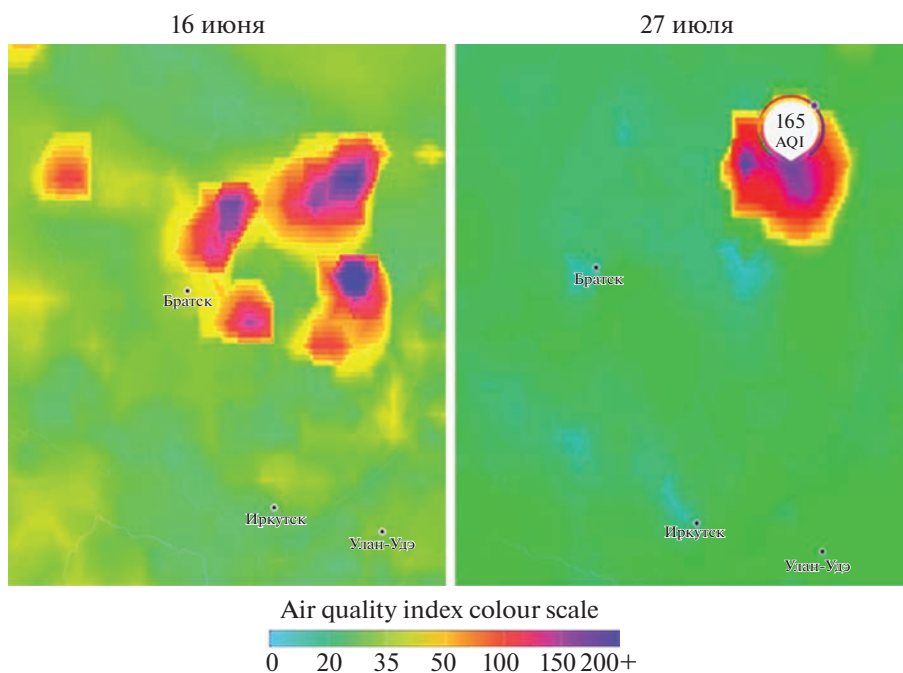


Рис. 2. Карты ИКВ для рассматриваемой территории для июня и июля 2022 г.

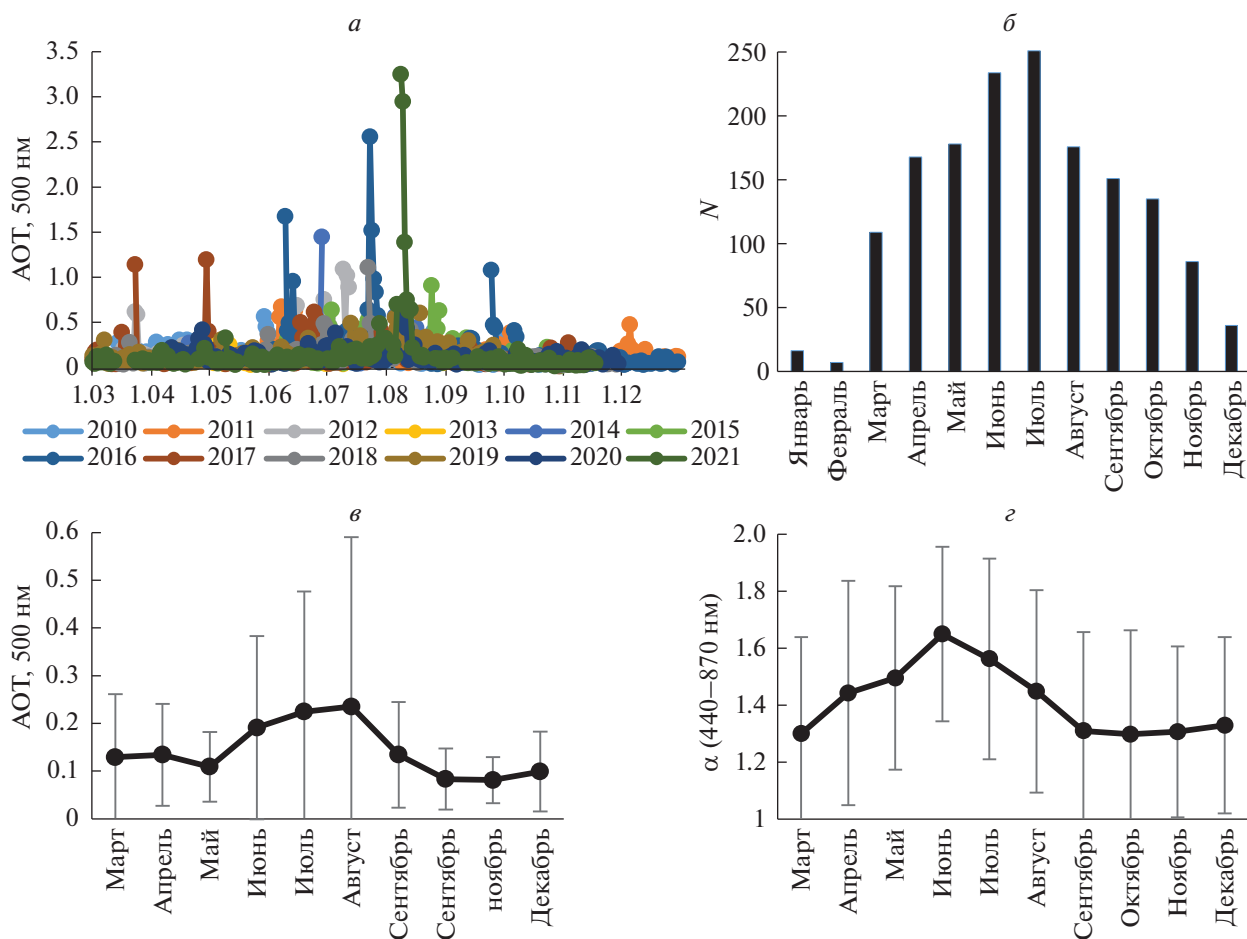


Рис. 3. *а* – Вариации значений АОТ (500 нм), *б* – количество многолетних измерений фотометра по месяцам, *в* – многолетние среднemesячные значения АОТ и многолетние среднemesячные значения α (*г*) по наземным измерениям в п. Торы в 2010–2021 гг.

Таблица 2. Аэрозольные оптические характеристики по наземным данным в п. Торы

Дата	AOT ₅₀₀	$\alpha_{440-870}$	AOR	n	k
09.06.2016	1.674	0.326	0.942–0.955	1.600	0.00230–0.00290
23.07.2016	2.558	1.350	0.960–0.950	1.513–1.512	0.00680–0.00730
08.08.2021	3.250	1.450	0.965–0.952	1.520–1.510	0.00616–0.00647

ческие характеристики по данным измерений солнечным фотометром CIMEL, является работа авторов (Волкова и др., 2018) для района вблизи Санкт-Петербурга.

На рис. 3, *з* приведен график многолетних среднемесячных значений параметра Ангстрема α по измерениям фотометра на станции сети AERONET “Иркутск” в п. Торы за 2010–2021 гг. Значения α больше 1, т.е. в атмосфере преобладают мелкодисперсные частицы. Максимальное многолетнее среднемесячное значение α отмечено в июне $\alpha = 1.65 \pm 0.3$ со снижением значений α весной и осенью.

Функция распределения частиц аэрозоля по размеру. Свойства аэрозоля восстанавливаются с помощью алгоритма инверсии, разработанного Dubovic and King (2000). Дальнейшие алгоритмы Dubovic et al. (2006) были разработаны для учета несферической формы аэрозольных частиц, таких как минеральная пыль.

Функция распределения частиц аэрозоля по размеру $dV(r)/d\ln(r)$ (мкм или мкм³/мкм²), восстановленная по инверсии из данных AERONET, имеет бимодальный характер с первым максимумом при значениях r от 0.05 до 0.5 мкм и вторым максимумом при значениях r от 0.5 до 10 мкм. Профили функции сильно различаются для ясных дней и дней с загрязненной атмосферой. Во втором случае растет AOT, уменьшается α , что свидетельствует о наличии крупнодисперсных частиц.

На рис. 4, *а*, *б*, *в* приведены графики объемного распределения частиц аэрозоля по размеру для трех дат, которые выбирались по максимальным значениям AOT для 2010–2021 гг. (см. рис. 3, *а*). Графики даны для 9 июня 2016 г. (рис. 4, *а*) со значением AOT = 1.674 и значением $\alpha = 0.326$, и для 23 июля 2016 г. (рис. 4, *б*) со значением AOT = 2.558 и $\alpha = 1.35$. Для 9 июня субмикронная фракция аэрозоля практически исчезла и доминирует крупнодисперсная фракция аэрозоля, что согласуется с малым значением показателя Ангстрема. На рис. 4, *в* приведен график функции распределения частиц аэрозоля по размеру для 8 августа 2021 г., для которого есть абсолютный максимум значений AOT = 3.25 за период 2010–2021 гг. (рис. 3, *а*). Здесь при очень сильном за-

грязнении атмосферы доминируют мелкодисперсные частицы, судя по значению параметра Ангстрема $\alpha = 1.45$. Для всех трех дат AOR близко к 1, т.е. преобладает рассеяние.

Однако, как отмечено в работе (Абдуллаев и др., https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf), не следует строго связывать уровень запыленности с формой спектра размеров частиц, поскольку необходимо учитывать влияние влажности и других параметров.

Еще одним свойством аэрозоля, восстанавливаемым с помощью алгоритма инверсии, является комплексный показатель преломления частиц $m = n - ik$, который определяет соотношение между поглощаемой и рассеиваемой частицами радиацией, где n — показатель преломления и k — показатель поглощения. Оба параметра зависят от химического состава аэрозолей. На рис. 4, *з* показана зависимость данных параметров от длины волны (от 440 до 1020 нм) для трех дат 9 июня, 23 июля 2016 г. и 8 августа 2021 г. для времени суток 9:49:20, 9:42:18, 9:23:40, соответственно. Действительная часть представлена сплошными линиями, мнимая часть k — пунктирными. Для рассматриваемых дат n убывает с ростом λ , а k растет.

В табл. 2 приведены аэрозольные оптические характеристики атмосферы для трех дат по наземным измерениям на станции сети AERONET в п. Торы.

Для рассматриваемых дат параметры аэрозолей можно разделить на две группы: 1 группа — для 9.6.16 и 2 группа — для 23.7.16 и 8.8.21. Для 9 июня субмикронная фракция аэрозоля практически исчезла (рис. 4, *а*) и доминирует крупнодисперсная фракция аэрозоля, что согласуется с малым значением показателя Ангстрема α . Для второй группы характерно высокое значение параметра Ангстрема, т.е. преобладание мелкодисперсного аэрозоля рассеивающего типа.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АОТ В РАЙОНЕ П. ТОРЫ И СРАВНЕНИЕ С НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Для сравнения спутниковых измерений с наземными данными сезонного хода значений АОТ в районе п. Торы использовались измерения при-

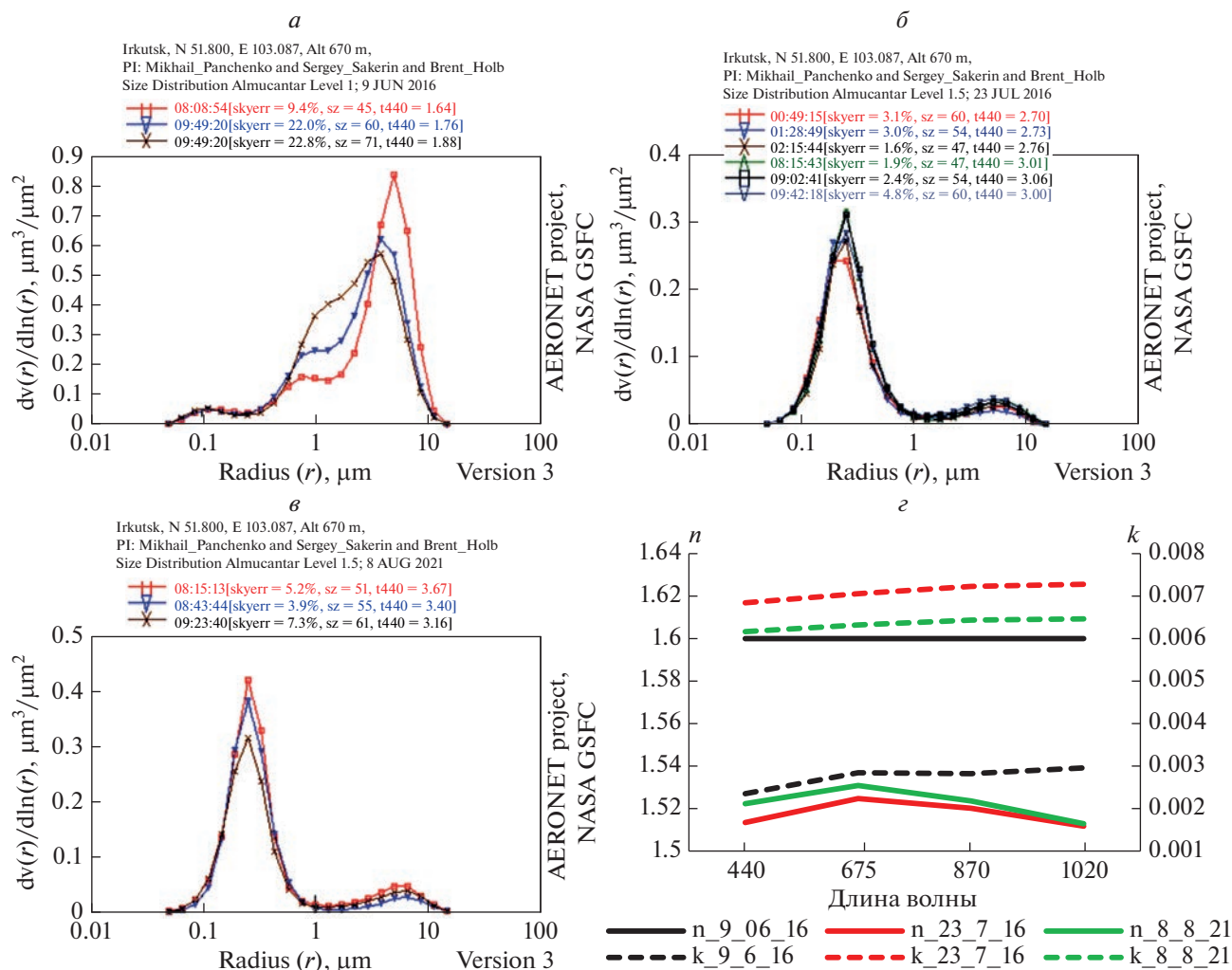


Рис. 4. Графики функции распределения частиц аэрозоля по размеру и значений n и k для 9/06/16, 23/07/16 и 08/08/21 по наземным измерениям в п. Торы.

бора OMI спутника Aura на основе системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). На рис. 5, а приведены графики значений AOT продукта OMI OMAERU-Vd, длина волны 500 нм, пространственное разрешение (ПР) $1^\circ \times 1^\circ$, усредненные по площадке с центром в п. Торы. Для сезонных вариаций AOT, как и для наземных измерений, характерным является локальный максимум значений AOT для августа 2021 г. При сравнении многолетних сезонных вариаций AOT по наземным и спутниковым данным (рис. 5, в) отмечаем близость значений AOT для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение AOT по спутниковым данным над наземными данными для весенних месяцев. Нанесенные на графики значения СКО AOT свидетельствуют о наибольшей вариации значений в летние месяцы, особенно в августе. Количество спутниковых измерений AOT по ме-

сяцам за 2010–2021 гг. приведено на гистограмме рис. 5, б. Сравнение ежедневных (совпадающие даты) значений AOT по наземным (AERONET CIMEL-318) и спутниковым OMI/AURA измерениям в п. Торы за 2010–2021 гг. показано на рис. 5, г.

В табл. 3 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена ρ_s между наземными (AERONET) и спутниковыми (OMI/Aura) измерениями AOT в районе п. Торы. Коэффициенты корреляции Спирмена определялись на основе программы Attestat, находящейся в свободном доступе. Наибольший коэффициент корреляции принадлежит 2021 году и равен $\rho_s = 0.64$. Для 2012 г. число измерений для совпадающих дат равно 5, что недостаточно для определения корреляции данных, вследствие чего данные для 2012 г. не вошли в табл. 3.

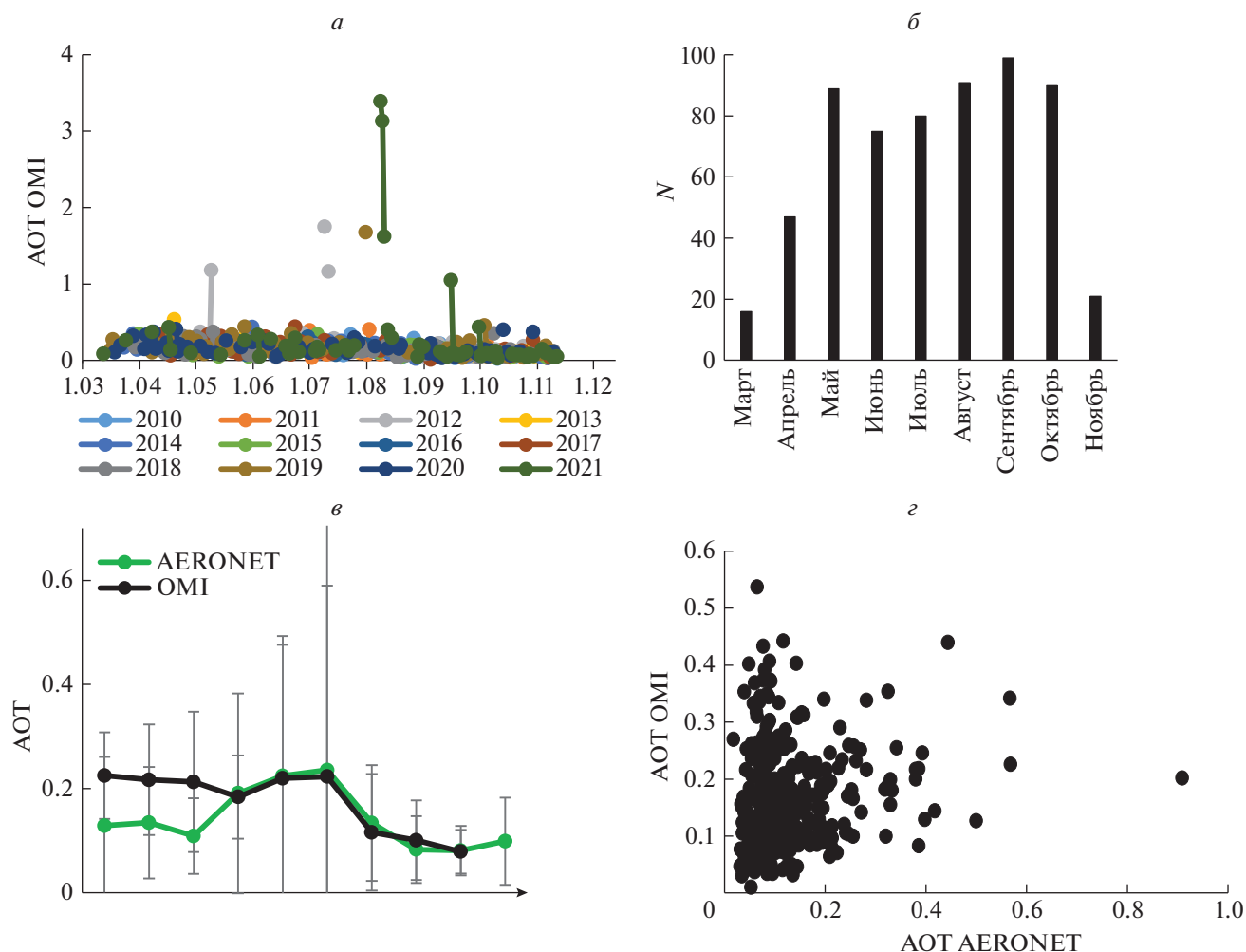


Рис. 5. Вариации АОТ по данным прибора OMI/Aura в 2010–2021 гг. (а), количество измерений N по месяцам (б), многолетние сезонные вариации АОТ с линиями СКО по наземным данным сети AERONET и спутниковым измерениям OMI в районе п. Торы (в), сравнение ежедневных (совпадающие даты) значений АОТ по наземным и спутниковым измерениям (г).

СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ АОТ И СО В АТМОСФЕРЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И БУРЯТИИ

Спутниковая оценка значений АОТ

Как отмечено во введении, Иркутская область и Бурятия принадлежат к территориям с высоким уровнем ЗА, и за последние годы по этому показателю находятся в России на 5 и 6 месте, соответ-

ственно. Рассмотрим изменение значений АОТ и СО за период 2010–2021 гг. для нескольких городов, входящих в список городов с высоким уровнем ЗА — это Иркутск, Зима, Вихоревка, Селенгинск, Улан-Удэ. Кроме этих городов, включим в исследование два города, находящихся в направлении на северо-восток от Братска, а именно, Железногорск-Илимский и Усть-Кут, отсутствующих в указанном списке. Вариации АОТ и СО

Таблица 3. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между наземными и спутниковыми измерениями АОТ в районе п. Торы (Бурятия)

Год	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ρ_s	0.45	0.24	−0.05	0.36	0.35	0.43	0.25	0.19	−0.12	0.06	0.64
р-знач	0.01	0.11	0.42	0.08	0.01	0.02	0.03	0.08	0.25	0.35	0
N	29	28	19	16	44	25	60	55	36	46	53

Таблица 4. Сезонные максимумы значений АОТ

Город	Иркутск	Зима	Селенгинск	Улан-Удэ	Вихоревка	Железногорск-Илимский	Усть-Кут
АОТ	0.95	0.76	0.58	0.88	1.33	1.24	1.2
год/месяц	2012/7	2013/7	2016/7	2015/8	2016/7	2019/7	2019/7
АОТ	0.8	0.84	0.92	0.57	1.13	1.35	1.24
год/месяц	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8	2021/8

для данных территорий определялись на основе системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). На рис. 6 показаны сезонные (рис. 6, а) и многолетние среднемесячные (рис. 6, б) значения АОТ за период 2010–2021 гг. для Иркутска, Селенгинска, Вихоревки и Железногорска-Илимского по данным прибора MODIS спутника Terra. Использовался продукт MOD08_M3 v6.1, ПР $1^\circ \times 1^\circ$, длина волны 550 нм. Для Зимы графики значений АОТ схожи с соответствующими графиками для Иркутска, графики АОТ для Улан-Удэ схожи с графиками для Селенгинска, графики для Усть-Куты схожи с графиками для Железногорска-Илимского.

Рассматриваемые территории по вариациям значений АОТ можно разделить на две группы: 1 – Иркутск, Зима, Селенгинск, Улан-Удэ, 2 – Вихоревка, Железногорск-Илимский, Усть-Кут. Общим для этих двух групп является типичное сезонное поведение АОТ, а именно, рост значений для летнего сезона и достижение максимальных значений АОТ в июле–августе (Тащилин и др., 2021). В табл. 4 приведены для каждого пункта два наибольших среднемесячных значений АОТ за период 2010–2021 гг. Отличие состоит в максимальных сезонных значениях АОТ, которые для первой группы не превышают 1, для второй группы больше 1. Отметим, что для Якутска в период лесных пожаров 2021 г., максимальное среднемесячное значение АОТ было порядка 1.2 в июле и порядка 1 в августе (Родионова, 2022).

Многолетние среднемесячные значения АОТ для этих групп также различаются (рис. 7, а), а именно, для первой группы (сплошные линии) максимальные значения не превышают 0.3, для второй группы (пунктирные линии) достигают 0.5.

Для межгодовых вариаций АОТ (среднее с мая по октябрь) (рис. 7, б) характерно зигзагообразное поведение с локальными максимумами АОТ для всех рассматриваемых пунктов в 2016, 2019 и 2021 гг. и локальными минимумами в 2010, 2017 и 2020 гг. Отметим уменьшение межгодового значения АОТ для Иркутска с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. (почти в 2 раза), что среди прочего могло послужить основанием перевода Иркутска из категории городов с очень высоким уровнем ЗА в категорию городов с высоким уровнем загрязнения. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22.

Спутниковая оценка значений содержания в атмосфере угарного газа

В табл. 1 для городов с высоким уровнем ЗА (Иркутск, Зима, Вихоревка) среди веществ, определяющих это загрязнение, присутствует угарный газ, поступающий в атмосферу в результате процессов горения. В данной работе приведены вариации общего содержания СО в атмосфере за 2010–2020 гг. для этих пунктов и некоторых других, рассмотренных выше. Значения общего содержания СО в атмосфере получены по измерениям прибора MOPITT спутника Terra (NASA/LARC/SD/ASDC, 2000). Прибор MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) осуществляет надирные измерения в ИК диапазоне 4.7 и 2.2–2.4 мкм с ПР в горизонтальной плоскости 22 км. Измерения MOPITT представлены на сайте системы анализа и визуализации данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), где эти данные приведены по март 2021 года. Использовался объединенный продукт MOPITT TIR+NIR (тепловой и ближний ИК) Multispectral CO Total Column MOP03JM v008 со среднемесячными данными, осредненными по площадке с исследуемым пунктом в центре. Выбор объединенного продукта связан с тем, что на основе результатов работы (Трифопова-Яковлева и др., 2021) мультиспектральный продукт дает лучшее согласие с наземными измерениями.

На рис. 8, а приведены графики сезонных вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы (ОССОСА) для Иркутска, Вихоревки и Селенгинска за период 2010–2021 гг. и на рис. 8, б – графики многолетних среднемесячных значений с отклонением от среднего значения. Сезонный ход по многолетним среднемесячным значениям ОССОСА имеет максимум весной: в апреле для Иркутска и Вихоревки и в мае для Селенгинска. Далее происходит уменьшение значений с локальным минимумом в июне, июле и локальным максимумом в августе для городов вблизи Байкала. Осенью происходит уменьшение значений с минимумом в октябре и последующим ростом значений для зимы. Данный сезонный ход имеет отдельные сходства с приведенным графиком (для месяцев с марта по сентябрь) в работе (Трифопова-Яковлева и др., 2021) для района Екатеринбурга с максимумом весной (апрель) и минимумом в июне. Отличием является рост значений

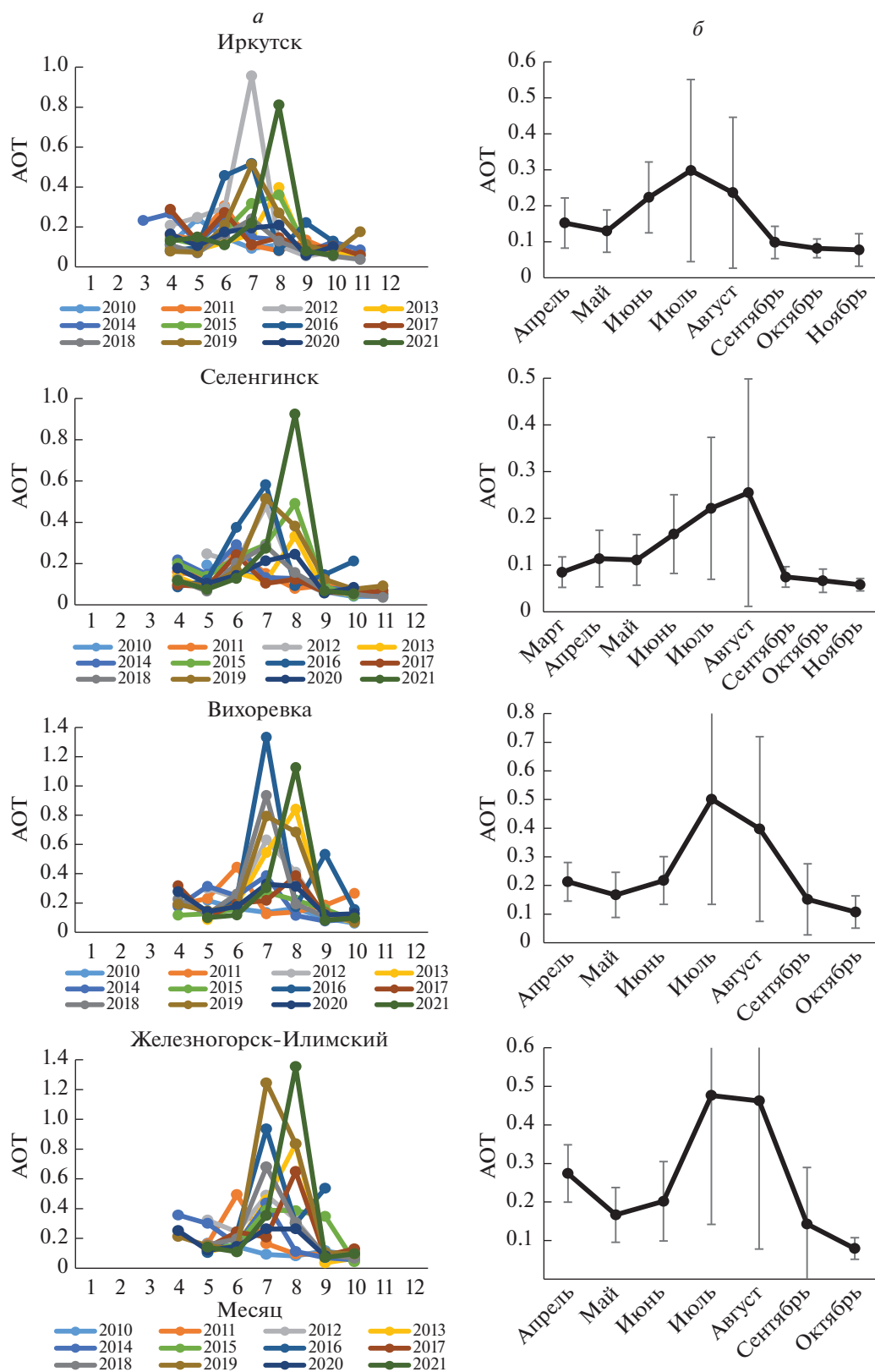


Рис. 6. Сезонные и многолетние среднеемесячные значения АОТ.

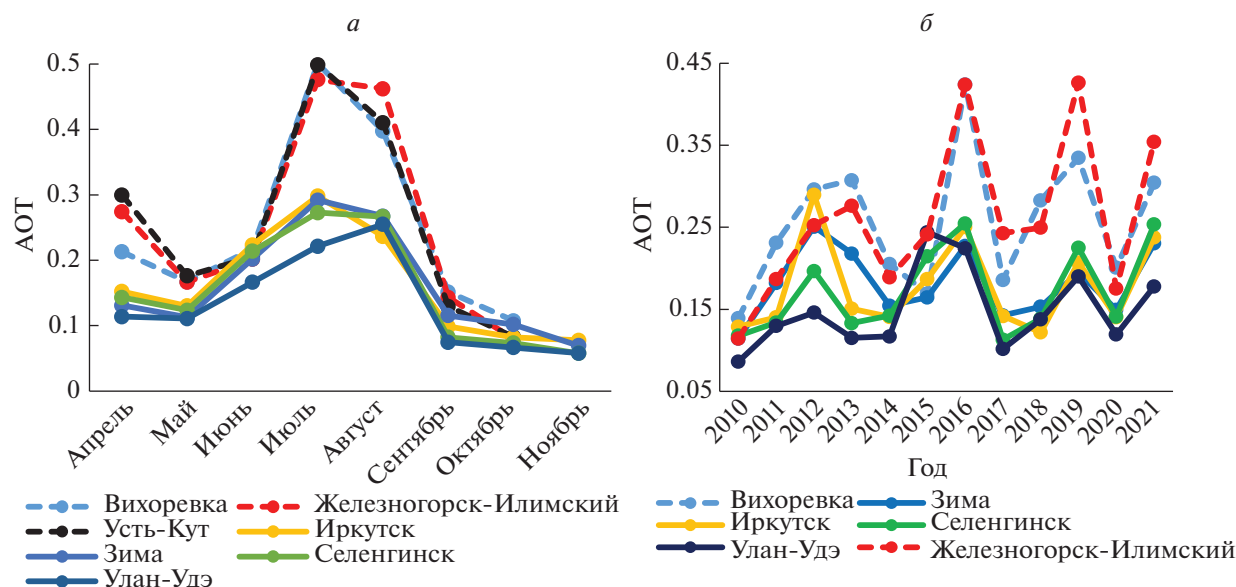


Рис. 7. Многолетние среднемесячные значения и межгодовые вариации АОТ для нескольких городов Иркутской области и Бурятии.

общего содержания СО в столбе атмосферы в сентябре (Екатеринбург), тогда как для Иркутской области происходит уменьшение значений. Следует отметить абсолютный максимум сезонных значений ОССОСА для Селенгинска, равный 3.75×10^{18} мол/см² для августа 2015 г. и многолетний сезонный максимум ОССОСА для мая $(2.57 \pm 0.37) \times 10^{18}$ мол/см². В первом случае максимум связан с аномальными лесными пожарами весной—летом 2015 г. в Байкальском регионе (Родионова, 2016). По многолетним сезонным значениям ОССОСА вторым по максимуму является Иркутск со значением в апреле $(2.36 \pm 0.24) \times 10^{18}$ мол/см². Для Вихоревки соответствующее значение ОССОСА составляет $(2.27 \pm 0.07) \times 10^{18}$ мол/см² для апреля.

Межгодовые вариации ОССОСА для рассмотренных территорий показаны на рис. 9. Для Иркутска есть заметный отрицательный тренд в 0.2×10^{18} мол/см² с 2010 по 2020 гг. с малыми вариациями межгодовых значений за последние три года. Это один из показателей, позволивший вывести Иркутск из категории городов с очень высоким уровнем ЗА. Для Вихоревки есть слабый отрицательный тренд для межгодовых вариаций ОССОСА, однако отмечен заметный рост на 0.1×10^{18} мол/см² с 2019 по 2020 гг. Для Селенгинска межгодовые тренды не отмечены при наличии абсолютного максимума значений ОССОСА в 2015 г. Для Железногорска-Илимского также не отмечены межгодовые тренды значений ОССОСА, но, как и для Вихоревки, есть заметный рост с 2019 по 2020 гг. ОССОСА на 0.14×10^{18} мол/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены сезонные и межгодовые вариации аэрозольной оптической толщи и общего содержания угарного газа в столбе атмосферы за период 2010–2021 гг. по данным приборов MODIS и MOPITT спутника Тегга для нескольких городов Иркутской области и Бурятии, входящих в список городов с высоким уровнем загрязнения атмосферы. Для Иркутска показано уменьшение межгодового значения АОТ с 0.278 в 2012 г. до 0.14 в 2020 г. с общим отрицательным трендом. Однако в 2021 г. межгодовое значение АОТ для Иркутска выросло и составляло 0.22. Для Иркутска показан отрицательный тренд для межгодовых вариаций общего содержания СО в столбе атмосферы. Рассматриваемые территории по вариациям АОТ можно разделить на две группы: 1 – города Иркутск, Зима, Селенгинск, Улан-Удэ, 2 – Вихоревка, Железногорск-Илимский, Усть-Кут. Общим для этих двух групп является типичное сезонное поведение АОТ, а именно, рост значений для летнего сезона и достижение максимальных значений АОТ в июле-августе. Отличие состоит в сезонных максимумах значений АОТ, которые для первой группы не превышают 1, для второй группы больше 1. Многолетние среднемесячные значения АОТ для этих групп также различаются, а именно, для первой группы максимальные значения АОТ не превышают 0.3, для второй группы достигают 0.5.

В работе определены аэрозольные оптические характеристики атмосферы (АОТ, параметр Ангстрема, функция распределения частиц аэрозоля по размеру, комплексный параметр преломления частиц) по наземным измерениям фотометром

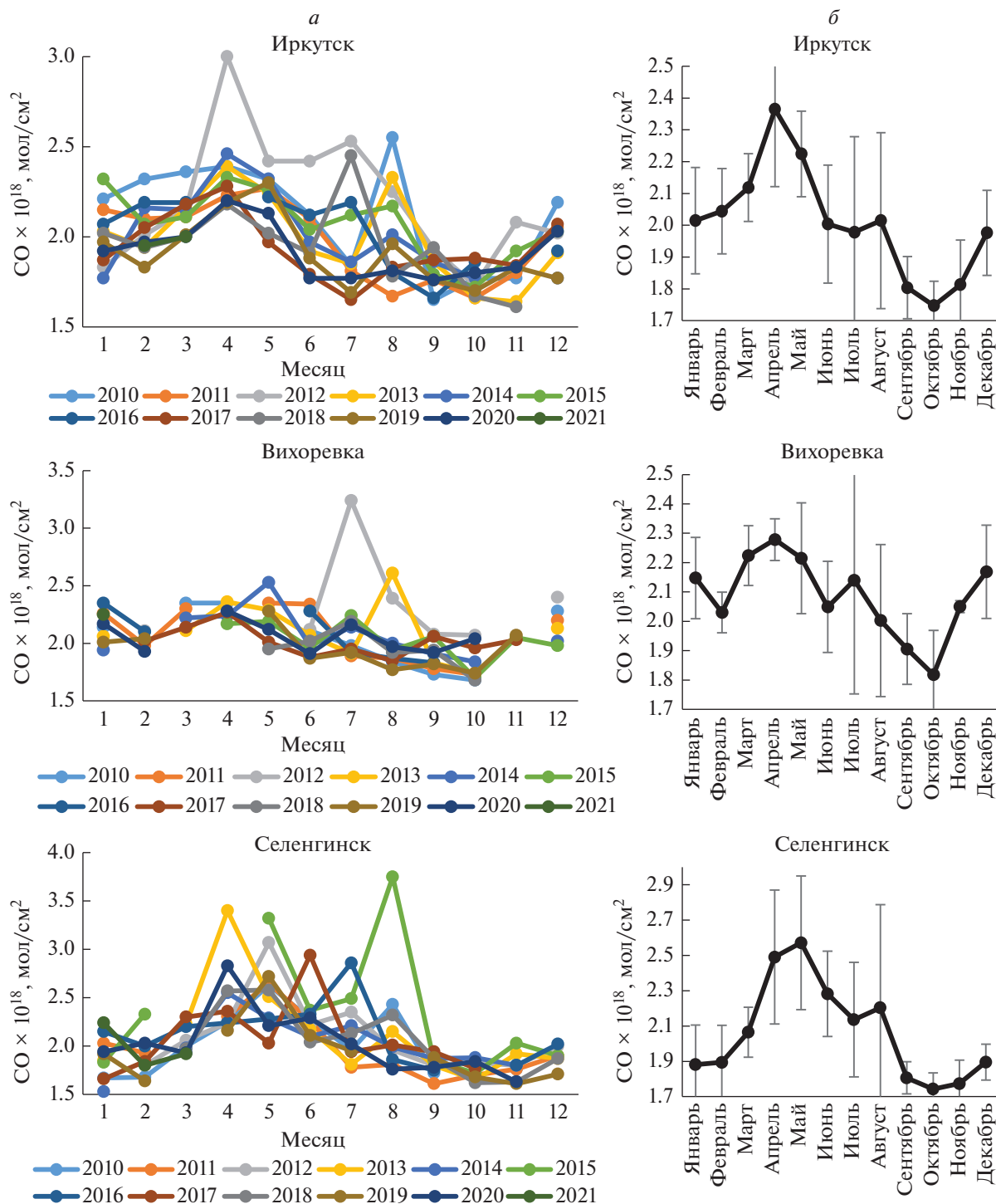


Рис. 8. Сезонные и многолетние сезонные вариации ОССОСА за 2010–2020 гг.

SIMEL в п. Торы (Бурятия), входящем с систему сети AERONET. Многолетние за период 2010–2021 гг. сезонные вариации АОТ по наземным измерениям показали максимум в августе. При сравнении многолетних сезонных вариаций АОТ по наземным (AERONET) и спутниковым OMI/Aura данным отмечена близость значений

АОТ для летнего и осеннего сезонов и значительное превышение АОТ по спутниковым данным над наземными измерениями для весенних месяцев. Наибольший коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми измерениями АОТ принадлежит 2021 г. и равен $\rho_s = 0.64$.

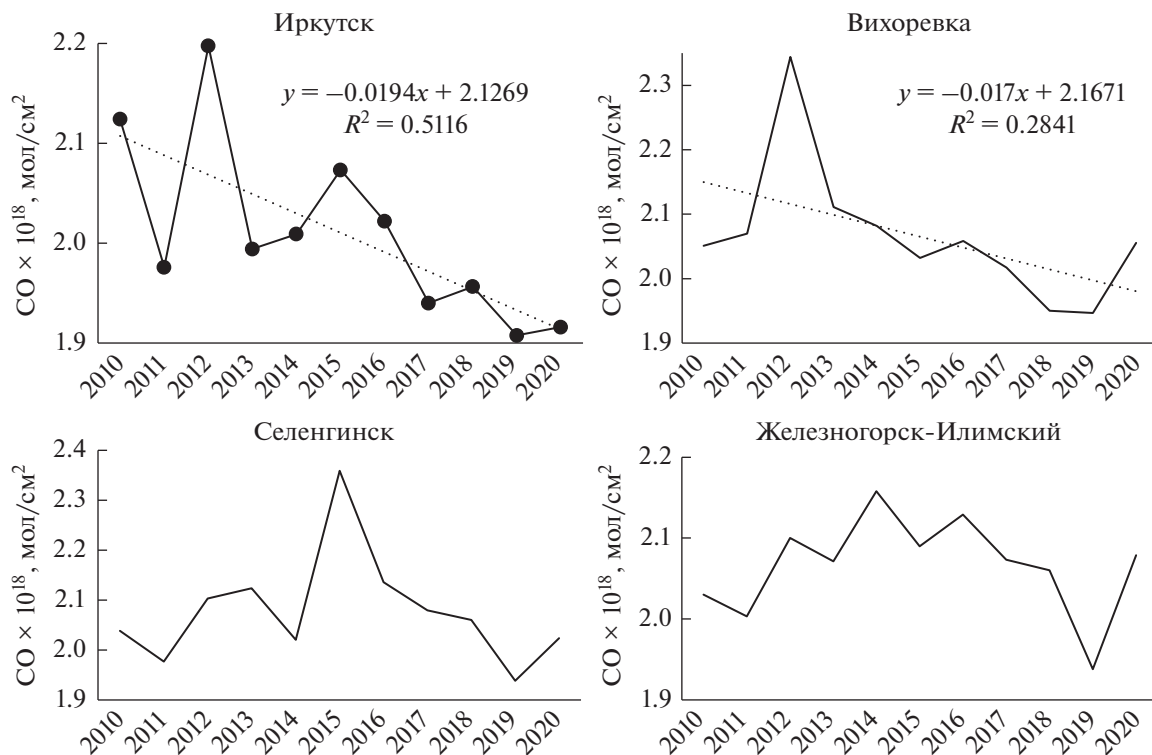


Рис. 9. Межгодовые вариации ОССОСА для периода 2010–2020 гг.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме “Космос”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. Вариации параметров пылевого аэрозоля в Душанбе по данным AERONET // https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf.
- Волкова К.А., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I. Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. 31. № 6. С. 425–431.
<https://doi.org/10.15372/AOO20180601>
- Родионова Н.В. Возможность обнаружения гарей по разновременным радарным изображениям SENTINEL 1 для районов юга Сибири в сезон весна–лето 2015 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 2. С. 164–175.
- Родионова Н.В. Вариации аэрозольной оптической толщи, черного углерода, угарного газа и метана по спутниковым наблюдениям атмосферы в сезон лесных пожаров в районе Якутска в 2013–2021 гг. // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 232–242.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242>
- Тащилин М.А., Яковлева И.П., Сакерин С.М. Пространственно-временные вариации аэрозольной оптической толщи в Байкальском регионе // *Соврем. пробл. ДДЗ из космоса*. 2021. Т. 18. № 1. С. 219–226.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226>
- Трифонов-Яковлева А. М., Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В. Сравнение содержания монооксида углерода в атмосфере по наземным и спутниковым измерениям // http://conf.rse.geos-mis.ru/files/pdf/19/8814_ИКИ2021.pdf.
- Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 20673–20696.
- Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Muñoz O., Veihelmann B., Wim J. van der Zande, Jean-Francois Leon, Sorokin M., Slutsker I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D11208.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006619>
- Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D24. P. 31333–31350.
- Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R.R., Thompson A.M., Schafer J.S. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D17203.
<https://doi.org/10.1029/2012JD018127>, 2012. 1–18.
- NASA/LARC/SD/ASDC. 2000. MOPITT Derived CO (Thermal Infrared Radiances) V008 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. Retrieved from https://doi.org/10.5067/TERRA/MOPITT/MOP02T_L2.008

Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–14. D07207. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>.

Optical Characteristics of Aerosol and Carbon Monoxide Content in the Atmosphere over the Irkutsk Region and Buryatia in 2010–2021

N. V. Rodionova

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Moscow Region, Fryazino, Russia

Seasonal and interannual variations of the aerosol optical depth (AOD) and the total carbon monoxide content in the atmospheric column have been determined by measurements of the MODIS and MOPITT instruments of the Terra satellite for several cities of the Irkutsk region and Buryatia with high level of atmospheric pollution for the period 2010–2021. For Irkutsk, a decrease of AOD interannual value from 0.278 in 2012 to 0.14 in 2020 with a general negative trend is shown. However, in 2021, the interannual AOD value for Irkutsk increased to 0.22. For Irkutsk, a negative trend of interannual variations in the total CO content in the atmospheric column is shown. When comparing the long-term seasonal variations of AOD according to ground measurements by CIMEL photometer in Tory (Buryatia), and the OMI/Aura satellite data, it was shown the proximity of AOD values for the summer and autumn seasons and a significant excess of AOT according to satellite data over ground measurements for the spring months. The largest Spearman correlation coefficient between ground and satellite measurements of AOD belongs to 2021 and is equal to $\rho_s = 0.64$.

Keywords: ground and satellite measurements, aerosol optical depth, carbon monoxide total column, atmospheric pollution, spearman correlation coefficient

REFERENCES

- Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. Variacii parametrov pylevogo aerolya v Dushanbe po dannym AERONET [Variations of dust aerosol parameters in Dushanbe according to AERONET data] // https://inis.iaea.org/Collection/NCLCollectionStore/_Public/50/030/50030162.pdf. (In Russian).
- Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. 105, 20673–20696.
- Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Munoz O., Veihelmann B., Wim J. van der Zande, Jean-Francois Leon, Sorokin M., Slutsker I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D11208. <https://doi.org/10.1029/2005JD006619>
- Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D24. P. 31333–31350.
- Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R.R., Thompson A.M., Schafer J.S. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. 1–18. D17203. <https://doi.org/10.1029/2012JD018127>.
- NASA/LARC/SD/ASDC. 2000. MOPITT Derived CO (Thermal Infrared Radiances) V008 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. Retrieved from https://doi.org/10.5067/TERRA/MOPITT/MOP02T_L2.008
- Rodionova N.V. Vozmozhnost' obnaruzheniya garej po raznovremennym radarnym izobrazheniyam SENTINEL 1 dlya rajonov yuga Sibiri v sezon vesna-letu 2015 [Evaluation of Sentinel 1 imagery for burned area detection in southern Siberia in spring and summer 2015] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 2. P. 164–175. (In Russian).
- Rodionova N.V. Variacii aerolya noj opticheskoy tolshchi, chernogo ugleroda, ugarnogo gaza i metana po sputnikovym nablyudeniyam atmosfery v sezon lesnykh pozharov v rajone YAkutsk v 2013–2021 gg. [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] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. № 2. P. 232–242. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-232-242>
- Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–14. D07207. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>
- Tashchilin M.A., Yakovleva I.P., Sakerin S.M. Prostranstvenno-vremennye variacii aerolya noj opticheskoy tolshchi v Bajkal'skom regione [Spatio-temporal variations of the aerosol optical depth in the Baikal region] // *Sovrem. probl. DDZ iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 1. P. 219–226. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-219-226>
- Trifonova-Yakovleva A.M., Chesnokova T.YU., Chencov A.V., Zaharov V.I., Rokotyan N.V. Sravnenie sodержaniya monooksida ugleroda v atmosfere po nazemnym i sputnikovym izmereniyam [Comparison of carbon monoxide content in the atmosphere by ground and satellite measurements] // http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/19/8814_I-KI2021.pdf. (In Russian).
- Volkova K.A., Poberovskij A.V., Timofeev YU.M., Ionov D.V., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I. Aerolya nye opticheskie karakteristiki po dannym izmerenij solnechnogo fotometra CIMEL (AERONET) vblizi Sankt-Peterburga [Aerosol optical characteristics according to measurements of the CIMEL solar photometer (AERONET) near St. Petersburg] // *Optika atmosfery i okeana*. 2018. V. 31. № 6. P. 425–431. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/AOO20180601>