

Сезонные вариации атмосферных примесей в Байкальском регионе по данным спутниковых наблюдений Aura MLS

И. В. Медведева^{1,2}, А. В. Татарников¹, И. К. Едемский¹, А. В. Саункин¹

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

² *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*

Представлены результаты исследования сезонных вариаций концентрации атмосферных примесей CO и H₂O над Байкальской природной территорией. Для анализа использованы данные измерений микроволнового радиометра MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder), установленного на спутнике Aura EOS (*англ.* Earth Observing System), за период 2010–2021 гг. Анализировались данные на высотах стратосферы для высотных уровней в диапазоне 215,4–10 гПа (~11–32 км) для локаций Хоринск (52,17° с. ш., 109,77° в. д.) и Жигалово (54,81° с. ш., 105,15° в. д.). В указанном высотном диапазоне спутниковые данные о концентрации CO представлены для 9 высотных уровней, значения концентрации H₂O — для 17 высотных уровней. Для временного интервала 2010–2020 гг. для каждой локаций получены усреднённые по всем годам сезонные вариации концентрации анализируемых компонент для каждого высотного уровня в интервале 215,4–10 гПа (~11–32 км) отдельно для дневных и ночных условий. Сопоставление полученных результатов с поведением концентрации атмосферных примесей в 2021 г. выявило повышенное содержание CO для локаций Хоринск в июле–августе, когда в анализируемом регионе наблюдалась повышенная задымлённость от лесных пожаров.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, атмосферные примеси, CO, H₂O, сезонные вариации, стратосфера, пожары

Одобрена к печати: 27.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-315-324

Введение

Байкальская природная территория — это область, в состав которой входят оз. Байкал, его водоохранная зона и водосборная площадь, особо охраняемые природные территории, прилегающие к оз. Байкал, а также прилегающая территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него. Одна из важнейших экологических задач по охране Байкальской природной территории — мониторинг состояния атмосферы и оценка возможного воздействия переносов антропогенных загрязнений и экстремальных природных явлений на экосистему региона. Спутниковый мониторинг в настоящее время активно используется для контроля состояния состава и температуры атмосферы в большом диапазоне высот, что позволяет получать картину их глобального пространственного распределения. Данные спутниковых измерений широко используются для оперативного выявления лесных пожаров и их последствий, особенно в труднодоступных регионах.

В работах (Forster et al., 2001; Wotawa, Trainer, 2000) было показано, что лесные пожары в средних и высоких широтах влияют на концентрацию атмосферных примесей в тропосфере на расстоянии нескольких тысяч километров. Эмиссии от лесных пожаров могут существенно изменить радиационный баланс и химический состав верхней тропосферы и нижней стратосферы (Cofer et al., 1996; Waibel et al., 1999). В ряде исследований было выявлено, что загрязнения стратосферы продуктами сгорания в результате интенсивных лесных пожаров могут распространяться в масштабах полушария (Fromm et al., 2005; Pumphrey et al., 2011; Siddaway, Petelina, 2011). Концентрация угарного газа (CO) — основная характеристика диагностики пирогенной активности. Увеличение концентрации CO в атмосфере в результате лесных пожаров отмечено в ряде работ (Ситнов, 2011; Jost et al., 2004). Так, в исследовании (Ситнов, 2011) проведён анализ спутниковых данных газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в летние месяцы 2010 г., когда большая

территория была охвачена лесными и торфяными пожарами. Было обнаружено, что в период массовых пожаров над европейской частью России наблюдалось значительное увеличение содержания СО. Авторами работы (Jost et al., 2004) был выявлен рост концентрации СО в тропосфере и стратосфере во время лесных пожаров, повышенные значения наблюдались до высот 15,8 км. Одним из продуктов, образующихся при горении биомассы, является водяной пар. Водяной пар выделяется при испарении содержащейся в горючем материале химически не связанной воды, а также в результате химических реакций (Parmar et al., 2008). В работах (Sitnov, Mokhov, 2013a, b) проведён сравнительный анализ влагосодержания в атмосфере в 1972 и 2010 гг. Было обнаружено значительное повышение содержания водяного пара в нижней атмосфере (анализируемые высотные уровни 1000–700 гПа (~0–3 км)) европейской территории России во время пожаров летом 2010 г.

Цель настоящей работы — исследование сезонных вариаций концентрации атмосферных примесей СО и Н₂О над Байкальской природной территорией по многолетним (2010–2021) данным спутниковых измерений сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder), установленного на спутнике Aura EOS (*англ.* Earth Observing System). Информация о средних фоновых значениях атмосферных примесей в различные сезоны года на разных высотных уровнях чрезвычайно важна для анализа их поведения в отдельные временные интервалы, в том числе и для своевременного выявления экологических проблем, среди которых одной из наиболее серьёзных в исследуемом регионе являются лесные пожары. Полученные по многолетним данным средние сезонные вариации СО и Н₂О были сопоставлены с вариациями в 2021 г., когда в анализируемом регионе наблюдались многочисленные сильные и продолжительные лесные пожары.

Используемые данные и метод анализа

Для анализа использовались спутниковые данные вертикальных профилей концентрации атмосферных примесей СО и Н₂О для временного интервала 2010–2021 гг., полученные при помощи лимбового зонда MLS на спутнике Aura EOS (NASA GESDISC DATA ARCHIVE, <https://acdisc.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/>), поскольку у этого спутника наиболее полные данные измерений различных атмосферных параметров в большом диапазоне высот, а также широкий пространственный охват. Спутник имеет полярную орбиту с периодом примерно 100 мин и высотой 705 км. Пространственный охват почти глобален (от –82 до +82° по широте). Вертикальные профили измеряются с интервалом ~25 с через каждые 1,5° по широте (~165 км) вдоль траектории орбиты. В течение суток осуществляется примерно 13 оборотов спутника вокруг Земли. Зонд MLS сканирует земной лимб в направлении полёта, регистрируя микроволновое излучение на частотах 118, 190, 240, 640 ГГц и 2,5 ТГц. Данные измерений зонда MLS используются для восстановления высотных профилей различных атмосферных компонентов, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы до верхней мезосферы как функций давления в гектопаскалях.

Для анализа вариаций концентрации атмосферных примесей был создан архив спутниковых данных для стратосферных высот для высотных уровней в диапазоне 215,4–10 гПа (~11–32 км) для двух локаций: с. Хоринск (52,17° с.ш., 109,77° в.д.) и пос. Жигалово (54,81° с.ш., 105,15° в.д.) (*рис. 1*, см. с. 317). Выбор локаций был обусловлен целью исследования сезонных вариаций атмосферных примесей в двух точках наблюдения, относящихся к Байкальской природной территории, но расположенных на достаточном расстоянии друг от друга, чтобы проанализировать возможное сходство/различие сезонного хода.

В указанном высотном диапазоне спутниковые данные о концентрации СО представлены для 9 высотных уровней, значения концентрации Н₂О — для 17 высотных уровней. Для анализа были выбраны данные, соответствующие дневным и ночным пролётам спутника над анализируемыми регионами. Для временного интервала 2010–2020 гг. для каждой локации получены усреднённые по всем годам сезонные вариации концентрации СО и Н₂О для каждого высотного уровня в интервале 215,4–10 гПа (~11–32 км) отдельно для дневных и ноч-

ных условий. Для анализа сезонных вариаций было проведено сглаживание данных методом скользящего среднего по 31 дню, что даёт возможность сглаживания колебаний с периодами менее 31 дня (месяца) и выделения сезонного хода. Эта процедура была проведена для каждой локации отдельно для дневных и ночных условий.

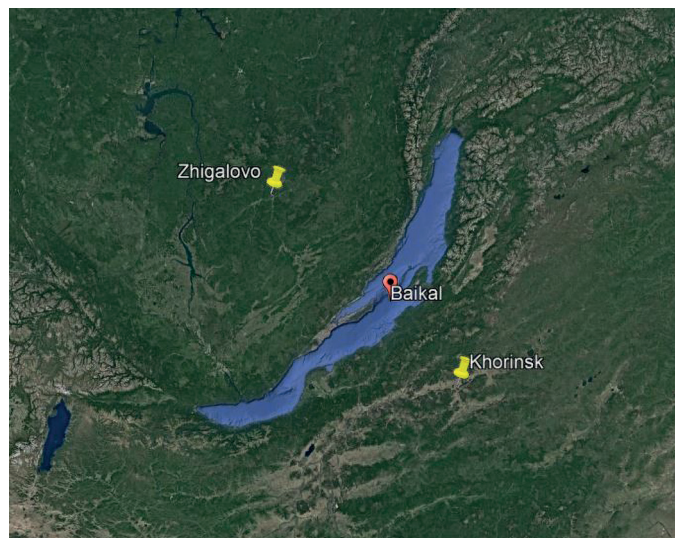


Рис. 1. Расположение локаций с. Хоринск (52,17° с. ш., 109,77° в. д.) и пос. Жигалово (54,81° с. ш., 105,15° в. д.)

Результаты анализа и их обсуждение

На рис. 2а (см. с. 318) приведены усреднённые по всем годам для временного интервала 2010–2020 гг. сезонные вариации концентрации СО для различных высотных уровней для дневных условий для локаций Хоринск (левая панель, серый цвет) и Жигалово (правая панель, синий цвет). Усреднённые сезонные вариации концентрации СО для ночных условий показаны на рис. 2б. Значения концентрации приведены в ppmv (англ. parts per million by volume) — это единица концентрации в миллионных долях по объёму.

Средние сезонные значения были рассчитаны для каждого высотного уровня (9 уровней для концентрации СО, 17 — для концентрации Н₂О). В качестве иллюстрации на рисунках приведены вариации концентрации СО и Н₂О для высотных уровней 215,4 гПа (~11 км), 146,8 гПа (~14 км), 31,6 гПа (~23 км) и 10 гПа (~32 км). Анализ вариаций СО выявил следующее. Для обеих локаций Хоринск и Жигалово поведение концентрации СО на отдельных высотных уровнях относительно похоже. Так, из графиков видно, что для нижнего анализируемого уровня 215,4 гПа (~11 км) в вариациях СО прослеживается летний максимум, тогда как с увеличением высоты сезонный максимум смещается к весенним месяцам (см. рис. 2). Возможным объяснением выявленных различий может быть то, что СО в верхней тропосфере и нижней стратосфере возникает в результате поднятия воздушных масс с поверхности Земли. В верхней стратосфере и мезосфере СО появляется притоком из термосферы, где он образуется в результате фотодиссоциации СО₂.

Для обеих локаций обнаружено различие в сезонном ходе концентрации СО для дневных и ночных условий на нижнем анализируемом высотном уровне 215,4 гПа (~11 км), которое заключается в хорошо выраженном летнем максимуме днём и гораздо менее выраженном в ночное время. Возможной причиной выявленных особенностей может быть следующее. Поскольку СО в верхней тропосфере и нижней стратосфере возникает в результате поднятия воздушных масс с поверхности Земли, то одной из причин летнего максимума может быть загрязнённость воздушных масс в результате лесных пожаров, которые достаточно часто наблюдаются в летнее время в анализируемом регионе.

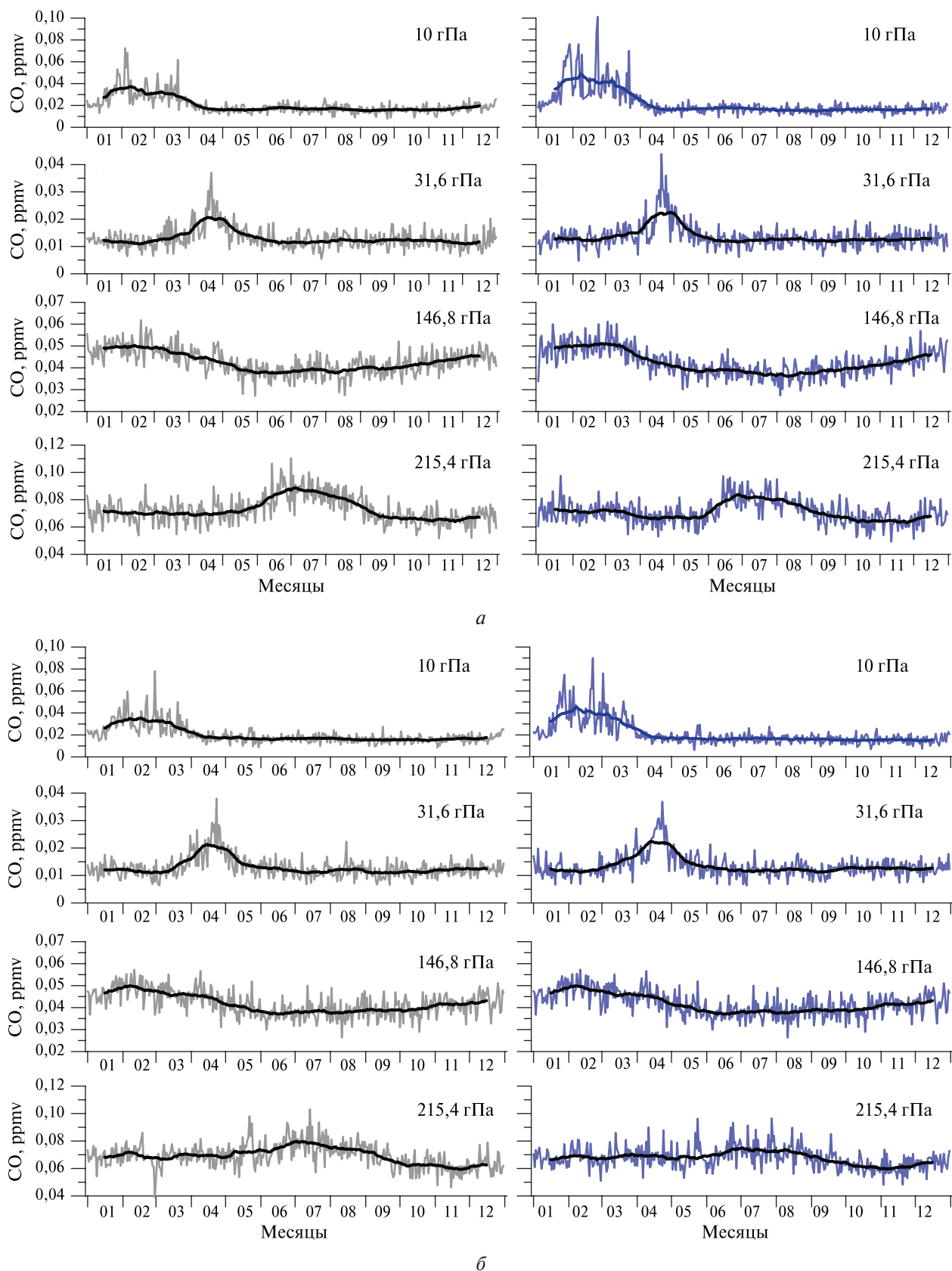


Рис. 2. Усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. вариации концентрации CO (тонкие кривые) и сглаженные по 31 дню методом скользящего среднего (толстые кривые) для высотных уровней 215,4 гПа (~11 км), 146,8 гПа (~14 км), 31,6 гПа (~23 км) и 10 гПа (~32 км). Левая панель, серый цвет — для локации Хоринск; правая панель, синий цвет — для локации Жигалово: а — для дневных условий; б — для ночных условий

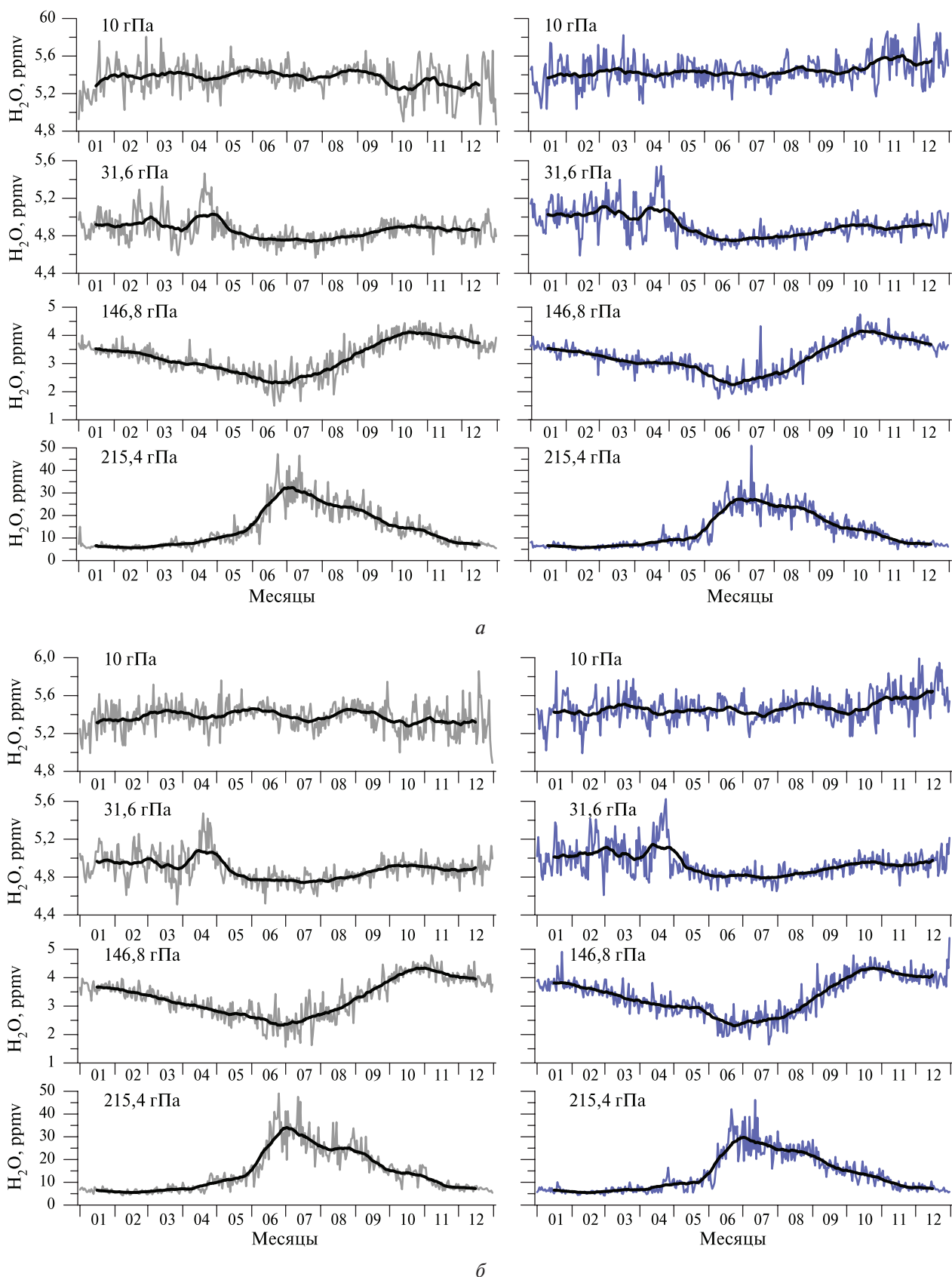
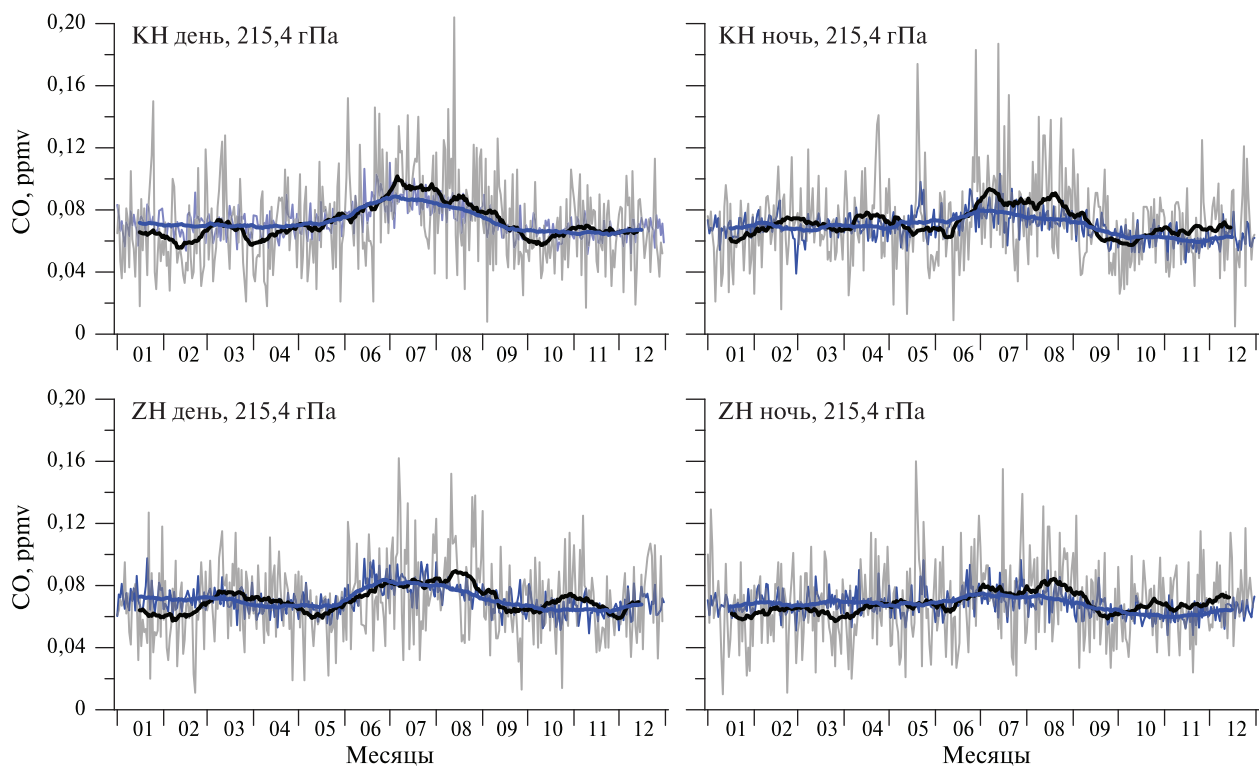
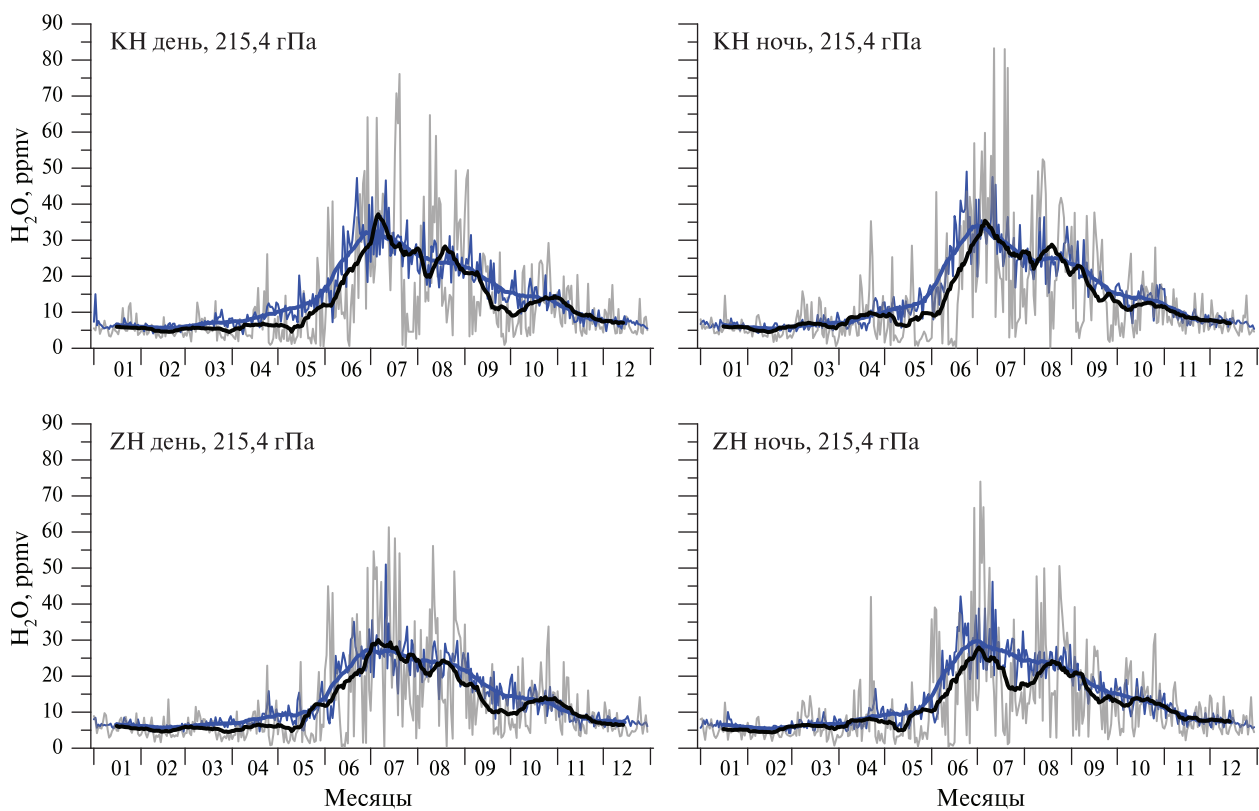


Рис. 3. Усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. сезонные вариации концентрации H_2O (тонкие кривые) и сглаженные по 31 дню методом скользящего среднего (толстые кривые) для высотных уровней 215,4 гПа (~11 км), 146,8 гПа (~14 км), 31,6 гПа (~23 км) и 10 гПа (~32 км). Левая панель, серый цвет — для локации Хоринск; правая панель, синий цвет — для локации Жигалово: а — для дневных условий; б — для ночных условий



a



b

Рис. 4. Вариации концентрации CO (a) и H₂O (б) на высотном уровне 215,4 гПа (~11 км), усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. (тонкие синие кривые) и сглаженные по 31 дню по методу скользящего среднего (толстые синие кривые), а также вариации концентрации CO (a) и H₂O (б) для анализируемого высотного уровня в 2021 г. (серые кривые) и сглаженные по 31 дню по методу скользящего среднего (чёрные кривые). Использованы данные дневных (слева) и ночных (справа) пролётов спутника над регионом расположения с. Хоринск (KH, верхняя панель) и пос. Жигалово (ZH, нижняя панель)

Так, в работе (Jost et al., 2004) повышенная концентрация CO, вызванная лесными пожарами, была обнаружена в стратосфере на высотах до 15,8 км. Интенсивность горения лесного пожара выше в дневное время, тогда как в ночные часы в большинстве случаев на месте открытого пламени возникают очаги тления. Это происходит из-за того, что в ночное время температура воздуха ниже, а его влажность выше, чем в дневное время. Таким образом, в дневное время вероятность поступления загрязнённых примесей от лесных пожаров воздушных масс на высоты верхней тропосферы и нижней стратосферы выше, чем в ночное, что подтверждают полученные графики (см. рис. 2).

Для анализируемых регионов были получены также средние сезонные вариации концентрации H₂O. Рисунок 3а (см. с. 319) показывает усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. сезонные вариации концентрации H₂O для высотных уровней 215,4 гПа (~11 км), 146,8 гПа (~14 км), 31,6 гПа (~23 км) и 10 гПа (~32 км) для дневных условий для локаций Хоринск (левая панель, серый цвет) и Жигалово (правая панель, синий цвет). Усреднённые сезонные вариации концентрации H₂O для ночных условий показаны на рис. 3б.

Анализ сезонных вариаций концентрации H₂O выявил, что их поведение для обеих локаций достаточно хорошо коррелирует на каждом анализируемом высотном уровне. Максимальная концентрация H₂O с хорошо выраженным летним максимумом наблюдается на нижнем анализируемом уровне 215,4 гПа (~11 км). В отличие от поведения концентрации CO, которая значительно различается как для обеих локаций, так и для дневных и ночных условий, в вариациях концентрации водяного пара существенных различий не обнаружено.

Полученные усреднённые сезонные вариации могут быть использованы для исследования поведения атмосферных примесей в отдельные временные интервалы, в том числе и как фоновые значения для контроля состояния средней атмосферы в периоды сильных лесных пожаров. При пожарах горение охватывает толстый слой биомассы, и в атмосферу выделяется большое количество разнообразных химических соединений. Спутниковый мониторинг даёт возможность получить количественные оценки степени загрязнения атмосферы продуктами горения и оценить пространственный масштаб областей загрязнений.

Летом 2021 г. наблюдались многочисленные масштабные лесные пожары в регионах Сибири и Дальнего Востока, общая площадь лесных пожаров на территории России составила 18,2 млн га и стала рекордной с начала XXI в. (Алеев, 2021). Особо сильные и многочисленные пожары фиксировались на территории Якутии, где с конца июня был введён режим чрезвычайной ситуации, который действовал до середины августа.

В начале августа 2021 г. наблюдалось значительное распространение задымлённости от сибирских лесных пожаров. Так, по данным радиометра MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутнике Aqua, 06.08.2021 дым распространился на ~3200 км с востока на запад и на ~4000 км с юга на север, достигнув Северного полюса (August 7..., 2021). В июле 2021 г. максимальная концентрация лесных пожаров регистрировалась в южных и центральных районах Якутии. По данным, полученным на приёмной спутниковой станции «Алиса-СК» Института солнечно-земной физики СО РАН (Татарников и др., 2022), с 26.07.2021 наблюдалась максимальная площадь горения в анализируемом регионе: многочисленные очаги пожаров распространились на большую часть Якутии и север Иркутской обл. Нами был проведён анализ поведения концентрации CO и H₂O в 2021 г. и сопоставление полученных результатов со средними сезонными вариациями атмосферных примесей, рассчитанными по данным многолетних спутниковых измерений. На рис. 4а (см. с. 320) представлены вариации концентрации CO на высотном уровне 215,4 гПа (~11 км), усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. и соответствующие дневным (левая панель) и ночным (правая панель) пролётам спутника над регионами расположения с. Хоринск и пос. Жигалово. На этом же графике приведены вариации концентрации CO для анализируемого высотного уровня 215,4 гПа в 2021 г. Обнаружено, что в июле – августе 2021 г. концентрация CO на высотном уровне 215,4 гПа (~11 км) для локации Хоринск (КН) значительно превышала средние сезонные значения. Для локации Жигалово в июле 2021 г. концентрация CO была близка к средним сезонным значениям, небольшое превышение отмечалось в августе 2021 г. Выявленное существенное превышение концентрации CO средних

сезонных значений для локации Хоринск в июле – августе 2021 г. (КН) и меньшее по величине для локации Жигалово (ZH) в августе 2021 г. может быть результатом загрязнения воздушных масс над анализируемыми регионами из-за лесных пожаров. Полученный результат подтверждает выводы работы (Jost et al., 2004) о достижении воздушными массами с повышенной концентрацией CO, образующейся в результате сильных лесных пожаров, стратосферных высот.

На *рис. 4б* представлены вариации концентрации H₂O на высотном уровне 215,4 гПа (~11 км), усреднённые для временного интервала 2010–2020 гг. и соответствующие дневным (*левая панель*) и ночным (*правая панель*) пролётам спутника над регионами расположения с. Хоринск и пос. Жигалово. На этом же графике приведены вариации концентрации H₂O для анализируемого высотного уровня 215,4 гПа в 2021 г.

Анализ вариаций концентрации водяного пара в 2021 г. и сопоставление со средними сезонными вариациями для 2010–2020 гг. показали следующее. Для отдельных дней наблюдались повышенные значения концентрации H₂O (см. *рис. 4б*, серые тонкие кривые), но, в отличие от CO, сезонные вариации концентрации H₂O в 2021 г. не превышали средние (2010–2020) сезонные значения (см. *рис. 4б*, толстые кривые). Ранее в работах (Sitnov, Mokhov, 2013a, b) было выявлено повышенное влагосодержание в атмосфере во время лесных пожаров. Однако исследование проводилось для высотных уровней, не превышающих 700 гПа (~3 км), и обнаруженные аномалии уменьшались с высотой. Таким образом, можно предположить, что лесные пожары в 2021 г. не оказали существенного влияния на содержание водяного пара в стратосфере на анализируемом высотном уровне 215,4 гПа (~11 км).

Заключение

Проведено исследование сезонных вариаций концентрации атмосферных примесей CO и H₂O над Байкальской природной территорией по многолетним (2010–2021) данным спутниковых измерений MLS Aura для локаций Хоринск (52,17° с. ш., 109,77° в. д.) и Жигалово (54,81° с. ш., 105,15° в. д.). Анализировались данные на высотах стратосферы для высотных уровней в диапазоне 215,4–10 гПа (~11–32 км). Получены усреднённые сезонные вариации концентрации анализируемых компонент для каждого высотного уровня для дневных и ночных условий. Для обеих локаций выявлено различие в сезонном ходе концентрации CO для дневных и ночных условий на нижнем анализируемом высотном уровне 215,4 гПа (~11 км), которое заключается в хорошо выраженном летнем максимуме днём и гораздо менее выраженном в ночное время. Сопоставление полученных результатов с поведением концентрации атмосферных примесей в 2021 г. выявило существенное превышение концентрации CO средних сезонных значений для локации Хоринск в июле – августе, когда в анализируемом регионе наблюдалась повышенная задымлённость от лесных пожаров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00146 (<https://rscf.ru/project/22-17-00146>). В работе использованы алгоритмы и методы анализа, разработанные при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. *Алеев Е.* Greenpeace назвал 2021 год рекордным по площади лесных пожаров в России с начала века // tass.ru. 19 сент. 2021. <https://tass.ru/proisshestviya/12442833> (дата обращения 11.12.2022).
2. *Ситнов С. А.* Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 572–581.
3. *Татарников А. В., Белецкий А. Б., Зоркальцева О. С. и др.* Мониторинг лесных пожаров на Байкальской природной территории по данным ДЗЗ // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 7. С. 68–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-7-68-71>.

4. August 7, 2021 — Smoke from Siberian Wildfires // modis.gsfc.nasa.gov. 2021. https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2021-08-07 (accessed 07.12.2022).
5. *Cofe W. R. III, Winstead E. L., Stocks B. J., Overbay L. W., Goldammer J. G., Cahoon D. R., Levine J. S.* Emissions from boreal forest fires: Are the atmospheric impacts underestimated? // *Biomass Burning and Global Change* / ed. J. S. Levine. Cambridge, Mass: MIT Press, 1996. P. 834–839.
6. *Forster C., Wandering U., Wotawa G. et al.* Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. Iss. D19. P. 22887–22906. DOI: 10.1029/2001JD900115.
7. *Fromm M., Bevilacqua R., Servranckx R. et al.* Pyro-cumulonimbus injection of smoke to the stratosphere: Observations and impact of a super blowup in northwestern Canada on 3–4 August 1998 // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. Article D08205. <https://doi.org/10.1029/2004JD005350>.
8. *Jost H.-J., Drdla K., Stohl A. et al.* In-situ observations of mid-latitude forest fire plumes deep in the stratosphere // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. Article L11101. DOI: 10.1029/2003GL019253.
9. *Parmar R. S., Welling M., Andreae M. O., Helas G.* Water vapor release from biomass combustion // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. V. 8. Iss. 20. P. 6147–6153. DOI: 10.7868/S0002351513040093.
10. *Pumphrey H. C., Santee M. L., Livesey N. J. et al.* Microwave Limb Sounder observations of biomass-burning products from the Australian bush fires of February 2009 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11. Iss. 13. P. 6285–6296. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6285-2011>.
11. *Siddaway J. M., Petelina S. V.* Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bushfire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Article D06203. <https://doi.org/10.1029/2010JD015162>.
12. *Sitnov S. A., Mokhov I. I.* (2013a). Water-vapor content in the atmosphere over European Russia during the summer 2010 fires // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. Iss. 4. P. 380–394. DOI: 10.1134/S0001433813040099.
13. *Sitnov S. A., Mokhov I. I.* (2013b). Peculiarities of water vapor distribution in the atmosphere over the European part of Russia in summer 2010 // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 448. Iss. 1. P. 86–91. DOI: 10.1134/S1028334X13010157.
14. *Waibel A. E., Fischer H., Wienhold F. G., Siegmund P. C., Lee B., Ström J., Lelieveld J., Crutzen P. J.* Highly elevated carbon monoxide concentrations in the upper troposphere and lowermost stratosphere at northern midlatitudes during the STREAM II summer campaign in 1994 // *Chemosphere*. 1999. V. 1. Iss. 1–3. P. 233–248.
15. *Wotawa G., Trainer M.* The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States // *Science*. 2000. V. 288. Iss. 5464. P. 324–328. DOI: 10.1126/science.288.5464.324.

Seasonal variations in the atmospheric constituents in the Baikal region from Aura MLS satellite observations

I. V. Medvedeva^{1,2}, A. V. Tatarnikov¹, I. K. Edemskiy¹, A. V. Saunkin¹

¹ *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

² *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*

Based on the Aura MLS (Microwave Limb Sounder) satellite data, seasonal variations in the concentrations of the CO and H₂O atmospheric constituents in the Baikal region were studied. For the analysis, we used satellite data on the vertical profiles of the CO and H₂O concentrations for 2010–2021, from the MLS aboard the EOS (Earth Observing System) Aura spacecraft. We analyzed the data at the stratospheric heights for the pressure levels within 215–10 hPa for the locations of Khorinsk (52.17° N, 109.77° E) and Zhigalovo (54.81° N, 105.15° E) for the period 2010–2021. In the analyzed altitude range, the data on CO concentration are presented for 9 pressure levels, on H₂O concentration — for 17 pressure levels. Average seasonal changes in the concentrations of the analyzed components were calculated for each pressure level in the range of 215.4–10 hPa (~11–32 km) in daytime and nighttime conditions for the period 2010–2020. Comparison of the obtained results with the variations in the concentrations of atmospheric constituents in 2021 revealed an increased CO concentration for Khorinsk in July–August 2021, when increased smoke from forest fires was observed in the analyzed region.

Keywords: satellite monitoring, atmospheric constituents, CO, H₂O, seasonal variations, stratosphere, fires

Accepted: 27.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-315-324

References

1. Aleev E., Greenpeace called 2021 a record year for forest fires in Russia since the beginning of the century, *tass.ru*, 19 Sept. 2021 (in Russian), <https://tass.ru/proisshestviya/12442833> (accessed 11.12.2022).
2. Sitnov S. A., Analysis of satellite observations of aerosol optical characteristics and atmospheric gas admixtures over the central region of the Russian Federation in the period of anomalously high summer temperatures and mass fires in 2010, *Optika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 24, No. 7, pp. 572–581 (in Russian).
3. Tatarnikov A., Beletskiy A., Zorkaltseva O. et al., Monitoring of Forest Fires in the Baikal Natural Reserve According to the Data of Remote Sensing of the Earth, *Ecology and Industry of Russia*, 2022, Vol. 26, Issue 7, pp. 68–71 (in Russian), <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-7-68-71>.
4. August 7, 2021 — Smoke from Siberian Wildfires, *modis.gsfc.nasa.gov*, 2021, https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2021-08-07 (accessed 07.12.2022).
5. Cofer W. R. III, Winstead E. L., Stocks B. J., Overbay L. W., Goldammer J. G., Cahoon D. R., Levine J. S., Emissions from boreal forest fires: Are the atmospheric impacts underestimated? In: *Biomass Burning and Global Change*, J. S. Levine (ed.), Cambridge, Mass: MIT Press, 1996, pp. 834–839.
6. Forster C., Wandler U., Wotawa G. et al., Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, Issue D19, pp. 22,887–22,906, DOI: 10.1029/2001JD900115.
7. Fromm M., Bevilacqua R., Servranckx R. et al., Pyro-cumulonimbus injection of smoke to the stratosphere: Observations and impact of a super blowup in northwestern Canada on 3–4 August 1998, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Article D08205, <https://doi.org/10.1029/2004JD005350>.
8. Jost H.-J., Drdla K., Stohl A. et al., In-situ observations of mid-latitude forest fire plumes deep in the stratosphere, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, Article L11101, DOI: 10.1029/2003GL019253.
9. Parmar R. S., Welling M., Andreae M. O., Helas G., Water vapor release from biomass combustion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, Vol. 8, Issue 20, pp. 6147–6153, DOI: 10.7868/S0002351513040093.
10. Pumphrey H. C., Santee M. L., Livesey N. J. et al., Microwave Limb Sounder observations of biomass-burning products from the Australian bush fires of February 2009, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, Issue 13, pp. 6285–6296, <https://doi.org/10.5194/acp-11-6285-2011>.
11. Siddaway J. M., Petelina S. V., Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bushfire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, Article D06203, <https://doi.org/10.1029/2010JD015162>.
12. Sitnov S. A., Mokhov I. I. (2013a), Water-vapor content in the atmosphere over European Russia during the summer 2010 fires, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, Issue 4, pp. 380–394, DOI: 10.1134/S0001433813040099.
13. Sitnov S. A., Mokhov I. I. (2013b), Peculiarities of water vapor distribution in the atmosphere over the European part of Russia in summer 2010, *Doklady Earth Sciences*, 2013, Vol. 448, Issue 1, pp. 86–91, DOI: 10.1134/S1028334X13010157.
14. Waibel A. E., Fischer H., Wienhold F. G., Siegmund P. C., Lee B., Ström J., Lelieveld J., Crutzen P. J., Highly elevated carbon monoxide concentrations in the upper troposphere and lowermost stratosphere at northern midlatitudes during the STREAM II summer campaign in 1994, *Chemosphere*, 1999, Vol. 1, Issue 1–3, pp. 233–248.
15. Wotawa G., Trainer M., The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States, *Science*, 2000, Vol. 288, Issue 5464, pp. 324–328, DOI: 10.1126/science.288.5464.324.