

УДК 551.501.816:551.510.42

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА НАД г. ОБНИНСК ПО ДАННЫМ ЛИДАРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2023 г. В. А. Коршунов*

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Научно-производственное объединение “Тайфун”,
ул. Победы, д. 4, Калужской обл., Обнинск, 249038 Россия

*e-mail: korshunov@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Представлен анализ вариаций интегрального по высоте содержания стратосферного озона в слоях 13–18, 18–23 и 23–30 км по данным лидарных и спутниковых измерений в 2014–2022 гг. над г. Обнинск (55.1° с.ш., 36.6° в.д.). Проведено моделирование межгодовых вариаций озона для отдельных кварталов года методом множественной линейной регрессии. В качестве факторов влияния рассматривались квазидвухлетние колебания экваториального ветра (КДК), Арктическая осцилляция (АО), Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК), солнечная активность (СА), вулканический аэрозоль (ВА) и полярные стратосферные облака (ПСО). Наблюдалось увеличение содержания озона в восточной фазе КДК в интервале высот 18–30 км (I–II кв.) и в западной фазе КДК в интервале 13–23 км (IV кв.). В отдельных слоях обнаружены значимые влияния АО (II–III кв.), СА (I–II кв.) и ВА (III–IV кв.). Влияние ПСО в течение года проявляется сначала во II квартале в слое 13–18 км, а затем в IV квартале в слое 13–23 км. Рассмотрены возможные физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых корреляционных связей.

Ключевые слова: стратосферный озон, лидарные измерения озона, вариации озона, метод множественной линейной регрессии

DOI: 10.31857/S0002351523050073, **EDN:** ZAMAIL

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферный озон является защитным слоем, предохраняющим биосферу Земли от воздействия ультрафиолетового излучения. В значительной мере он определяет термический режим стратосферы и тем самым является важным фактором, влияющим на фотохимические процессы и динамику атмосферы. Поэтому мониторинг стратосферного озона, его вариации и тренды привлекают пристальное внимание исследователей. Анализ вариаций содержания озона в различных высотных слоях представляет интерес с точки зрения выявления физических механизмов и факторов, определяющих содержание озона. В свою очередь, знание факторов влияния необходимо для построения химико-климатических моделей и прогнозирования возможного изменения содержания озона в результате изменения этих факторов в ходе глобального потепления.

В настоящее время основное внимание уделяется спутниковым методам наблюдения за озоновым слоем, поскольку они дают глобальную кар-

тину распределения и изменения озона. Тем не менее, наземные дистанционные и контактные баллонные измерения остаются важной составляющей системы мониторинга озонового слоя. К их числу относятся лидарные измерения методом дифференциального поглощения. Важным потенциальным преимуществом лидарных измерений является высокое пространственное разрешение и значительно меньший по сравнению со спутниковыми методами объем используемой априорной информации. Определенным недостатком является зависимость от погодных условий, поскольку измерения могут проводиться только в ночное время и в отсутствии облачности. В данной работе представлены результаты лидарных измерений стратосферного озона над г. Обнинск (55.1° с.ш., 36.6° в.д.) с 2014 по 2022 гг., дополненные в необходимых случаях спутниковыми данными MLS Aura. Это особенно важно для зимнего сезона, когда выполнение лидарных измерений часто ограничено погодными условиями. Целью работы является статистический анализ вариаций содержания озона в отдельных страто-

Таблица 1. Результаты сопоставления лидарных и спутниковых измерений

	Положение слоя, км	Весна	Лето	Осень
Относительная величина разницы $\langle \delta \rangle / C$, %	13–18	3.0	1.8	0.9
	18–23	1.6	–0.1	–0.5
	23–30	2.7	1.4	3.0

сферных слоях над точкой наблюдения г. Обнинск, представляющей центральную часть ЕТР.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Измерения проводились в диапазоне высот от 12 до 35 км с помощью лидара АК-3 методом дифференциального поглощения на длинах волн 308 и 355 нм [Иванов и др., 2020]. Всего за рассматриваемый период выполнено 686 лидарных измерений. Пробелы в лидарных измерениях заполнены спутниковыми данными. Для этой цели использованы оперативные данные измерений прибором MLS, установленным на спутнике Aura (NASA) [Aura MLS]. Среди всех измерений MLS Aura выбирались измерения, которые удовлетворяли определенным пространственно-временным условиям: а) расстояние не более 500 км от места расположения лидара; б) время ± 17 ч от времени измерения лидара. В отдельные дни спутниковые измерения, соответствующие этим условиям, отсутствовали. В результате было добавлено 2371 спутниковое измерение. Спутниковые данные пересчитывались к геометрической системе координат с помощью аэрологических измерений, полученных с ближайшего к Обнинску пункта радиозондирования.

Для проверки сопоставимости результатов лидарных и спутниковых измерений проведено их сравнение по тем датам, когда одновременно имелись и те и другие данные. Для сравнения взяты среднесезонные значения средней концентрации озона в слоях 13–18, 18–23 и 23–30 км с 2014 по 2022 гг. Рассчитывалась средняя разница лидарных и спутниковых данных $\langle \delta \rangle$, и ее относительная величина $\delta / \langle C \rangle$, где C – средняя многолетняя концентрация озона в данном слое для данного сезона. Результаты сопоставления для весны, лета и осени представлены в табл. 1. Зимний сезон не рассматривался, поскольку для него статистика лидарных измерений в отдельные годы могла быть недостаточной, к тому же в это время года наблюдается большая пространственно-временная изменчивость концентрации озона.

Из табл. 1 видно, что смещение лидарных данных относительно спутниковых в большинстве случаев не превышает 1.6%. Полученные оценки разницы измерений двумя методами включают как погрешности измерений обоих методов, так и

влияние различий в пространственно-временной области измерений. На основании данных, приведенных в табл. 1, можно оценить погрешности объединенного ряда лидарных и спутниковых измерений. Для целей контроля результатов статистического моделирования можно принять ориентировочный уровень погрешности около 2%.

В качестве исходных данных для моделирования взято интегральное по высоте слоя содержание озона (ИСО) для выбранных трех высотных слоев: 13–18, 18–23 и 23–30 км. Интервал высот от тропопаузы до 23 км нередко рассматривается в целом как нижняя стратосфера. В данной работе он разбит на два подслоя. В соответствии с данными [Eriksson, Chen, 2002; Коршунов, Зубачев, 2018] в слое 13–18 км основным источником озона в зимне-весеннее время является адвекция из приполярных областей, а на высотах 18–23 км озон поступает преимущественно из тропической области.

В широтной зоне Обнинска наибольшие вариации концентрации озона связаны с его сезонным ходом. Сезонные вариации ИСО в отдельных слоях стратосферы по данным измерений с 2014 по 2021 гг. над г. Обнинск показаны на рис. 1. Отметим разницу в сезонном ходе в нижней и средней стратосфере. Если в слоях 13–18 и 18–23 км максимум ИСО наблюдается в зимне-весеннее время, то на высотах 23–30 км – в летний период. Максимальная амплитуда сезонного хода наблюдается в слое 13–18 км. Отличия сезонного хода в слоях 13–18 и 18–23 км заключаются в более продолжительном по времени минимуме в слое 13–18 км и наличии в этом слое двойного максимума в зимне-весенний период. Максимальная концентрация озона в зимнее время наблюдается в слое 18–23 км.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ОЗОНА

С целью исключения сезонных вариаций ИСО рассматривались межгодовые вариации ИСО для отдельных кварталов года $y_j = Y_j - \langle Y_j \rangle$, где j – номер года ($j = 1, \dots, 9$), Y_j – временной ряд ИСО, $\langle Y_j \rangle$ – средняя величина ИСО. Величины y_j (далее вариации озона) связаны с известными атмосферными явлениями, определяющими динамические и микрофизические процессы в атмосфере [Звягинцев и др., 2015]. Для выявления статистиче-

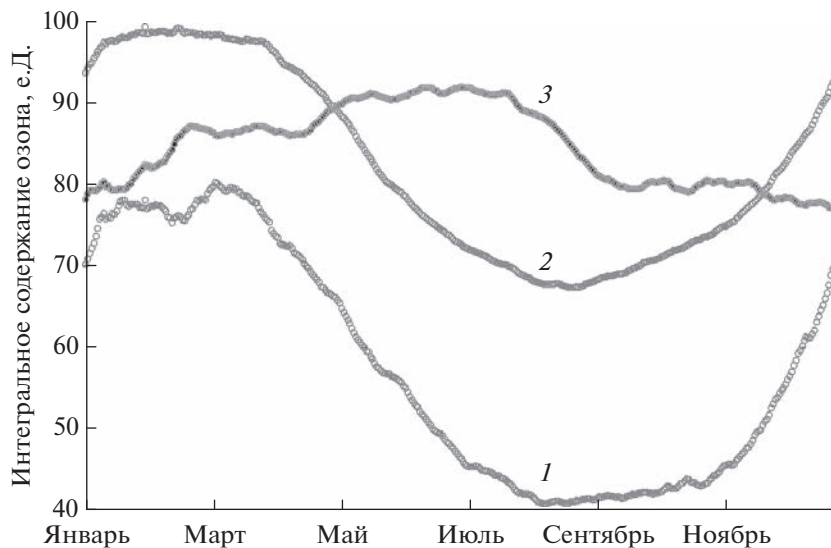


Рис. 1. Сезонный ход ИСО для слоев 13–18 (1), 18–23 (2) и 23–30 км (3) над г. Обнинск.

ских связей наблюдаемых вариаций озона с физическими параметрами-предикторами, описывающими эти процессы, использовался метод множественной линейной регрессии.

Уравнение регрессии в матричной записи имеет вид

$$y_j = \sum x_i P_{ji} + \varepsilon_j, \quad (1)$$

где x_i — искомые коэффициенты связи для предиктора i , P_{ji} — среднеквартальные величины вариаций (отклонений от средних за весь период с 2014–2022 гг. значений) предиктора i ($i = 1, \dots, N_j$) для года j , ε_j — невязки.

Уравнение (1) решалось относительно коэффициентов x_i методом наименьших квадратов. Для оценки СКО коэффициентов x_i использовалась ковариационная матрица решения $D(x) = (P^T P)^{-1} \sigma^2$, где σ^2 — дисперсия y_j . Величина σ^2 оценивалась по невязкам [Худсон, 1967].

В качестве предикторов взяты часто используемые при статистическом моделировании вариаций озона параметры: мульти-параметрический индекс Эль-Ниньо/Южного колебания (ЭНЮК) [MEI. V2], скорость среднезонального ветра на экваторе на уровне 30 мбар [QVO data], представляющая квазидвухлетние колебания (КДК) экваториального ветра, индекс Арктической осцилляции (АО) [Arctic oscillation], среднемесячные значения потока солнечной энергии на длине волны 10.7 см, как мера солнечной активности (СА) [Solar radio flux]. Кроме того, учитывалось влияние полярных стратосферных облаков (ПСО) и вулканического аэрозоля (ВА).

Влияние ПСО на озон, как известно, связано с количеством и временем существования ПСО

[Никифорова и др., 2017; Иванова и др., 2018; Цветкова и др., 2021]. Соответственно, в качестве предиктора для ПСО взят интеграл от площади ПСО по времени в течение зимнего сезона для данного года. Расчет указанных величин проведен с использованием данных [Ozone hole size]. Полученные значения интегралов в относительных единицах с 2014 по 2022 гг. составили 1.15, 0.14, 2.10, 0.27, 1.10, 0.048, 2.08, 0.33, 1.77. Максимальные величины интегралов относятся к 2016, 2020 и 2022 гг.

Для анализа вклада вулканического аэрозоля (ВА) в вариации озона в данной работе принята упрощенная модель, в которой предполагается, что воздействие аэрозоля на озон пропорционально величине выбросов (эмиссий) серы в стратосферу при вулканических извержениях взрывного типа. При этом вводится определенная временная задержка и некоторое текущее временное усреднение, учитывающие процессы переноса аэрозоля от источников до точки наблюдения. Выбор параметров задержки и усреднения проводился на основе эмпирических данных по известным наблюдениям вулканического аэрозоля.

При задании эмиссий за основу взята таблица среднемесячных значений выбросов серы в стратосферу для отдельных вулканов [Schallock et al., 2021]. За немногими исключениями извержения, представленные в [Schallock et al., 2021], имели место в тропическом поясе (23° ю.ш., 23° с.ш.). Эмиссии всех вулканов за месяц суммировались. Таблица эмиссий в [Schallock et al., 2021] кончается августом 2019 г. Поэтому были добавлены данные каталога NASA [SO₂ emissions] по 2021 г. Для однородности общего ряда в данные [SO₂ emis-

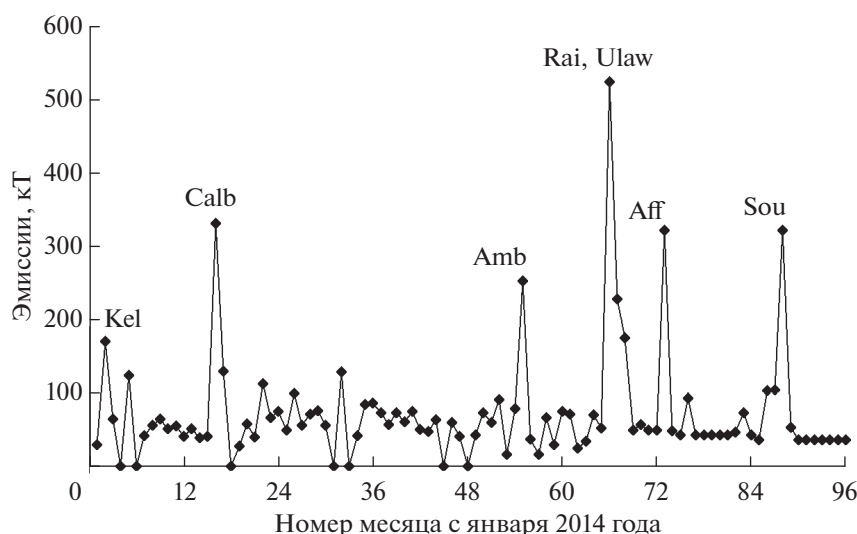


Рис. 2. Временной ход среднемесячных эмиссий серы в стратосферу.

sions] вводился корректирующий коэффициент, который был определен на основе анализа перекрывающихся по времени данных двух рядов. В дополнение к аэрозолю вулканических извержений были учтены эмиссии Австралийских лесных пожаров в январе 2020 г. [Khaykin et al., 2020], сравнимые по величине выброса серы в стратосферу с крупным вулканическим извержением. В первой половине 2020 г. аэрозоль Австралийских лесных пожаров наблюдался в экваториальной области на высотах от 18 до 30 км. Временной ряд данных по всем эмиссиям представлен на рис. 2. Отдельные пики соответствуют вулканам Kelud (8° ю.ш., 112° в.д.), Calbuco (41° ю.ш., 73° з.д.), Ambae (15° ю.ш., 168° в.д.), Raikoke (48° с.ш., 153° в.д.), Ulawun (5° ю.ш., 151° в.д.), Soufriere (17° с.ш., 1° в.д.) и Австралийским природным пожарам (Aff). Поскольку данные для 2022 г. отсутствовали, для 2022 г. приняты средние значения за предыдущие годы.

При формировании функции-предиктора все извержения и соответствующие эмиссии были разбиты на две группы. В первую входили малые и средние извержения тропического пояса, во вторую — более крупные извержения. Характерное время появления аэрозоля в средних широтах после извержения вулканов тропического пояса составляет 4–6 месяцев [Brühl et al., 2015]. Соответственно, для малых и средних извержений был принят временной сдвиг 5 месяцев. Для крупных извержений внетропических вулканов Южного полушария Calbuco и Ambae с учетом наблюдаемого времени появления отклика в районе Обнинска приняты временные сдвиги 8 и 10 месяцев, для аэрозоля Австралийских лесных пожаров — 12 месяцев. Для среднеширотного вулкана Райкоке временная задержка его рас-

пространения на слой 18–23 км, лежащий выше уровня первоначального выброса, принята равной четырем месяцам. После указанного смещения эмиссий проведено их трехмесячное текущее усреднение.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Перед проведением моделирования был выполнен тест на наличие линейного тренда непосредственно в исходных вариациях озона y_i по всем выбранным слоям и кварталам года. Значимых значений тренда обнаружено не было.

Для выбора оптимального числа и типа предикторов моделирование проводилось в два этапа с последовательным уменьшением числа предикторов. На первом этапе использовались все шесть рассмотренных выше предикторов ВА, СА, ПСО, КДК, ЭНЮК, АО. По результатам проведенных испытаний для каждого варианта (квартал, слой) были отобраны три предиктора с максимальным уровнем значимости, и на следующем этапе проводилось моделирование только с этими предикторами.

Результаты для всех вариантов моделирования (три слоя для четырех кварталов) суммированы в табл. 2. В крайней левой колонке показаны номера кварталов. Для каждого квартала и слоя в колонках 1–4 представлены следующие величины: 1 — коэффициент детерминации R^2 , 2 — типы использованных предикторов (прямым шрифтом показаны предикторы, для которых получены коэффициенты x_i , значимые на уровне не более 0.05, курсивом — остальные предикторы), 3 — знак коэффициента x_i для значимого предиктора, 4 — относительная (по отношению к экспериментальному

Таблица 2. Результаты поквартального моделирования вариаций озона на разных высотах

№	13–18 км				18–23 км				23–30 км			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
I					0.85	КДК СА ЭНЮК	— — —	1.7 1.7 1.5	0.85	КДК ВА СА	—	4.9
II	0.53	ПСО АО СА	—	2.0	0.62	КДК АО ЭНЮК	— — —	2.2 1.5 1.6	0.76	КДК СА АО	— +	1.8 1.7
III	0.79	ВА АО ЭНЮК	— — —	5.4 2.9 5.3	0.74	ВА АО КДК	— —	1.0 1.9				
IV	0.72	ВА ПСО КДК	— — +	1.2 9.7 7.4	0.76	ВА ПСО КДК	— — +	3.6 2.7 2.1	0.51	АО СА ЭНЮК	+	2.8

среднему ИСО в данном квартале) величина СКВ для данного предиктора в %. В двух вариантах моделирования значимых результатов получено не было.

Как видно из табл. 2 в большинстве случаев получены коэффициенты детерминации на уровне не менее 0.7, что говорит об удовлетворительном соответствии модели экспериментальным данным. Пониженные значения коэффициентов наблюдаются во II квартале в слоях 13–18 и 18–23 км. Сопоставление с сезонным ходом показывает, что в этих случаях происходит резкое изменение концентрации озона, что может вносить дополнительные неопределенности в среднеквартальные значения и сказывается на результатах моделирования. Величины СКВ озона, связанные с отдельными предикторами, составляют несколько процентов от ИСО для соответствующего слоя. Относительная погрешность оценок СКВ составляет $\sim(30\text{--}50)\%$.

Число выявленных значимых предикторов (табл. 2) в зависимости от квартала и слоя меняется от одного до трех. Для случаев с одним значимым предиктором проверено наличие линейной корреляционной связи между вариациями озона и данным предиктором $y_j = x_i P_{ji} + \varepsilon_j$. В результате получены значения коэффициента линейной корреляции $r = -0.84, -0.62, 0.53$ и коэффициентов детерминации $R^2 = 0.7, 0.4, 0.3$ для вариантов (КДК, 23–30 км, I квартал), (ПСО, 13–18 км, II квартал) и (КДК, 23–30 км, IV квартал). В первых двух вариантах уровень линейной корреляции можно считать достаточно высоким.

На рис. 3а–3г приведены примеры временного хода межгодовых вариаций озона (жирные линии) для отдельных кварталов и слоев вместе с результатами моделирования с тремя предикторами

(тонкие непрерывные линии). Для сравнения на рис. 3а и 3в представлен также результат линейной корреляционной связи (штриховые линии) с единственным выделенным предиктором КДК и ПСО. Как видно из рис. 3, проведенное моделирование достаточно хорошо представляют межгодовые вариации озона. В случаях 3а и 3в единственные предикторы КДК и ПСО дают адекватное воспроизведение вариаций на качественном уровне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставим полученные результаты с известными литературными данными и рассмотрим возможные физические причины наблюдаемых корреляций. Как показывает табл. 2, значимая отрицательная корреляция с КДК (увеличение озона в восточной фазе) проявляется в I и II кварталах в слоях 18–23 и 23–30 км. Для слоя 23–30 это наглядно демонстрирует рис. 3а, на котором для каждого года обозначена фаза КДК. Из рис. 3а видно, что максимумы озона в слое 23–30 км всегда наблюдаются в восточной фазе КДК, несмотря на сбой фазы КДК в сезоне 2015–2016 гг. [Osprey et al., 2016], после которого западная фаза затянулась на два года (2016 и 2017 гг.). По литературным данным увеличение концентрации озона в средних широтах, также происходит в восточной фазе КДК [Sitnov, 2004], преимущественно в начале года [Randel, Wu, 2007; Ball et al., 2019]. Антикорреляция вариаций озона на высотах 18–30 км с КДК экваториального ветра на уровне 30–40 гПа была выявлена по данным длительных измерений с помощью озонзондов в средних широтах Северной Америки и Западной Европы [Груздев и Безверхний, 2005; Груздев и Безверхний, 2006].

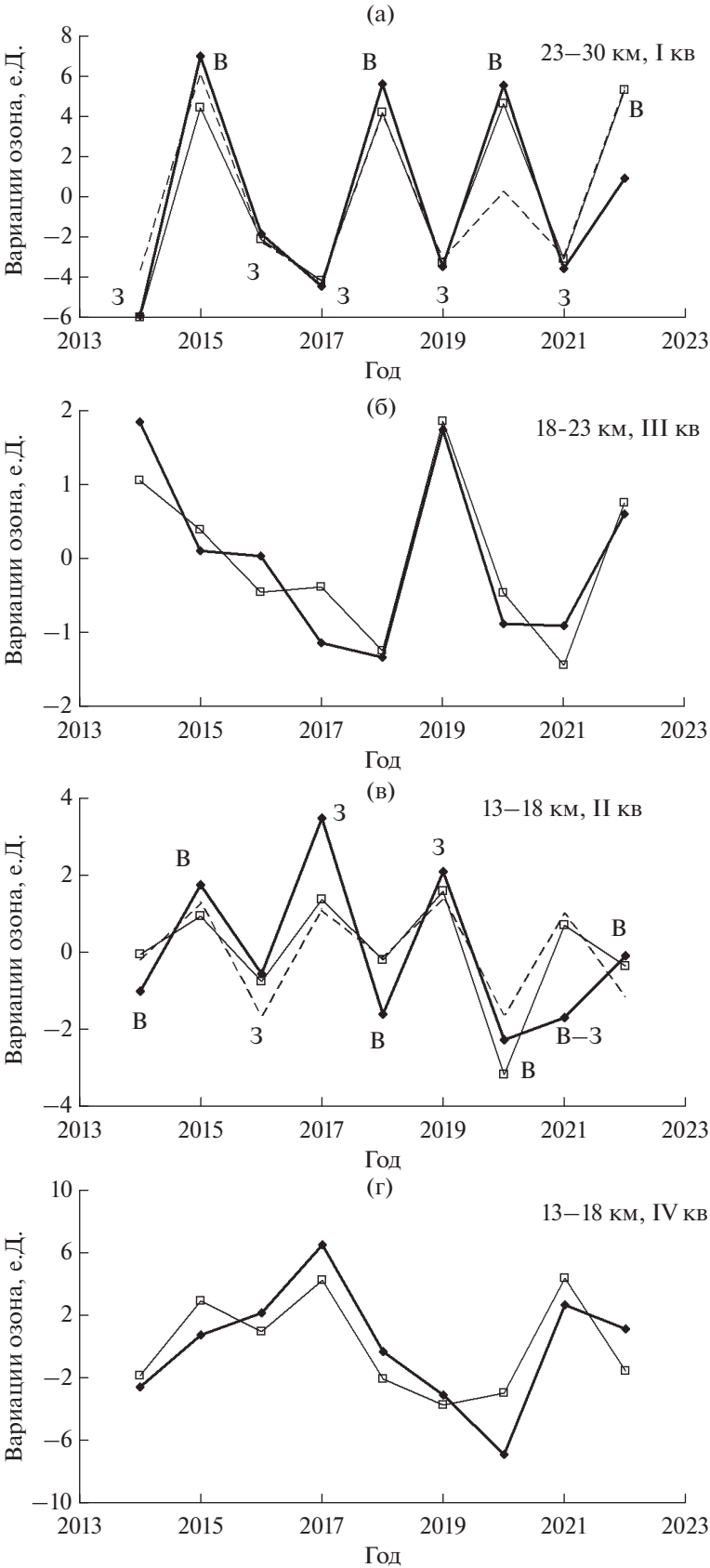


Рис. 3. Межгодовые вариации среднесезонных значений ИСО – жирные линии, результаты моделирования с тремя предикторами – тонкие сплошные линии, моделирование в рамках линейной корреляционной связи с предикторами КДК (а) и ПСО (в) – штриховые линии.

Положительная корреляция с КДК отмечается в IV квартале (табл. 2) в период сезонного роста концентрации озона в слоях 13–18 и 18–23 км. По-видимому, в этот период становится существенным перенос озона из тропиков в результате вихревого обмена, который усиливается при ослаблении субтропического барьера в западной фазе КДК и росте активности планетарных волн в конце года. Роль вихревого перемешивания в переносе озона из тропиков в средние широты отмечалась ранее в [Benito-Barca et al., 2022] по данным химико-климатического моделирования. Увеличение концентрации озона в западной фазе КДК на высотах 10–15 км наблюдалось на отдельных среднеширотных станциях зондирования озона [Sitnov, 2004].

Антикорреляция с индексом ЭНЮК (увеличение озона в период Ла-Нинья) отмечается в слоях 18–23 и 13–18 км (табл. 2). Проведенная проверка показала, что максимальная величина антикорреляции наблюдается при нулевом лаге относительно индекса ЭНЮК. Сопоставим полученные результаты с известными данными. Влияние ЭНЮК на вариации концентрации озона (с положительным знаком корреляции) наблюдалось на высотах 17–36 км по данным озонозондовых измерений в 1966–1999 гг. в Западной Европе [Груздев и Безверхний, 2006]. При этом вариации озона рассматривались с лагом от 2 до 8.5 месяцев относительно ЭНЮК для разных пунктов наблюдения. В [Benito-Barca et al., 2022] представлены данные численного моделирования полей озона с помощью модели WACCM, которые показали достаточно сложную картину географического распределения амплитуды и фазы влияния ЭНЮК на высотном уровне 70 гПа. В частности, для пункта Обнинск получено увеличение концентрации озона в период Эль-Ниньо. Приведенные примеры, касающиеся фазы влияния ЭНЮК на вариации озона, находятся в противоречии с результатами данной работы. Возможной причиной является сложный характер динамических процессов, которые проявляются, в конечном счете, как влияние ЭНЮК на концентрацию озона в средних широтах. В [Benito-Barca et al., 2022] отмечалось, что устойчивые статистические связи ЭНЮК с динамическими процессами в стратосфере и концентрацией озона получаются лишь при исключении влияния КДК, а в [Iza et al., 2016] – при исключении лет с внезапными стратосферными потеплениями. На неоднозначность влияния ЭНЮК на полярный стратосферный вихрь, от стабильности которого также зависят вариации озона, обращалось внимание в [Цветкова и др., 2021]. С учетом этих замечаний весьма вероятно, что вид корреляции озона с индексом ЭНЮК зависит от выбора временного интервала и его длительности, что и может быть основной причиной рассмотренных выше расхождений.

Корреляция озона с СА наблюдается в первой половине года в слоях 18–23 и 23–30 км. При этом в I квартале (слой 18–23 км) знак корреляции отрицателен, а во II квартале (слой 23–30 км) – положителен (табл. 2). Смена знаков, по-видимому, связана с тем, что влияние СА на озон имеет как фотохимическую, так и динамическую составляющие. В большей части средней атмосферы концентрация озона на масштабах солнечного цикла меняется в фазе с СА в соответствии с фотохимическим воздействием солнечного излучения. [Груздев, 2014а]. В данных наблюдениях положительная корреляция вариаций озона с СА наблюдается во II квартале в слое 23–30 км (табл. 2), что соответствует также результатам спутниковых измерений [Груздев, 2014б]. В зимний период влияние фотохимической составляющей ослабляется (данные численного моделирования для января на широте 55° с.ш. [Кривоуцкий и др., 2015]). На первый план выходит влияние динамической составляющей, что и проявляется в данных наблюдениях (I квартал, слой 18–23 км).

Во II квартале (18–23 км) и в III квартале (интервал высот 13–23 км) наблюдается значимая связь с АО (табл. 2). Причина этого явления заключается в том, что в условиях уменьшения меридионального переноса озона (особенно в III квартале года) заметное влияние на вариации озона начинают оказывать вертикальные движения в стратосфере [Eriksson, Chen, 2002; Коршунов, Зубачев, 2018]. Последние, в свою очередь, обусловлены синоптическими процессами в тропосфере [Нерушев, 2003].

Значимая антикорреляция с предиктором ВА (табл. 2) проявляется в интервале высот 13–23 км во второй половине года. Это связано с увеличением содержания аэрозоля над г. Обнинск летом и в начале осени [Коршунов, 2022]. Отрицательная корреляция с задержанным влиянием вулканических эмиссий означает деструкцию озона, связанную с сернокислотным аэрозолем. Кроме того, определенный вклад может вносить и разрушение озона в аэрозоле природных пожаров. В частности, такой эффект наблюдался в области аэрозольного следа Австралийских природных пожаров [Khaykin, 2020]. Механизмы разрушения озона с участием гетерогенных реакций на аэрозоле достаточно сложны – в зависимости от содержания озоноразрушающих компонент, а также их предшественников, может происходить как увеличение, так и уменьшение концентрации озона [Solomon et al., 2022]. Согласно [Naik et al., 2017] в современной атмосфере в среднем происходит увеличение озона в средней стратосфере и его уменьшение в нижней стратосфере, при этом суммарный эффект заключается в уменьшении общего содержания озона. В целом результаты данной работы соответствуют имеющимся пред-

ставлениям о влиянии аэрозоля на содержание озона.

Значимое влияние ПСО в первой половине года ограничено слоем 13–18 км (табл. 2). Этот эффект может быть объяснен следующим образом. Разрушение озона с участием ПСО происходит в зимне-весеннее время в приполярной области, затем воздушные массы с пониженным содержанием озона переносятся в средние широты. Выше было отмечено, что в слое 13–18 км основная масса озона поступает при северном меридиональном переносе. Поэтому слой 13–18 км наиболее чувствителен к разрушению озона с участием ПСО. Как следует из рис. 3в, вариации озона тесным образом связаны именно с вариациями ПСО (штриховые линии), а не с фазой КДК.

Как видно из табл. 2, в IV квартале наблюдается задержанное влияние ПСО. На качественном уровне это подтверждается сходством в чередовании минимумов и максимумов на рис. 3г и 3в (за исключением минимума 2019 г. на рис. 3г). Полученный результат можно считать частным случаем проявления статистически значимой корреляции весенних и осенних аномалий озона [Fioletov and Shepherd, 2003]. Накопление озона в приполярной зоне и его перераспределение по всему Северному полушарию происходит в зимне-весенний период в активной фазе циркуляции Б-Д. В летнее и осеннее время этот процесс ослабевает, и в нижней стратосфере происходит постепенное фотохимическое разрушение озона. При этом весенние аномалии озона сохраняются до поздней осени [Fioletov and Shepherd, 2003].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование вариаций озона в 2014–2022 гг. над г. Обнинск (55.1° с.ш., 36.6° в.д.), расположенным в центральной части ЕТР. С использованием данных лидарных и спутниковых измерений рассмотрены вариации озона в трех высотных слоях 13–18, 18–23 и 23–30 км. В нижней стратосфере от 13 до 23 км максимум содержания озона отмечается в зимне-весеннее время, в то время как в вышележащем слое 23–30 км — в летнее. Проведен статистический регрессионный анализ отклонений содержания озона от сезонного хода. Выявлено, что влияние различных факторов на вариации озона меняется в зависимости от времени года и высоты слоя. В I–II кварталах в интервале высот 18–30 км концентрация озона увеличивается в восточной фазе КДК. Во II квартале в слое 13–18 км заметное влияние на вариации озона оказывает разрушение озона в области ПСО в зимне-весенний период с последующим переносом обедненного озона воздухом в точку наблюдения. Задержанное во времени влияние ПСО обнаруживается в IV квартале в слоях

13–18 и 18–23 км. В III квартале обнаружена связь вариаций озона с индексом АО. Это показывает, что в это время года становится заметным влияние вертикальных движений в стратосфере, связанное с синоптическими процессами. Отрицательное воздействие аэрозоля на озон проявляется в III и IV кварталах, когда содержание аэрозоля в нижней стратосфере увеличивается.

Полученные в работе результаты в основном согласуются с имеющимися представлениями о динамических и микрофизических механизмах, определяющих содержание озона в стратосфере средних широт. Показано, что воздействие отдельных факторов проявляется по-разному в зависимости от высоты и времени года. На вариации озона в равной мере влияют как динамические (КДК, ЭНЮК, АО), так и микрофизические факторы (ПСО, ВА). В отдельных случаях выделяется один доминирующий фактор, который в качественном отношении определяет вариации озона в данном высотном диапазоне и квартале года.

Представленные результаты могут быть полезны при обработке данных спутниковых измерений, построении фотохимических моделей атмосферы и прогнозировании возможных изменений содержания озона в условиях меняющегося климата.

Работа выполнена при поддержке Росгидромета — тема 2.9 “Развитие технологии системы мониторинга озона, водяного пара и аэрозоля в средней атмосфере над территорией РФ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Груздев А.Н., Безверхний В.А. Квазидвухлетняя цикличность в атмосфере над Северной Америкой по данным озонзондов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 36–50.
- Груздев А.Н., Безверхний В.А. Квазидвухлетние вариации озона и метеопараметров над Западной Европой по данным озонного зондирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 224–336.
- Груздев А.Н. Оценка эффектов извержения вулкана Пинатубо в стратосферном содержании O_3 и NO_2 с учетом вариаций уровня солнечной активности // Оптика атмосферы и океана. 2014а. Т. 27. № 06. С. 506–514.
- Груздев А.Н. Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014б. Т. 54. № 5. С. 678–684.
- Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 2–10.

- Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Сумерова К.А. Аномалии атмосферного озона в феврале-марте 2018 г. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 36–47.
- Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Кориунов В.А., Сахибгареев Д.Г. Сетевой лидар АК-3 для зондирования средней атмосферы: устройство, методы измерений, результаты // Труды ГГО. 2020. Вып. 598. С. 155–187.
- Кориунов В.А., Зубачев Д.С. Временные вариации высотного распределения стратосферного озона по данным лидарного зондирования над г. Обнинск // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 48–60.
- Кориунов В.А. Лидарные наблюдения стратосферного аэрозоля в г. Обнинск с 2012 по 2021 гг.: влияние вулканических извержений и природных пожаров // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 3. С. 31–51.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-3-31-51>
- Кривоуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.А. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 1. С. 64–93.
- Нерушев А.Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. СПб.: Гидрометеоздат, 2003 г. 223 с.
- Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Иванова Н.С., Лукьянов А.Н., Кузнецова И.И. Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 12–19.
- Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир. 1967. 242 с.
- Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хатматов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.
- Arctic oscillation* https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml.
- Aura MLS* <https://mls.jpl.nasa.gov/eos-aura-mls>.
- Ball W.T., Alsing J., Staehelin J., Davis S.M., Froidevaux L., Peter Th. Stratospheric ozone trends for 1985–2018: sensitivity to recent large variability // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 12731–12748.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-12731-2019>
- Benito-Barca S., Calvo N., Abalos M. Driving mechanisms for the El Niño–Southern Oscillation impact on stratospheric ozone // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 15729–15745.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-15729-2022>
- Brühl C., Lelieveld J., Tost H., Höpfner M., Glatthor N. Stratospheric sulfur and its implications for radiative forcing simulated by the chemistry climate model EMAC // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. V. 120. P. 2103–2118.
<https://doi.org/10.1002/2014JD022430>
- Eriksson P., Chen D. Statistical parameters derived from ozonesonde data of importance for passive remote sensing observations of ozone // Int. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. № 22. P. 4945–4963.
- Fioletov V.E., Shepherd T.G. Seasonal persistence of midlatitude total ozone anomalies // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30(7). P. 1417.
<https://doi.org/10.1029/2002GL016739>
- Iza M., Calvo N., Manzini E. The stratospheric pathway of La Niña // J. Climate. 2016. V. 29. P. 8899–8914.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0230.1>
- Khaykin S., Legras B., Bucci S., Sellitto P., Isaksen I., Tencé F., Bekki S., Bourassa A., Rieger L., Zawada D., Jumelet J., Godin-Beekmann S. The 2019/20 Australian wildfires generated a persistent smoke-charged vortex rising up to 35 km altitude // Communications earth & environment. 2020. V. 1:22.
<https://doi.org/10.1038/s43247-020-00022-5>
- MEI. V2 <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>.
- Naik V., Horowitz L.W., Schwarzkopf M.D., Lin M. Impact of volcanic aerosols on stratospheric ozone recovery // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122. P. 9515–9528.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025808>
- Ozone hole size <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml>
- Osprey S.M., Butchart N., Knight J.R., Scaife A.A., Hamilton K., Anstey J.A., Schenzinger V., Zhang C. An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation // Science. 2016. V. 353. I. 6306. P. 1424–1427.
- QBO data <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/qbo.data>.
- Randel W.J., Wu F. A stratospheric ozone profile data set for 1979–2005: Variability, trends, and comparisons with column ozone data // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D06313,
<https://doi.org/10.1029/2006JD007339>
- Schallock J., Brühl C., Bingen C., Höpfner M., Rieger L., Lelieveld J. Radiative forcing by volcanic eruptions since 1990, calculated with a chemistry-climate model and a new emission inventory based on vertically resolved satellite measurements // Atmos. Chemistry and Physics. Discussions. 2021.
<https://doi.org/10.5194/acp-2021-654>
- Semeniuk K., McConnell J.C., Jin J.J., Jarosz J.R., Boone C.D., Bernath P.F. N₂O production by high energy auroral electron precipitation // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. D16302,
<https://doi.org/10.1029/2007JD009690>
- Sitnov S.A. QBO effects manifesting in ozone, temperature, and wind profiles // Annales Geophysicae. 2004. V. 22. P. 1–18.
- Solar radio flux <https://spaceweather.gc.ca/forecast-previous/solar-solaire/solarflux/sx-5-en.php>.
- Solomon S., Dube K., Stone K., Yu P., Kinnison D., Toon O.B., Strahan S.E., Rosenlof K.H., Portmann R., Davis S., Randel W., Bernath P., Boone C., Bardeen C.G., Bourassa A., Zawada D., Degenstein D. On the stratospheric chemistry of midlatitude wildfire smoke // PNAS. 2022. V. 119. № 10 e2117325119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2117325119>
- SO₂ emissions <https://so2.gsfc.nasa.gov/measures.html>.

Stratospheric Ozone Variations Over Obninsk from Data of Lidar and Satellite Measurements

V. A. Korshunov*

Typhoon Research and Production Association, st. Pobedi, 4, Obninsk, Kaluga oblast, 249038 Russia

**e-mail: korshunov@rpatyphoon.ru*

Analysis of variations of stratospheric ozone content at 13–18, 18–23 and 23–30 km layers is presented from data of lidar and satellite measurements in 2014–2022 over Obninsk city (55.1° N, 36.6° E). Modeling of deviations from seasonal run for separate quarters of year are fulfilled by using of linear regression method. Impact factors under consideration are quasi-biennial oscillation of zonal wind in tropical stratosphere (QBO), Arctic oscillation (AO), El-Nino – Southern oscillation (ENSO), solar activity (SA), volcanic aerosol (VA) and polar stratospheric clouds (PSC). Enhancement of ozone content is observed in eastern QBO phase at 18–30 km layer (I–II quarter) and in western QBO phase at 13–23 km layer (IV quarter). At separate layers it is revealed significant impacts of AO (II–III quarters), SA (I–II quarters) and VA (III–IV). During a year influence of PSC is originally showed in II quarter at 13–18 layer and then in IV quarter at 13–18 layer. Possible physical mechanisms are discussed which are the basis of the correlation relations observed.

Keywords: stratospheric ozone, lidar measurements of ozone, ozone variations, multiple linear regression method