Тренды и вариации общего содержания озона над Северным Кавказом по данным спутниковых измерений

Савиных В. В., Репина И. А.

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

XXIV Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

9 – 13 ноября 2026 года, Москва

amita@ifaran.ru, repina@ifaran.ru

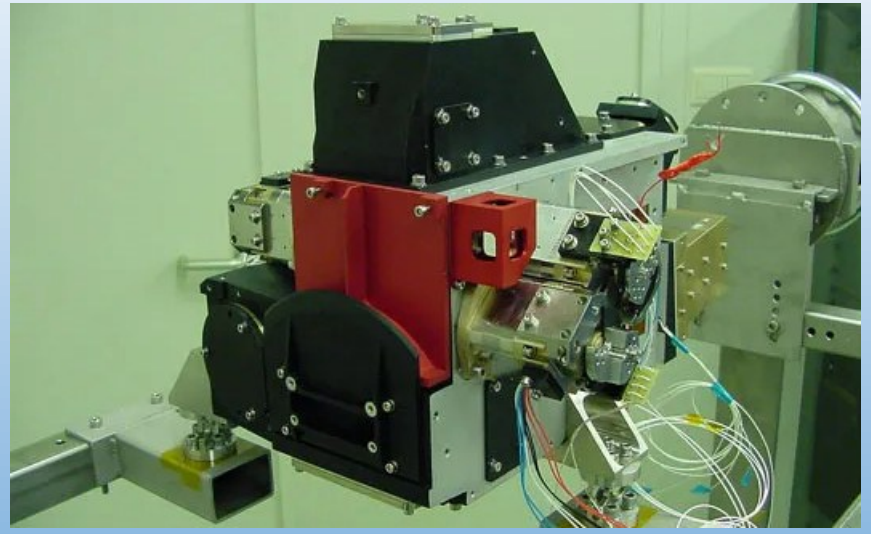
Введение



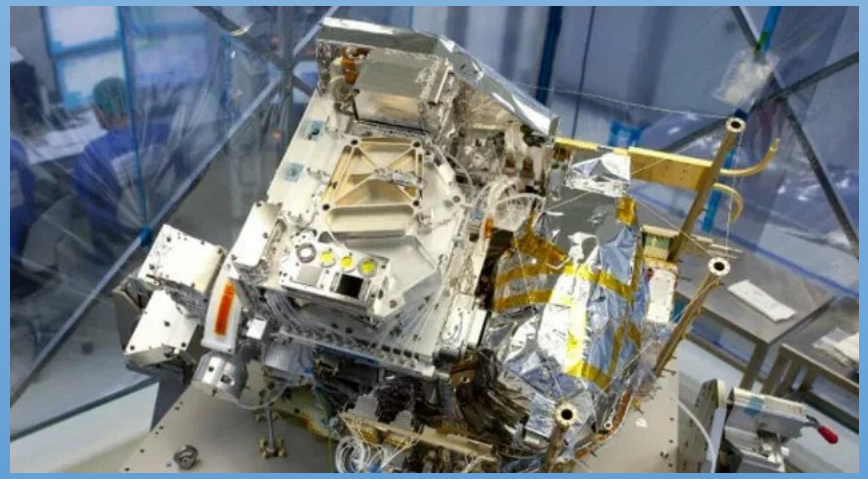
Озоновый слой Земли

- Озон (O_3) в атмосфере определяет уровень биологически активной ультрафиолетовой (УФ) радиации на земной поверхности.
- Изменение содержания O_3 оказывает влияние на климат Земли (IPCC, 2014).
- На содержание O_3 влияют глобальная циркуляция, солнечная активность и вулканические выбросы (Savinykh et al., 2021).
- Глобальный мониторинг O_3 ведётся с помощью спутниковых приборов и сети станций ГСА (UNEP, 2018).

Сеть и приборы



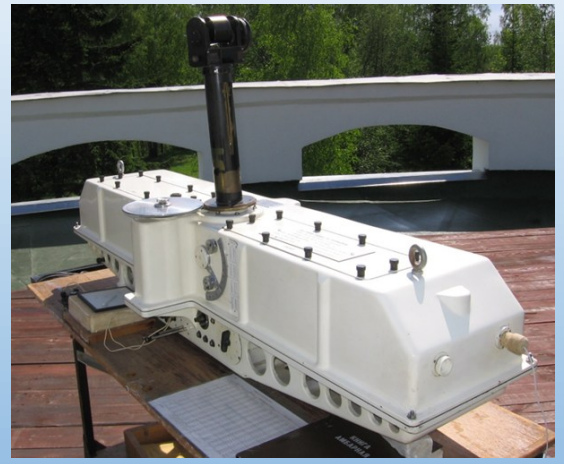
Прибор Aura OMI (NASA)



Прибор S5P TROPOMI (ESA)

- Общего содержания (ОС) O_3 на борту спутников измеряется по отраженному УФ, инфракрасному и видимому излучению.
- Спектрометр OMI измеряет O_3 на борту спутника NASA Aura (2004).
- Гиперспектральный прибор TROPOMI проводит измерения O_3 на спутнике ESA S5P (2017).
- Прибор «Озонометр-ТМ» – на спутниках «Ионосфера-М» №3 и №4 (2025).

Сеть и приборы



Dobson #108 (ГГО)



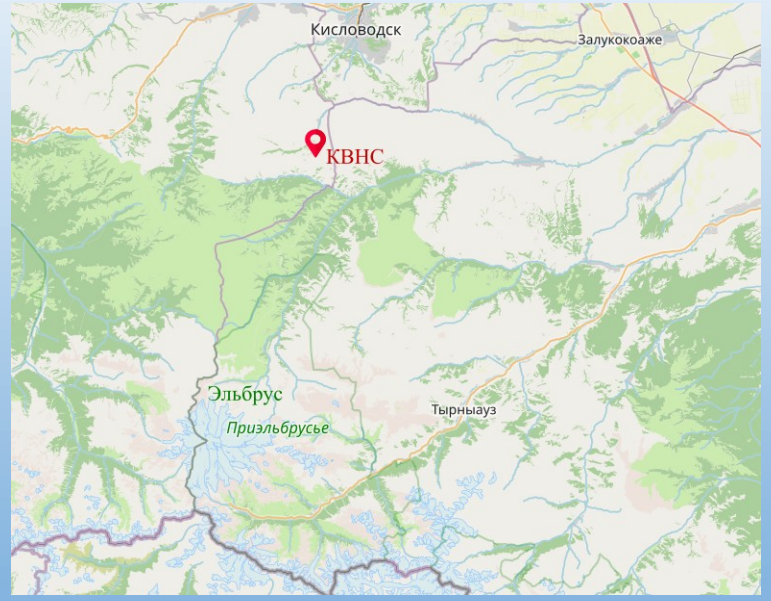
Brewer #043 (ИФА)



Карта с/ф Брюэра

- Сеть ГСА оснащена спектрофотометрами (с/ф) Добсона, Брюэра и фильтровыми приборами.
- Для определения ОС O_3 с/ф Добсона измеряет УФ излучение на парах длин волн с сильным и слабым поглощением O_3.
- С/ф Брюэра измеряет спектральный состав прямой и рассеянной УФ радиации; ОС O_3 определяется методом дифференциального поглощения.

Пункт измерений



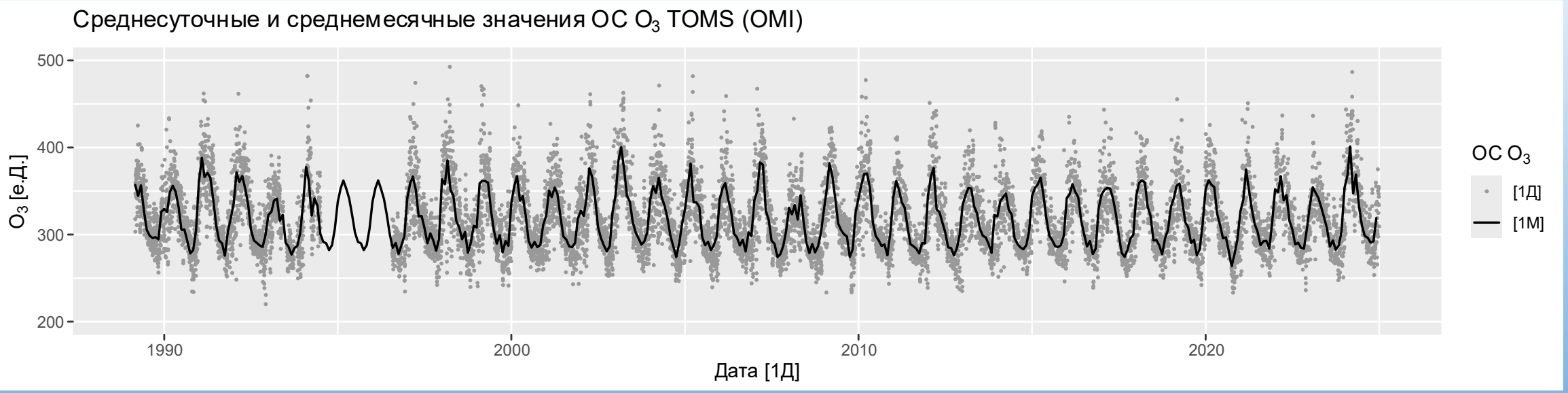
ВНС ИФА РАН



Вид с ВНС на в. Эльбрус

- Кисловодская высокогорная научная станция (ВНС ИФА) создана в 1978 году для измерения малых газовых примесей и аэрозолей.
- Измерения ОС O_3 на с/ф Брюэра ведутся с 1989 года, разрешение прибора – 0.6 нм, точность по прямой солнечной радиации – 1%.
- ОС O_3 определяется из измерений солнечной радиации в течение всего дня при зенитных углах Солнца < 75°.
- Высокая изменчивость O_3 на ВНС связана с близостью субтропической высотной фронтальной зоны (СВФЗ).

Данные измерений



Среднесуточные (серые точки) и среднемесячные (чёрная кривая) значения ОС O_3 TOMS (OMI)

- Для анализа использованы спутниковые данные O_3 за 1989–2024 годы, предоставляемые NASA для местоположения ВНС как участнику валидации приборов TOMS и OMI.
- Данные получены со спутников: Nimbus-7 (TOMS) за период 02.03.89–04.05.93, Meteor-3 (TOMS) – 07.05.93–03.07.94, Earth Probe (TOMS) – 26.07.96–13.12.05 и Aura (OMI) – 14.12.05–31.12.24.
- Пропущенные данные заполнены средними за весь период значениями для конкретного дня года.

TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer, OMI – Ozone Monitoring Instrument.

Данные измерений

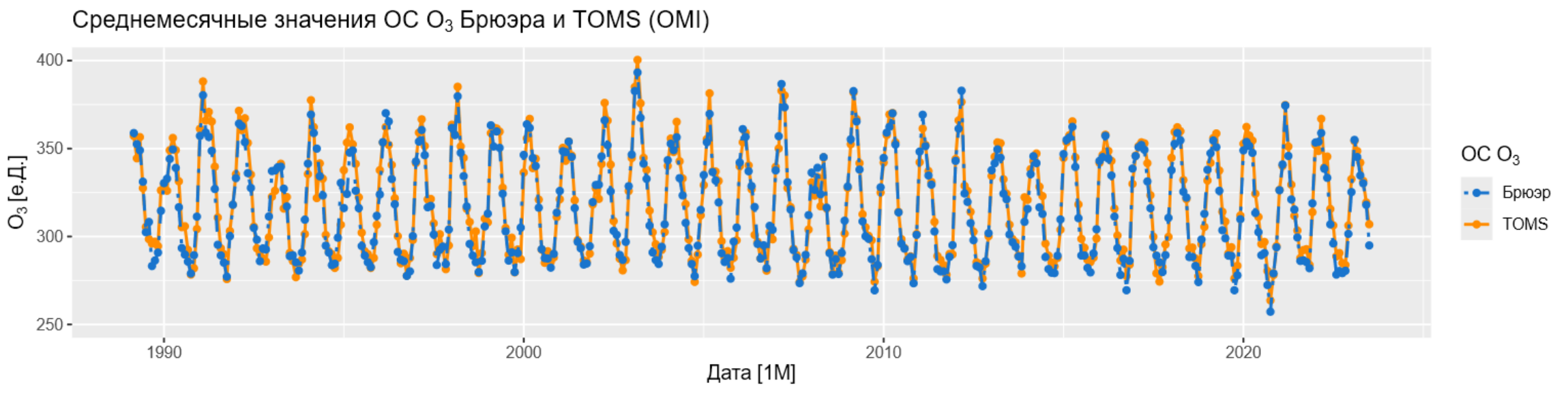
Статистические характеристики ОС O_3 (е.Д.) на КВНС по данным спутниковых измерений (1989–2024)

N	*Значение*						*Перцентиль, %*		
	Мин.	*Макс.*	*Среднее*	*Ст. От.*	*Медиана*	*Мода*	*25*	*75*	*95*
10626	220.1	492.6	318.9	38.6	312.2	298.8	290.1	343.2	390.5

N – количество измерений; ***Ст. От.*** (стандартное отклонение) – мера статистического разброса; ***Медиана*** – значение, которое находится в середине упорядоченного ряда; ***Мода*** – значение, которое встречается чаще всего; ***Перцентиль*** – значение, которое не превышается с фиксированной вероятностью.

- Среднее за период 1989–2024 годы суточное значение ОС O_3 – 318.9±77.2 е.Д. с распределением вероятностей, близким к нормальному.
- Высокие значения (max 492.6 е.Д.) связаны с приходом в регион арктических воздушных масс, а низкие (min 220.1 е.Д.) – тропических.

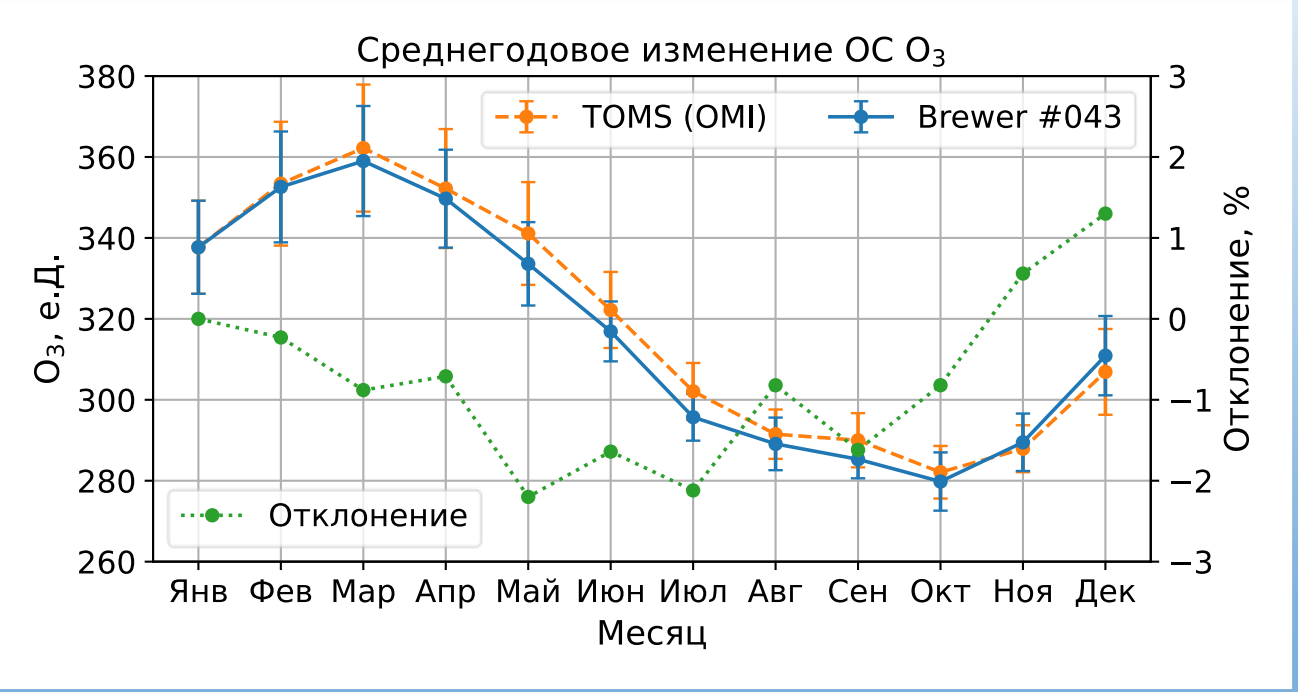
Данные измерений



Среднемесячные значения ОС O_3 Брюэра (синяя кривая) и спутника (оранжевая кривая) за 1989–2023 гг.

- Среднемесячные данные Брюэра и TOMS (OMI) показывают хорошее согласие и одинаковую долговременную изменчивость.
- На графике представлены спутниковые данные NASA приборов TOMS и OMI (алгоритм TOMS) с 1989 по 2023 год.

Данные измерений



Среднегодовой ход ОС O_3 за 1989–2023 гг. Брюэра (сплошная кривая) и спутника (штриховая кривая); отклонения (в %) Брюэра от спутника (пунктир).

- Средне сезонные вариации O_3 Брюэра и спутника также совпадают и повторяют сезонный ход ОС O_3 для средних широт Северного полушария.
- Максимальные значения ОС O_3 TOMS (OMI) (362.2±31.4 е.Д.) наблюдаются в марте, а минимальные (282.1±13.0 е.Д.) – в октябре; различие между Брюэром и спутником в пределах 2%.

Данные измерений

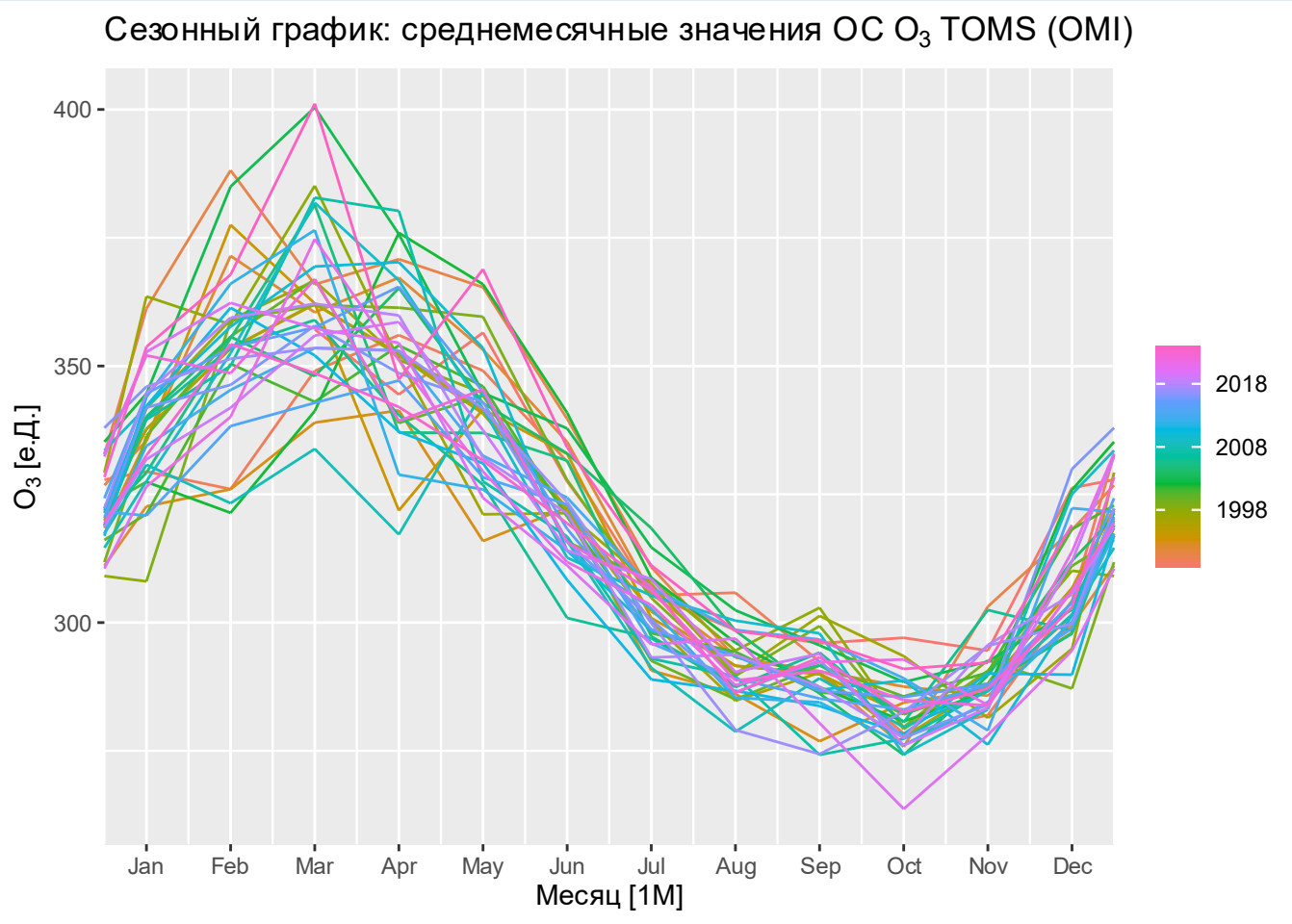
Среднемесячные значения ОС O_3 (1989–2023)

Месяц	*TOMS*	*Ст. От.*	*Брюэр*	*Ст. От.*	*Откл. (%)*
Янв	337.7	11.5	337.7	11.5	0.00
Фев	353.4	15.3	352.6	13.7	-0.23
Мар	362.2	15.7	359.0	13.6	-0.88
Апр	352.2	14.7	349.7	12.1	-0.71
Май	341.1	12.7	333.6	10.3	-2.20
Июн	322.2	9.4	316.9	7.4	-1.64
Июл	302.1	7.0	295.7	5.8	-2.12
Авг	291.5	6.1	289.1	6.5	-0.82
Сен	290.0	6.7	285.3	4.7	-1.62
Окт	282.1	6.5	279.8	7.2	-0.82
Ноя	287.9	5.8	289.5	7.1	0.56
Дек	306.9	10.6	310.9	9.8	1.30

Ст. От. – стандартное отклонение; *Откл.* – отклонение Брюэра от TOMS

- Заметно сходство стандартных отклонений среднемесячных значений TOMS и Брюэра, а сами отклонения имеют сезонный характер.
- С февраля по октябрь наземные значения ниже спутниковых, а с ноября по январь – выше.
- Возможная причина – неоднородность альбедо и его сезонные изменения.

Разведывательный анализ



Сезонный график среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI)

- Сезонный график отражает опорную сезонную закономерность ОС O_3, а также года, когда эта закономерность меняется.
- Вариации сезонной закономерности могут быть связаны с изменениями глобальной циркуляции и извержениями вулканов.

Разведывательный анализ

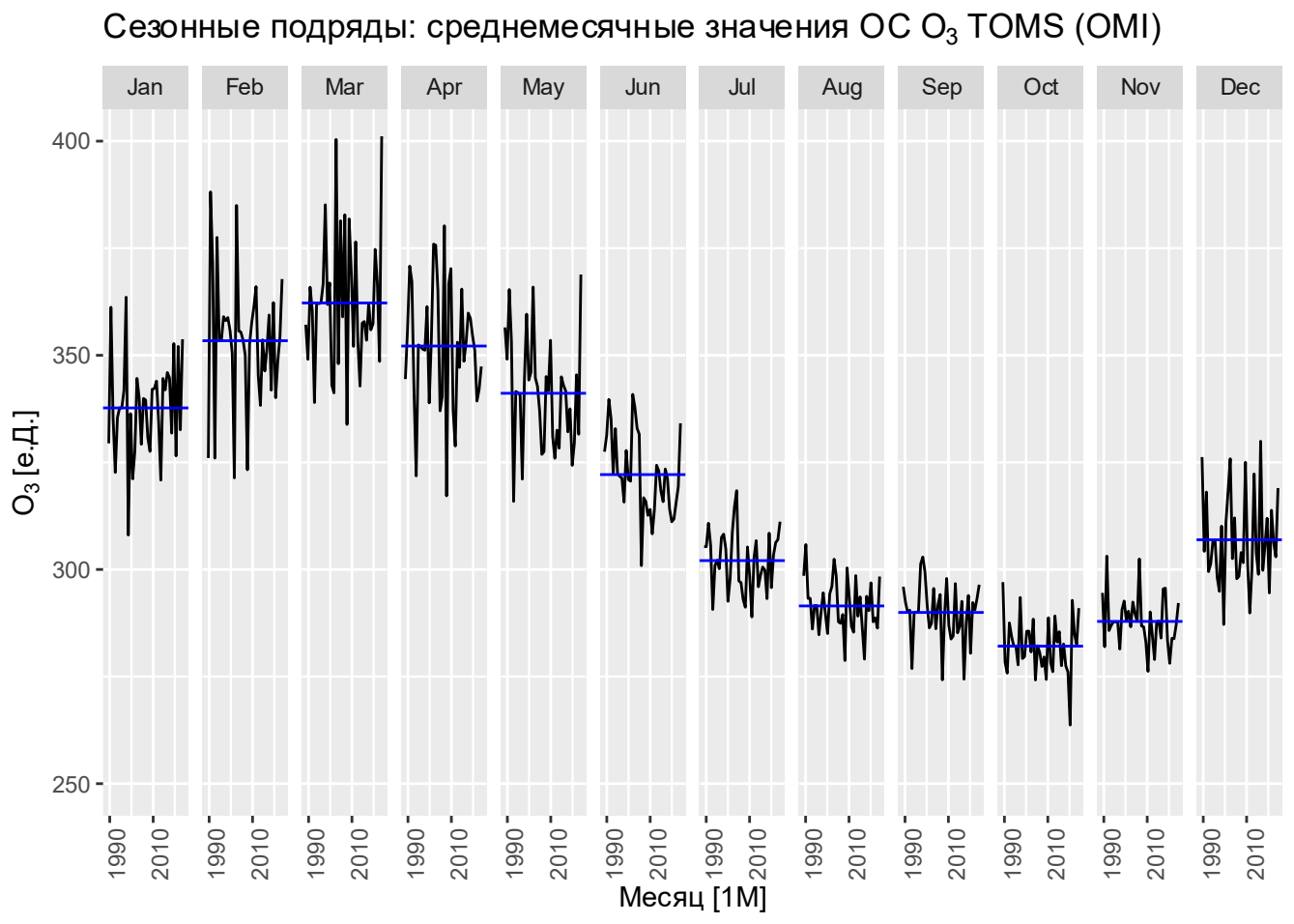
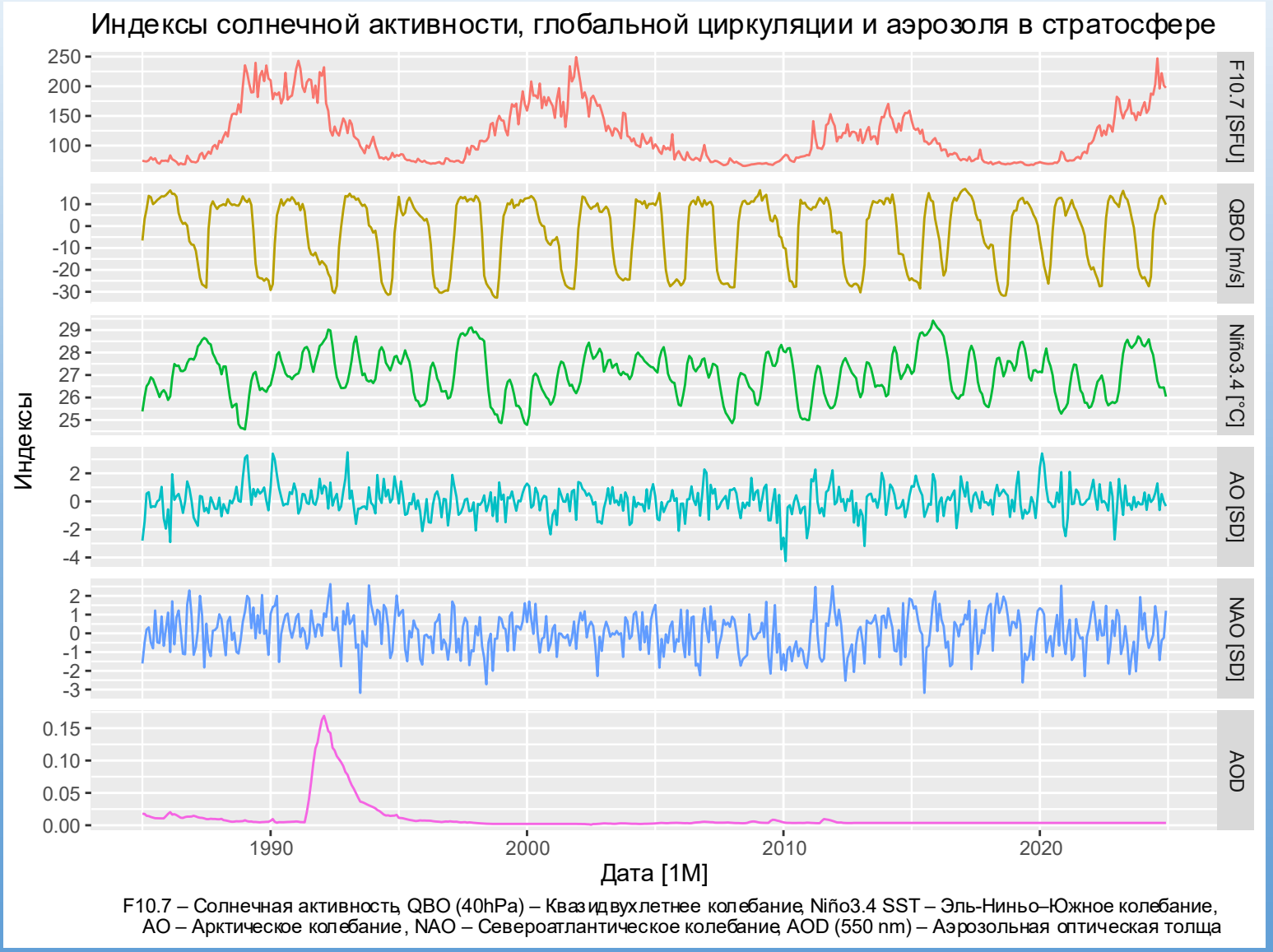


График сезонных подрядов среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI)

- График сезонных подрядов отражает изменчивость опорной сезонной закономерности ОС O_3 с течением времени.
- Синие линии – средние значения за каждый месяц.

Разведывательный анализ

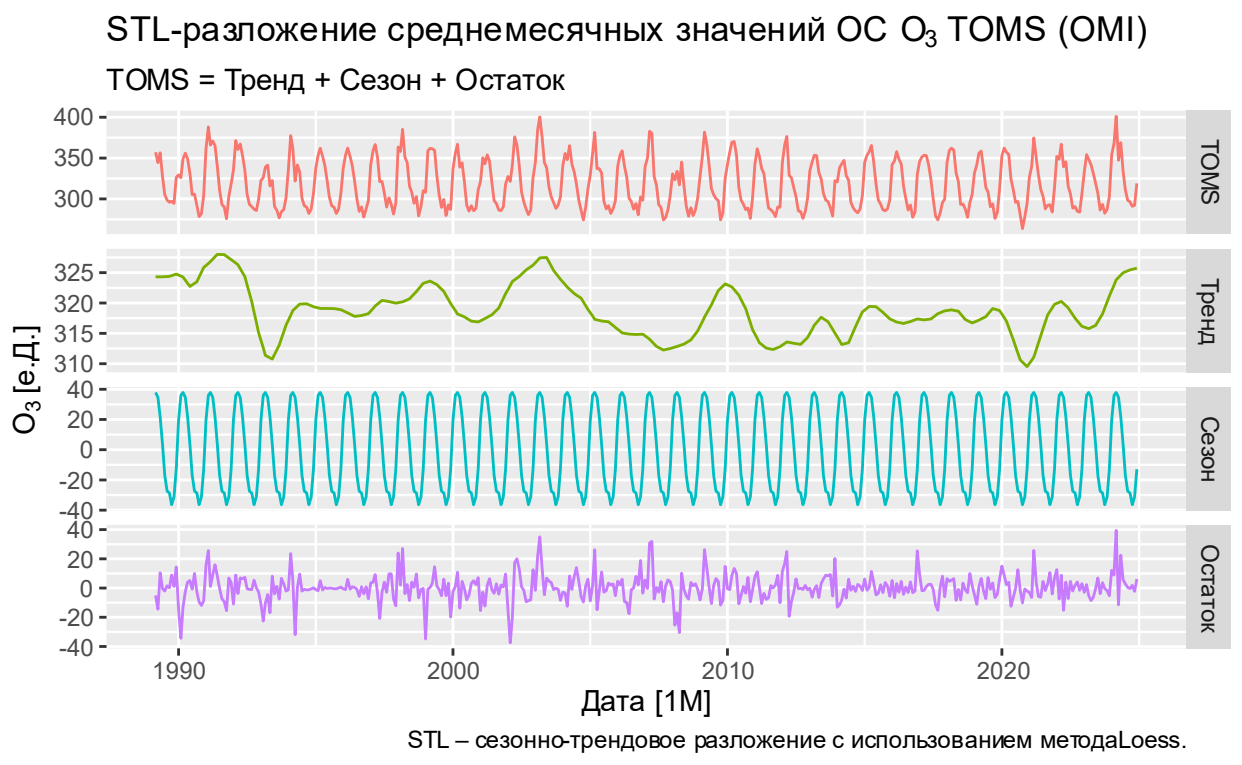


Индексы солнечной активности, глобальной циркуляции и аэрозоля

Различные фотохимические и циркуляционные факторы влияют на вариации ОС O_3:

- колебания УФ солнечного излучения в течение цикла солнечной активности;
- изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции под влиянием квазидвухлетней цикличности (*КДЦ*), Эль-Ниньо–Южного колебания (*ЭНЮК*), Арктического колебания (*АК*) и Североатлантического колебания (*САК*);
- повышение содержания аэрозолей в стратосфере после извержений вулканов (*АОТ*).

Разведывательный анализ



Сезонно-трендовое разложение среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI) по методу LOESS

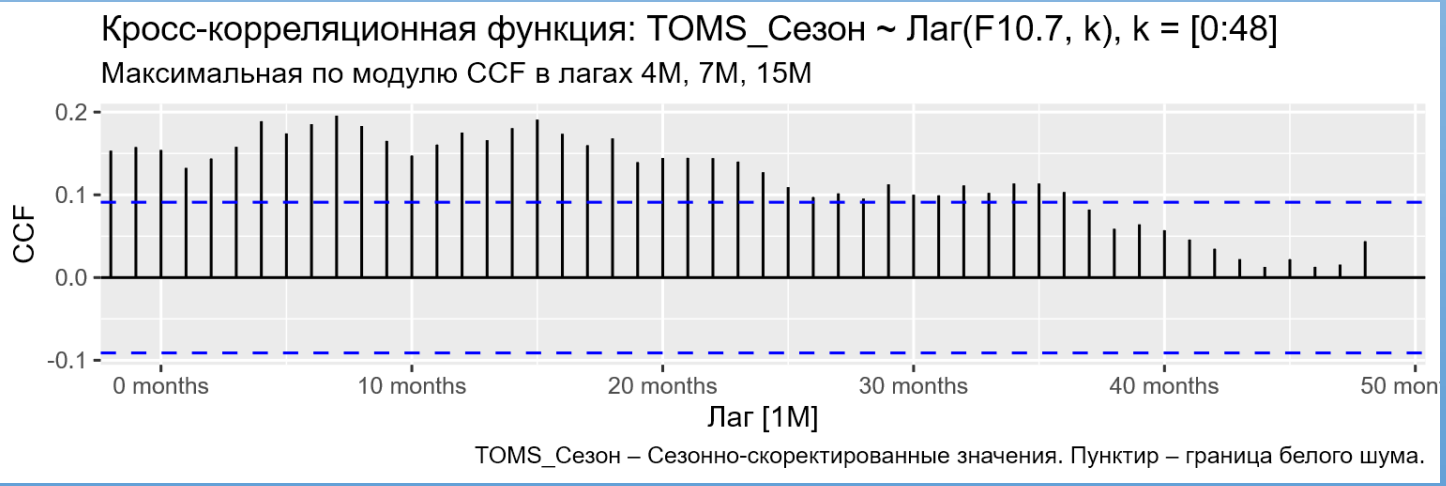
- Эти факторы действуют одновременно и часто в близких временных масштабах.
- Отклик ОС O_3 на воздействие этих факторов может отставать от самих этих воздействий.
- Задержки отклика (лаги) предварительно определяются кросс-корреляцией сезонно-скорректированных данных O_3, полученных из STL-разложения.
- Сезонно-скорректированные данные сохраняют компоненты тренда и остатка.
- До 2003 года на ВНС наблюдается тенденция к увеличения ОС O_3, а после 2003 года – к его уменьшению.

Loess *(LOcally Estimated Scatterplot Smoothing)* – непараметрический метод сглаживания данных.

Разведывательный анализ



Среднемесячные сезонно-скорректированные значения (синяя кривая) ОС O_3 TOMS (OMI)



Кросс-корреляция среднемесячных сезонно-скорректированных значений ОС O_3 TOMS (OMI) и индекса F10.7

- Влияние солнечной активности (*F*10.7) на O_3 прослеживается с лагом от 3 до 36 месяцев с пиками в 7 и 15 лагах;
- индекса *КДЦ* – от 3 до 22 месяцев с пиками в 4 и 19 лагах;
- индекса *Ниньо-3.4* – от 1 до 40 месяцев с пиками в 4 и 15 лагах;
- индекса *АК* – от 1 до 26 месяцев с пиками в 1 и 11 лагах;
- индекса *САК* – от 1 до 40 месяцев с пиками в 5 и 19 лагах;
- индекса *AOT* – от 5 до 25 месяцев с пиком в 14 лаге.

Метод анализа

Анализ временной изменчивости среднемесячных спутниковых данных ОС O_3 выполнен методом множественной линейной регрессии (в матричной формулировке):

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{X\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \text{ где}$$

$\boldsymbol{y} = (y_1, \ldots, y_T)'$ – вектор значений прогнозной переменной;
$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_T)'$ – случайные ошибки модели со средним значением 0 и дисперсией σ^2;
$\boldsymbol{\beta} = (\beta_0, \ldots, \beta_k)'$ – коэффициенты, измеряющие влияние каждого предсказателя;

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & x_{k,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & x_{k,T} \end{bmatrix}$$ – матрица предсказательных переменных имеет T строк и $k + 1$ столбцов,

где T – число наблюдений, k – число предсказателей и столбец "1" – интерцепт (пересечения).

Оценка коэффициентов β выполняется методом наименьших квадратов:

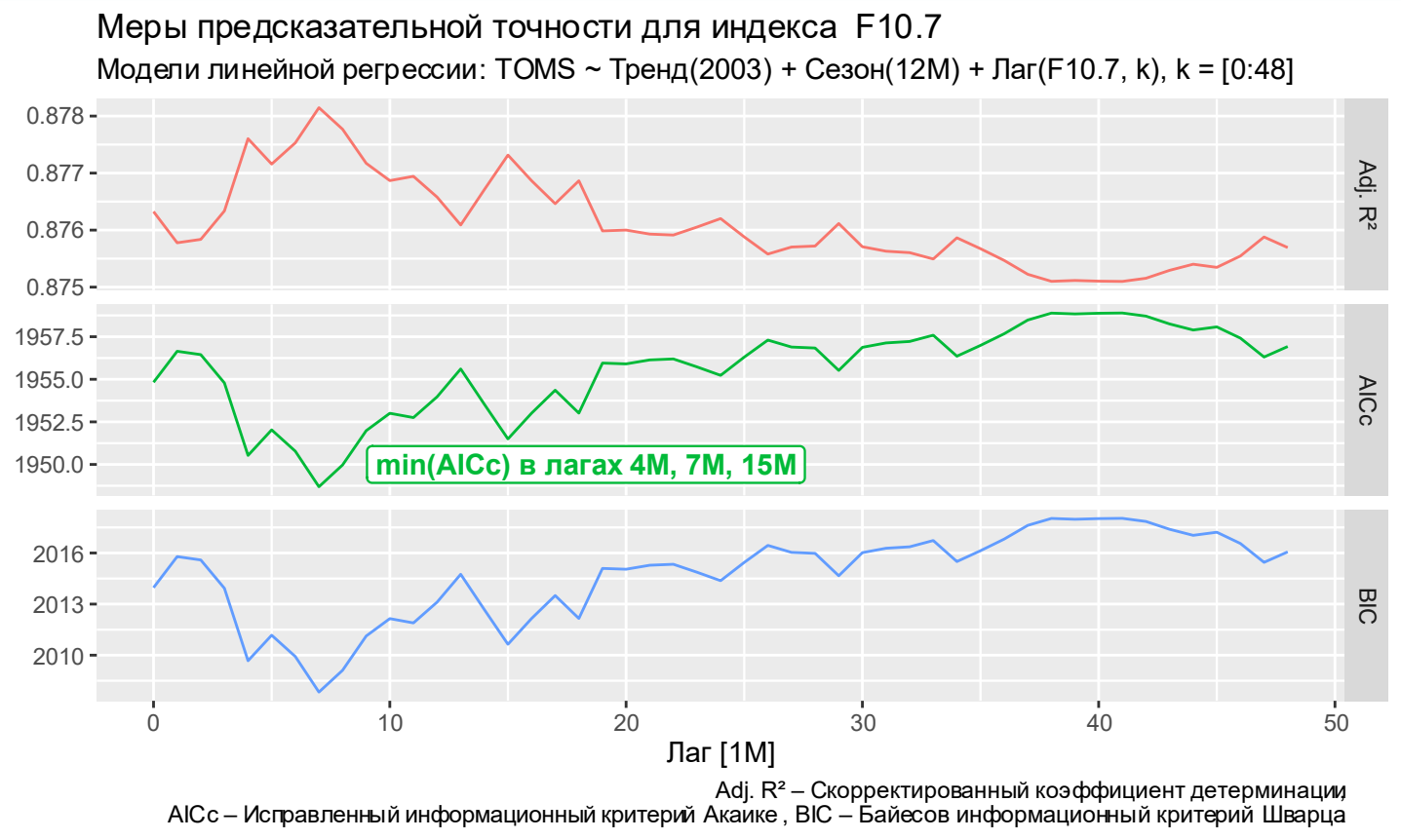
$$\widehat{\boldsymbol{\beta}} = (\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}'\mathbf{y}.$$

Метод анализа

Регрессионная модель включает следующие предсказательные переменные:

- функцию кусочно-линейного тренда с узлом в 2003 году;
- потоки радиоизлучения Солнца *F*10.7 (индекс солнечной активности);
- зональную скорость ветра на изобарической поверхности 40 гПа в экваториальной стратосфере (индекс квазидвухлетней цикличности);
- индекс *Ниньо-3.4* (средняя температура поверхности воды в 170°–120° з.д. экваториальной части Тихого океана) для учёта эффекта Эль-Ниньо–Южного колебания;
- индекс Арктического колебания;
- индекс Североатлантического колебания;
- оптическую толщу стратосферного аэрозоля для учёта влияния продуктов извержения в. Пинатубо.

Метод анализа



Меры предсказательной точности индекса F10.7 моделей линейной регрессии для среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI) – графики 49 моделей

Сезон(12M) – сезонные фиктивные (категориальные) переменные.

Для отбора лагов предсказателей в регрессионной модели используются меры предсказательной точности:

- скорректированный коэффициент детерминации $\overline{R}^2$;
- исправленный информационный критерий Акаике AIC_c;
- Байесов информационный критерий Шварца BIC;

Первый максимизирует, а второй и третий минимизируют сумму квадратов остатков модели SSE).

Отобранные лаги индексов по $\min_{lag}(AIC_c)$:
*F*10.7 – ***7***, *КДЦ* – ***4***, *Ниньо-3.4* – ***4***, *АК* – ***1***, *САК* – ***5***, *АОТ* – ***14*** месяцев.

Результаты анализа

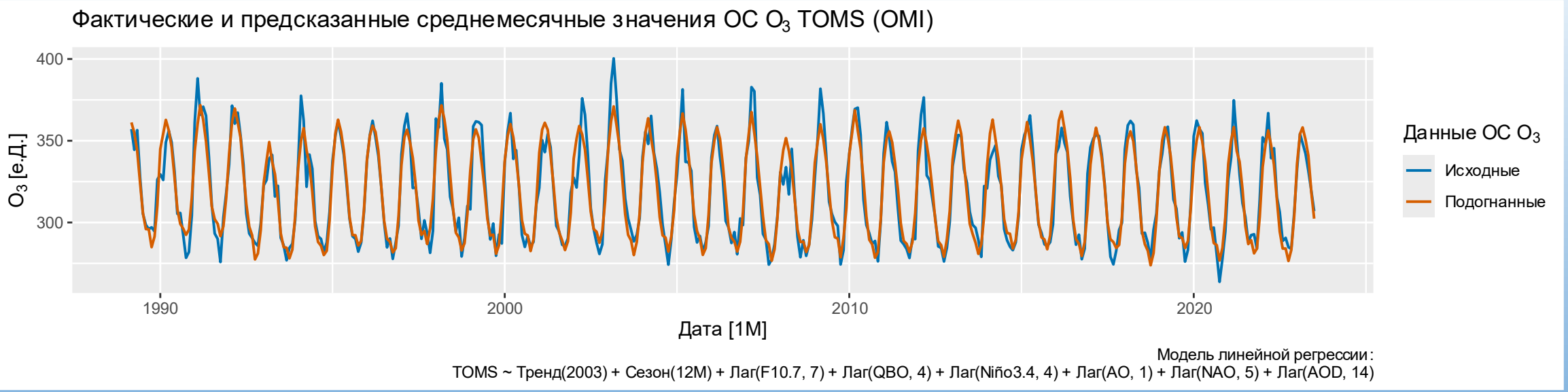
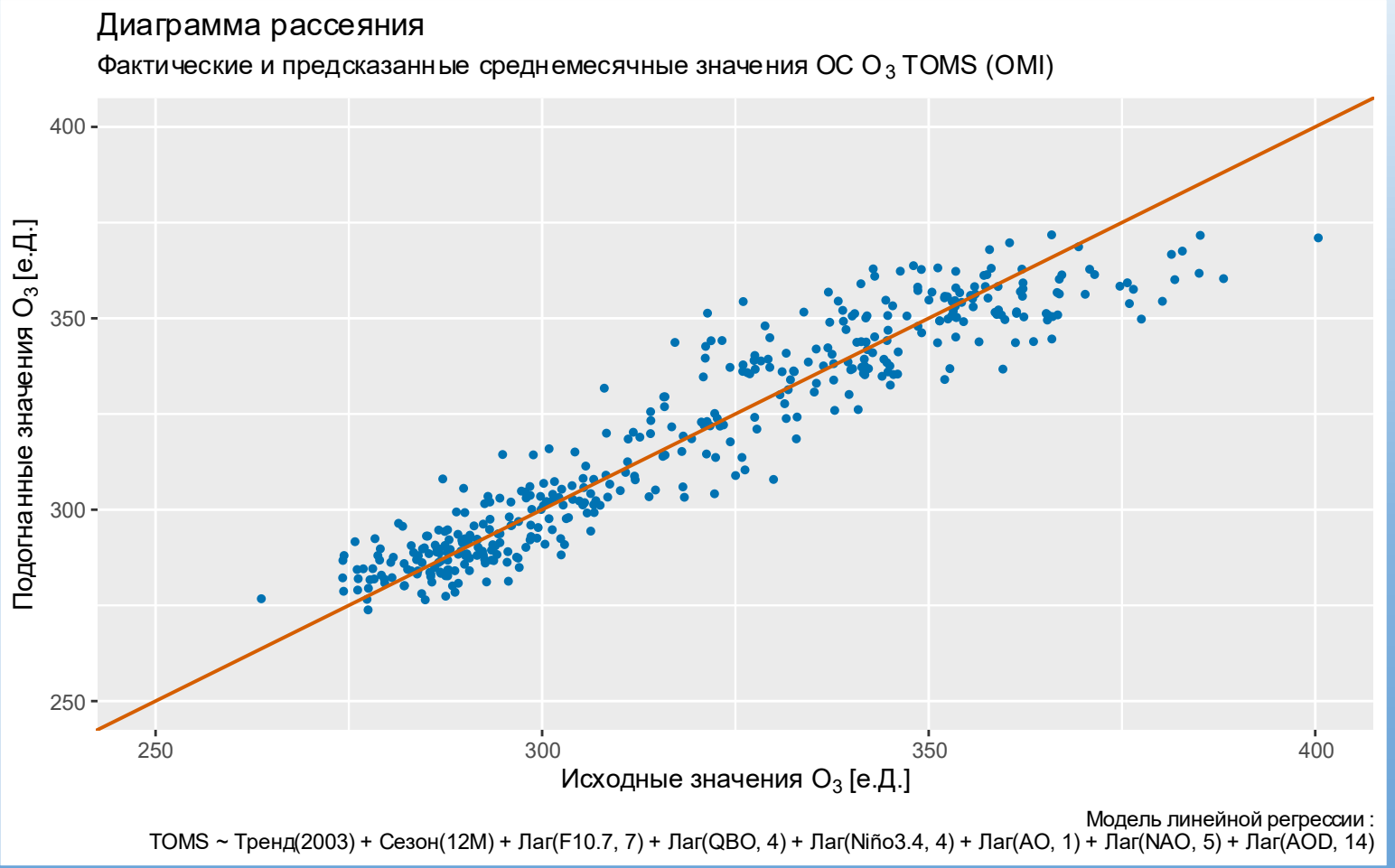


График фактических (синяя кривая) и предсказанных (оранжевая кривая) среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI)

- Оцениваемые коэффициенты $\widehat{\boldsymbol{\beta}}$ дают предсказания внутри тренировочного набора (т.е. подогнанные данные), что позволяет оценить полученную модель.
- На графике подогнанные значения довольно точно соответствуют фактическим данным ОС O_3 TOMS (OMI).
- Видимые расхождения вероятно связаны с неучтёнными в модели приходами в регион богатых O_3 арктических воздушных масс.

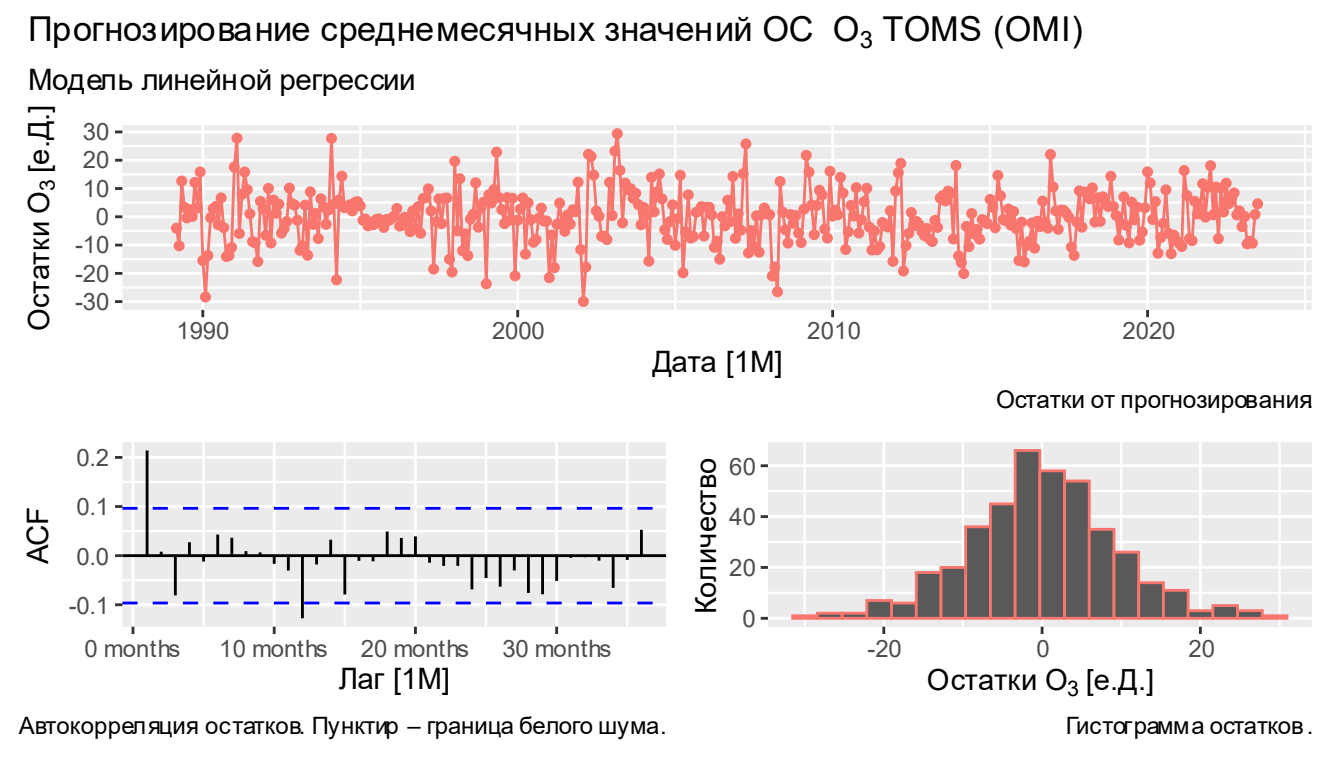
Результаты анализа



Фактические среднемесячные значения ОС O_3 TOMS (OMI) в сопоставлении с предсказанными

- Качество подгонки подтверждает сильная положительная связь подогнанных и фактических данных на диаграмме рассеяния.
- Скорректированный коэффициент детерминации $\overline{R}^2 = 0.8949$, т.е. подогнанные значения ОС O_3 близки к фактическим.

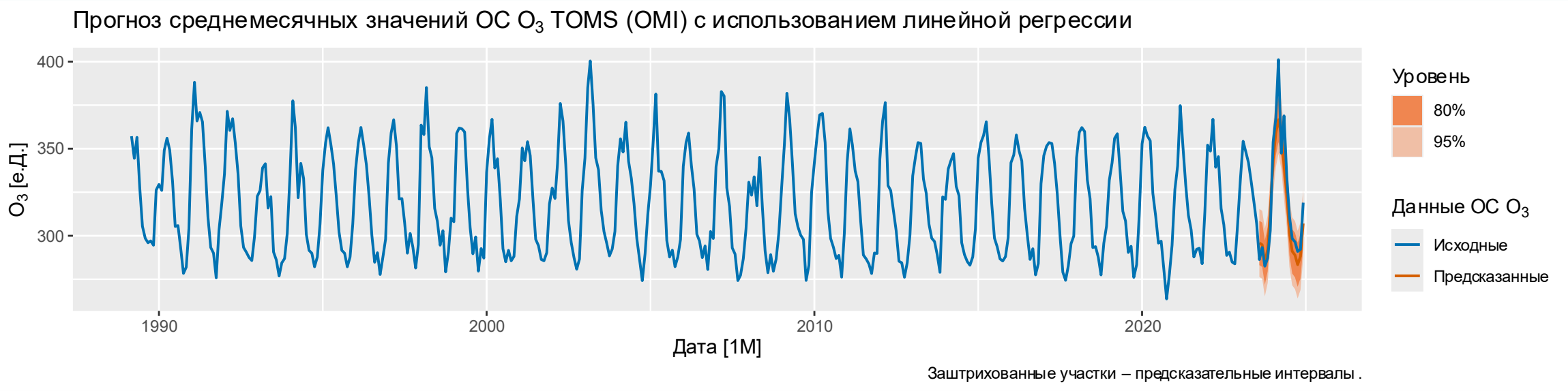
Результаты анализа



Анализ остатков модели линейной регрессии для среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI) – график времени, автокорреляция и гистограмма

- Среднее значение остатков модели (т.е. разницы между фактическими и подогнанными значениями) близко к 0.
- Остатки имеют примерно постоянную дисперсию (кроме периода отсутствия данных).
- На гистограмме распределение остатков близко к нормальному.
- Автокорреляция остатков в 1 и 12 лагах не велика и не окажет заметного влияния на прогноз.
- Анализ остатков показывает, что модель извлекает не всю информацию из данных (приходы арктических воздушных масс).
- Кроме того, модель не рассматривает сезонное влияние предсказателей на ОС O_3 TOMS (OMI).

Результаты анализа



Прогнозы из регрессионной модели в отношении среднемесячных значений ОС O_3 TOMS (OMI). Исходные данные (синяя кривая), предсказанные данные (оранжевая кривая), тёмный заштрихованный участок – 80%-й, а светлый – 95%-й предсказательные интервалы.

- Регрессионная модель определяет взаимосвязи между прогнозной (ОС O_3) и предсказательными переменными, а лагированные предсказатели позволяют модели генерировать прогнозы.
- На графике представлен прогноз ОС O_3 для тестового набора за период 08.2023–12.2024. Темный заштрихованный участок показывает 80%-й, а светлый – 95%-й предсказательные интервалы.

Результаты анализа

Результат моделирования:

- Изменения ОС O_3 на ВНС ИФА по данным TOMS (OMI) в течение 11-летнего цикла солнечной активности составляют ~1.9% с задержкой около 7–15-ти месяцев.
- Колебания O_3 под действием *КДЦ* – ~1.4% с запаздыванием около 4-х месяцев; западная фаза *КДЦ* ведёт к увеличению ОС O_3, восточная – к его уменьшению (сезонное влияние не рассматривалось).
- Максимальная амплитуда вариаций O_3 при изменении индекса *Ниньо-3.4* – ~3.9% с запаздыванием около 4-х месяцев; фаза Эль-Ниньо приводит к увеличению ОС O_3, а Ла-Нинья – его снижению.
- Изменения O_3 в связи с *АК* и *САК* составляют ~2.7% и ~2.1% с задержкой около 1-го и 5-ти месяцев соответственно; отрицательные фазы колебаний сопровождаются увеличением ОС O_3.
- Извержение вулкана Пинатубо вызвало снижение ОС O_3 на ~6% с задержкой около 14-ти месяцев.

Заключение

- ВНС ИФА расположена в зоне влияния субтропической высотной фронтальной зоны на динамические процессы и содержание примесей в стратосфере.
- 34-летний ряд измерений ОС O_3 Брюэра и спутников в районе ВНС позволил выполнить анализ вариаций O_3 в регионе Северного Кавказа.
- Получены оценки многолетних межгодовых вариаций стратосферного O_3 под влиянием 11-летнего солнечного цикла, квазидвухлетней цикличности, Арктического колебания, Североатлантического колебания, Эль-Ниньо–Южного колебания и извержения вулкана Пинатубо.
- Тренды на ВНС контрастируют по знаку с трендами среднезональных значений ОС O_3; на ВНС до 2003 года линейный тренд положительный, а с 2003 года – отрицательный.
- Сравнение с результатами в других регионах указывает на особый характер эволюции ОС O_3 на Северном Кавказе.
- Физические механизмы вариаций и трендов стратосферного O_3 в этом регионе требуют специального исследования.

Список литературы

1. World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 509 pp.; WMO: Geneva, 2022.
2. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
3. UNEP, 2018. Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, twelfth ed. Ozone Secretariat, Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Nairobi, Kenya, p. 895.
4. Savinykh, V. V., Elansky, N. F., and Gruzdev A. N., Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus, Atmos. Environ. 251, 118252 (2021).

Благодарим за внимание!