

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВАРИАЦИИ ОКИСИ УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ АНТАРКТИДЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

©2019 г. В. П. Устинов*, Е. Л. Баранова, К. Н. Вишератин, М. И. Грачев, А. В. Кальсин

Научно-производственное объединение “Тайфун”, Обнинск, Россия

**E-mail: ustinov@rpatyphoon.ru*

Поступила в редакцию 21.03.2019 г.

Представлены результаты систематических (2003–2017 гг.) измерений общего содержания и средней по высоте относительной объемной концентрации CO на станции Новолазаревская спектрометром с разрешением 0.2 см^{-1} . Решение обратной задачи определения общего содержания CO, а также мешающих газов (H_2O и N_2O) осуществлялось с помощью пакета программ SFIT4. Анализ данных показал, что за период измерений среднее общее содержание CO на ст. Новолазаревская составило $(8 \pm 2) \cdot 10^{17}$ молек/см², а средняя по высоте объемная концентрация (37 ± 8) млрд⁻¹. Полученные данные сопоставлены с вариациями общего содержания CO на ст. Arrival-Heights, со спутниковыми данными МОРПТ, а также с приземными значениями концентрации CO на ст. Syova. Максимальные значения CO наблюдаются в сентябре, минимальные — в январе–феврале. Для всех рассмотренных рядов тренды незначимы, при этом наблюдаются периоды повышенного содержания CO (2010 г.), в последние годы (2014–2017 гг.) проявляется тенденция к росту минимальных значений CO. Как для ст. Новолазаревская, так и ст. Арривал-Хайтс характерно превышение спутниковых данных над наземными, составляющее 19% и 14% соответственно, при этом наблюдается сезонная зависимость величины отклонения с минимальными отклонениями в декабре–январе. Данные приземных измерений общего содержания на ст. Новолазаревская и Арривал-Хайтс достаточно хорошо согласуются, а начиная с 2010 г. среднее отклонение составляет 2.4%. Среднее значение концентрации CO на ст. Сьова выше, чем средняя по высоте концентрация на ст. Новолазаревская и составляет 51 млрд⁻¹. По данным спектрального, вейвлетного и композитного анализов во всех рассмотренных рядах присутствуют колебания в интервале 6–45 месяцев с практически совпадающими периодами и фазовыми соотношениями.

Ключевые слова: окись углерода, общее содержание, Антарктида, наземные и спутниковые измерения, спектральный и кросс-вейвлетный анализ

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019297-106>

ВВЕДЕНИЕ

Окись углерода (CO, оксид углерода) — малая газовая составляющая (МГС) атмосферы, оказывающая климатическое и токсическое воздействие на окружающую среду. Основными природными источниками окиси углерода являются реакции окисления метана, хлорофилла, изопренов, терпенов, поступление в атмосферу CO из океанов и при извержениях вулканов, а также горение лесов и торфяников. Сток окиси углерода происходит в реакциях окисления CO гидроксидом OH, при поглощении его в почвах и при выносе в стратосферу (Бримблкумб, 1988). Фотохимическое время жизни молекулы CO составляет около 2 месяцев, содержание окиси углерода в атмосфере значительно меняется как от сезона к сезону, так и пространственно. Мониторинг общего содержания и вертикального распределения CO в атмосфере ведется различными спутниковыми

системами наблюдений (Тимофеев, 2016), а также приборами высокого спектрального разрешения на сети наземных станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <https://www2.acom.ucar.edu/irwg/groups>) и TCCON (Total Carbon Column Observation Network, <https://tccon-wiki.caltech.edu>). Локальные приземные концентрации CO определяются на сети международных станций NOAA — Earth System Research Laboratory (ESRL, www.esrl.noaa.gov). В России измерения общего содержания CO в атмосфере спектроскопическим методом проводятся в ИФА РАН (Yurganov et al., 2002), СПбГУ (Макарова и др., 2011) и ФБГУ “НПО “Тайфун” (Кашин и др., 2000). Ведется регулярное сопоставление спутниковых измерений общего содержания CO с наземными спектроскопическими данными для разных районов Земли и условий измерений для получения репрезентативных спутниковых данных (Ракитин и др., 2015, Ситнов и др., 2017, Buchholz et al., 2017).

Важное значение для изучения изменений CO в атмосфере имеют измерения общего содержания окиси углерода в фоновых условиях. Географическое положение Антарктиды и характер атмосферной циркуляции способствуют тому, что антарктическая атмосфера по сравнению с другими регионами Земли в наименьшей степени подвержена антропогенному воздействию. Поэтому наблюдаемые вариации МГС в первую очередь определяются естественными причинами. С 2003 г. НПО “Тайфун” совместно с ААНИИ осуществляет мониторинг газового состава (CO₂, CH₄, N₂O, CO, H₂O) атмосферы Антарктиды. В данной работе представлены результаты систематических (2003–2017 гг.) измерений общего содержания и средней по высоте относительной объемной концентрации CO на станции Новолазаревская (70.78° ю.ш., 11.82° в.д., 120 м над у.м.). Полученные данные сопоставлены с измерениями общего содержания CO на наземной станции NDACC Arrival-Heights (77.82° ю.ш., 166.65° в.д.), со спутниковыми данными MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere, Multispectral CO Total Column, MOP03JM_007, Daytime/Descending), а также приземными значениями концентрации CO на станции ESRL Syova (69.00° ю.ш., 39.58° в.д.).

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Регистрация спектров ведется спектрометрическим комплексом аппаратуры (Кашин и др., 2000), состоящим из системы слежения за Солнцем, спектрометра и ЭВМ, обеспечивающей управление комплексом, запись и хранение информации.

Комплекс находится в отдельно стоящем измерительном павильоне, поворотное зеркало следящей системы установлено на крыше. Через отверстие в крыше солнечное излучение попадает на оптическую систему согласования со спектрометром. Спектральное разрешение спектрометра составляет 0.2 см⁻¹. Измерения проводились по прямому солнечному излучению при высотах Солнца более 15°. Время записи одного спектра 6 мин. В течение 2003–2009 годов комплекс неоднократно модернизировался, в 2006 г. он был разрушен ураганными порывами ветра, с апреля 2010 г. изменения не вносились.

Определение общего содержания CO осуществляется методом солнечной молекулярно-абсорбционной спектроскопии. Для измерений содержания окиси углерода используется колебательно-вращательная полоса CO ν₃ с центром 2141.3 см⁻¹. В атмосфере эта полоса перекрыта спектральными линиями полос поглощения H₂O,

CO₂ и N₂O. Поэтому при выборе рабочего спектрального диапазона основным критерием являлось условие минимального влияния на спектр CO линий поглощения мешающих газов. По результатам расчетов был выбран оптимальный рабочий участок спектра (от 2150.0 до 2160.0 см⁻¹), включающий линии окиси углерода, линии водяного пара и слабые линии углекислого газа и закиси азота. Для привязки экспериментальных спектров по частоте использовались линии поглощения CO R1–R3.

Являясь продолжением и развитием предыдущих работ (Кашин и др., 2007), данная работа существенно отличается методикой расчета: для решения обратной задачи определения общего содержания CO, а также мешающих газов (H₂O и N₂O) был использован свободно распространяемый пакет программ SFIT4 v0.9.4.4 (The University Corporation for Atmospheric Research, <https://wiki.ucar.edu/display/sfit4/>).

Нами была проведена адаптация этого пакета применительно к прибору низкого разрешения МДР-23, установленному на ст. Новолазаревская. Для этого были разработаны программа привязки спектров по частоте и формирования структурированного входного файла, программа определения зенитного угла Солнца, и программа формирования и визуализации выходных данных. В качестве атласа спектральных линий был использован атлас HITRAN-2012 (Rothman et al., 2013), априорные профили температуры, давления и профилей газов заимствовались из WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model, <https://www2.acom.ucar.edu/gcm/waccm>) и задавались такими же, как и для расположенной сравнительно недалеко ст. Сьова (Syova).

Для сопоставления с результатами измерений на ст. Новолазаревская были использованы данные измерений общего содержания CO прибором высокого разрешения Bruker IFS125HR на ст. Арривал-Хайтс (FTIR CO Total Column — NDACC — <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/ndacc/station/arrival/hdf/ftir/>). Сопоставление с данными измерений спутникового прибора MOPITT проводилось на основе базы данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Для этого проводилось усреднение данных измерений общего содержания CO для ячеек 3° × 3°, охватывающих станции Новолазаревская и Арривал-Хайтс (10–13° в.д., (70–72° ю.ш. и (165–168° в.д., (76–79° ю.ш. соответственно. Для сопоставления с данными измерений приземной концентрации на ст. Сьова (ESRL, Global Monitoring Division — ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/data/trace_gases/co/flask/surface/) данные ст. Новолазаревская пересчитывались для сухого

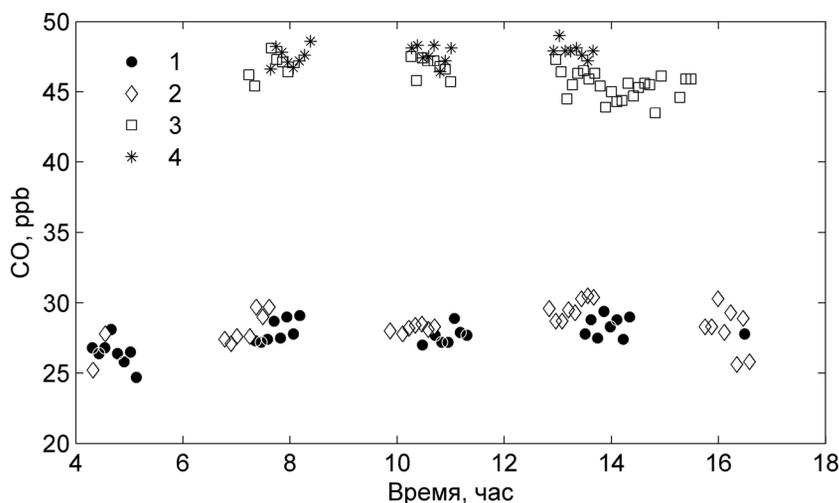


Рис. 1. Внутрисуточная изменчивость CO на ст. Новолазаревская. 1 — 04.01.2009, 2 — 17.01.2009, 3 — 11.10.2018, 4 — 29.10.2017.

воздуха в среднюю по высоте объемную концентрацию в частях на миллиард (ppb).

Далее в тексте для краткости данные наземных станций обозначены как NL -Новолазаревская, АН — Арривал-Хайтс, SY — Сьова. Добавление буквы G (ground) указывает на результаты, полученные наземной аппаратурой, а буквы S (satellite) на спутниковые данные. Для средней по высоте объемной концентрации далее будем использовать индекс X, а для общего содержания индекс OC. Например, для станции Новолазаревская, NL_G_X -средняя по высоте объемная концентрация в ppb, NL_G_{OC} и NL_S_{OC} общее содержание CO в молек/см² по данным наземных и спутниковых (над ст. Новолазаревская) измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты единичных измерений в периоды максимальных (октябрь) и минимальных (январь) значений концентрации CO.

В течение дня общее содержание и осредненная концентрация CO испытывают незначительные колебания укладывающиеся в рамки случайной инструментальной погрешности. Временные промежутки между сериями измерений вызваны измерениями в это время других газовых составляющих. Инструментальная случайная погрешность определения содержания CO полученная по повторяемости результатов измерений в течение дня, составляет $\pm 4\%$. Результаты расчетов общего содержания CO за 2003–2007 гг. совпадают с данными (Кашин и др., 2007) в пределах погрешности.

Результаты измерений CO на станции Новолазаревская и данные ст. Арривал-Хайтс и ст. Сьова, представленные на рис. 2, наглядно демонстрируют сезонные вариации CO в атмосфере Антарктиды. Содержание CO изменяется от максимальных величин в сентябре–октябре (антарктическая весна) до минимальных — в январе–феврале (окончание полярного дня на ст. Новолазаревская) и начинает возрастать в марте–апреле.

Для сопоставления данных наземных и спутниковых измерений был использован традиционный метод (Fioletov et al., 2008, Вишератин, 2012), заключающийся в вычислениях относительного отклонения (Δ) в процентах между двумя рядами C1 и C2: $\Delta(i) = 100 \cdot (C1(i) - C2(i)) / C1(i)$. Значения относительного отклонения для среднемесячных значений CO приведены на рис. 3.

Данные приземных измерений общего содержания на ст. Новолазаревская и Арривал-Хайтс достаточно хорошо согласуются (рис. 3а), а начиная с 2010 г. среднее отклонение NL_G_{OC} — АН_G_{OC} составляет -2.4% . Как упоминалось выше, в период до 2010 г. аппаратура ст. Новолазаревская неоднократно модернизировалась. Сопоставление данных наземных станций и измерений прибором МОРПТТ (рис. 3б, в) показало, что как для ст. Новолазаревская так и ст. Арривал-Хайтс характерно превышение спутниковых данных над наземными, составляющее для средних значений отклонений за весь период измерений 19% и 14% соответственно и для периода после 2010 г. 12% и 16%. Рост среднего отклонения для ст. Арривал-Хайтс указывает на небольшое различие в долговременных трендах АН_G_{OC} и АН_S_{OC} (drift of trends). Аналогичные результаты (превышение спутниковых данных над данными ст. Арривал-Хайтс на 9.5%

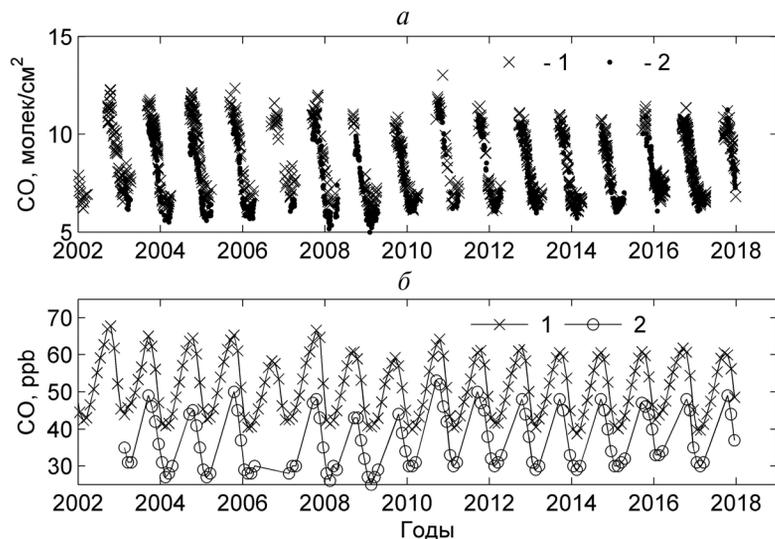


Рис. 2. Временные вариации CO в атмосфере Антарктиды. *a* — средние значения общего содержания CO (10^{17} молекул/см³) на станциях Арривал-Хайтс (1) и Новолазаревская (2), *б* — среднемесячные приземные концентрации на ст. Сьова (1) и средняя объемная концентрация в столбе атмосферы на ст. Новолазаревская (2).

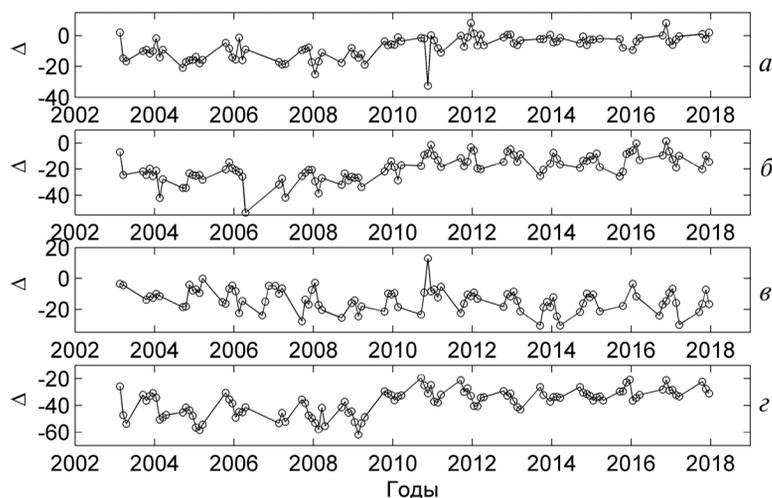


Рис. 3. Относительные отклонения Δ (%) между различными рядами: *a* — NL_GOC — AN_GOC, *б* — NL_GOC — NL_SOC, *в* — AN_GOC — AN_SOC, *г* — NL_GX — SY_G.

и различие в трендах) были получены для данных за 2001–2012 гг. в (Buchholz et al., 2017). Согласно (Buchholz et al., 2017), для других 13 станций NDACC, расположенных на разных широтах обоих полушарий, данные МОРИТТ также превышают данные наземных станций при коэффициентах корреляции в диапазоне 0.72–0.96. В работах (Ракитин и др., 2015, Ситнов и др., 2017) отмечается не столь тесная связь между средненежными значениями ОС CO МОРИТТ и наземными данными станций, расположенных на Евразийском материке. В зависимости от места и условий измерений коэффициенты корреляции для фоновых условий

изменяются в широком диапазоне 0.28–0.96 (Ракитин и др., 2015), 0.4–0.8 (Ситнов и др., 2017).

Следует отметить следующую особенность — наименьшие различия спутниковых данных с данными ст. Новолазаревская и Арривал-Хайтс наблюдаются в период декабрь-январь, т.е. в моменты, когда солнце над Антарктидой находится наиболее высоко над горизонтом. Сравнение спутниковых данных МОРИТТ с наземными спектроскопическими измерениями CO на территории Евразии (Ракитин и др., 2015, Ситнов и др., 2017) также показало достаточно хорошее согласие в летний период и существенное

Таблица 1. Параметры тренда и колебаний

Параметр	SY_Gx	NL_Gx	NL_Goc	NL_Soc	AH_Goc	AH_Soc
S0	51.7	35.2	7.5	10.3	8.7	10.4
B	-0.06	0.21	0.045	-0.04	-0.04	-0.01
A12	10.2	8.80	1.87	2.50	1.94	2.85
P12	-2.47	-2.72	-2.77	-2.22	-2.72	-2.21
A6	1.80	2.56	0.58	0.40	0.6	0.39
P6	-1.60	-1.24	-1.23	-1.50	-1.31	-0.89

расхождение в зимний. Согласно (Ситнов и др., 2017), это может быть связано с увеличением устойчивости нижней атмосферы зимой и увеличением в связи с этим доли содержания CO в приземном слое, к которому МОРИТТ недостаточно чувствителен. Согласно (Ракитин и др., 2015) отмеченные выше различия возможно обусловлены более интенсивным конвективным перемешиванием в летний период, что приводит к подъему примеси в среднюю тропосферу, т.е. на высоту удовлетворительной чувствительности спутникового спектрометра.

Как и следовало ожидать, данные измерений в пробах приземного воздуха на ст. Сьова превышают среднюю по высоте объемную концентрацию CO на ст. Новолазаревская. За весь период измерений среднее превышение составляет 37%. Начиная с 2010 г. среднее превышение составляет 31%, причем также наблюдается сезонная зависимость величины отклонения, с размахом, достигающим 15–20%, однако в этом случае в декабре-январе наблюдаются наибольшие отклонения. Причины сезонной зависимости отклонений требуют дальнейшего изучения.

Как наземные, так и спутниковые среднемесячные данные (за исключением приземных концентраций CO на ст. Сьова) имеют значительные пропуски в измерениях в течение полярной ночи. Поэтому для проведения дальнейшего анализа такие пропуски предварительно были заполнены. Для этого итеративным методом наименьших квадратов были определены параметры линейного тренда и параметры годовой и полугодовой гармоник для среднемесячных значений. Общее выражение, аппроксимирующее тренд, годовую и полугодовую составляющие колебаний CO, имеет следующий вид:

$$Y = S0 + B \cdot N/12 + A12 \cdot \sin(P12 + 2\pi N/12) + A6 \cdot \sin(P6 + 2\pi N/6) \quad (1)$$

где A12 и A6 – амплитуды, P12 и P6 – фазы годовой и полугодовой гармоник (радианы), S0 и B – параметры тренда (в год), N – порядковый номер месяца, начиная с февраля 2003 г. Для средней по высоте концентрации CO размерность A12, A6, S0

в ppb, для общего содержания – в 10^{17} молек/см². Приведенные в табл. 1 параметры колебаний, выделенные жирным шрифтом значимы на доверительном уровне 95%. Величина тренда B для всех рядов незначима.

Рассчитанные по (1) значения CO были добавлены вместо пропусков в исходные ряды. Примеры рядов с заполненными пропусками приведены ниже на рис. 4. Временная изменчивость CO за анализируемый промежуток имеет общие особенности. Для всех рядов, приведенных на рис. 4, временные ряды имеют схожий сезонный ход, что подтверждают и данные таблицы 1: фазы годовой и полугодовой гармоник для общих содержаний CO совпадают в пределах стандартного отклонения. Заметен рост максимальных значений CO в 2010 г. Согласно (WMO, 2018) рост приземной концентрации CO в 2010 г. наблюдался во всех широтных зонах земного шара. Если в Северном полушарии он вызван крупными лесными пожарами в России летом 2010 г., то причины роста CO в Антарктиде неясны. Отметим также, что в последние годы (рис. 2, 4) отмечается рост минимальных концентраций CO, заметный также для приземных значений CO в Южном полушарии (WMO, 2018).

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ВАРИАЦИЙ CO

Для того, чтобы сопоставить вариации наземных и спутниковых данных с периодами большими 12 месяцев, используем методы спектрального анализа. Спектральный анализ проводился с помощью модифицированного Фурье преобразования Ломба–Скаржла (Scargle, 1982). Хотя этот метод и позволяет проводить анализ для рядов с пропусками, однако значительные пропуски могут вносить искажения. Поэтому нами были использованы среднемесячные ряды с одинаковой длиной N = 179 мес. с 02.2013 г. по 12.2017 г. с заполненными пропусками; предварительно из анализируемых данных был удален линейный тренд. Результаты спектрального анализа представлены

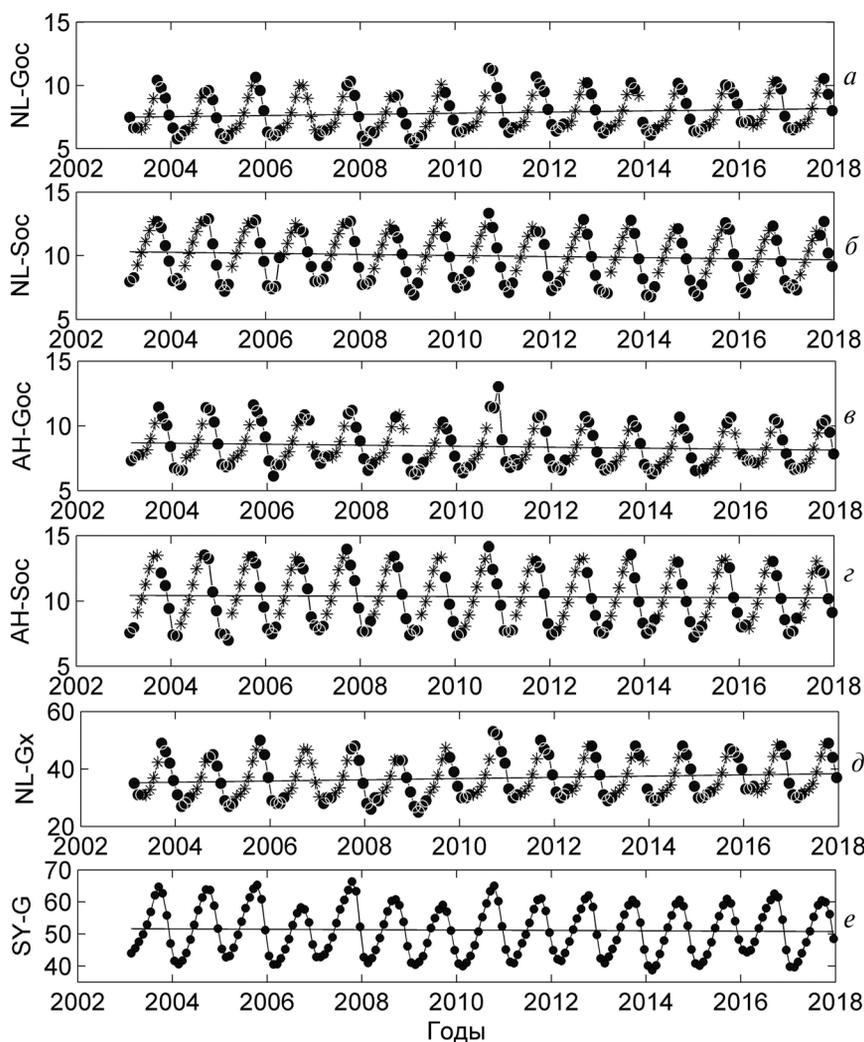


Рис. 4. Временные ряды среднемесячных значений CO. Кружки — исходные данные, крестики — интерполяция по (1) с параметрами из таблицы (1). Данные NL_Gx (д) и SY_G (e) приведены в ppb, на остальных рисунках среднее содержание CO дано в 10^{17} молек/см².

на рис. 5, параметры ряда гармоник приведены в таблице 2. Гармоники с периодами более 15 мес. незначимы, даже при исключении из рядов годовой и полугодовой гармоник. Тем не менее на качественном уровне обращает на себя внимание схожесть амплитудных спектров в области 13–50 мес. (для анализа гармоник с большими периодами длины анализируемых рядов пока недостаточны).

При некотором различии в амплитудах гармоник, отражающих, вероятно, различие в методах измерений, периоды колебаний по данным спутниковых и наземных измерений очень близки. Для данных ст. Сьовы, полученных методом забора проб приземного воздуха, периоды колебаний в области более двух лет смещены в длинноволновую область. Так как станции Новолазаревская и Арривал-Хайтс расположены на противоположных

берегах Антарктиды, указанное сходство периодов наблюдаемых колебаний в поле CO обусловлено влиянием колебаний общей циркуляции атмосферы на циркуляционные процессы над Антарктическим материком (Груза и др., 2007). Спектральная структура вариаций CO обнаруживает сходство со спектральной структурой вариаций общего содержания озона: для атмосферы центральной части Евразии также наблюдаются колебания с периодами 14.7, 18.2, 21.1, 23.8, 34.1, 46 мес. (Вишератин и др., 2006). Представляется логичным в последующих работах проанализировать вариации общего содержания озона над Антарктикой.

Вместе с тем, совпадение периодов колебаний по данным спутниковых и наземных измерений CO (рис. 5, табл. 2), не обязательно означает и совпадение фаз колебаний, т.е. синхронности колебаний, поскольку Фурье-анализ дает значения периодов

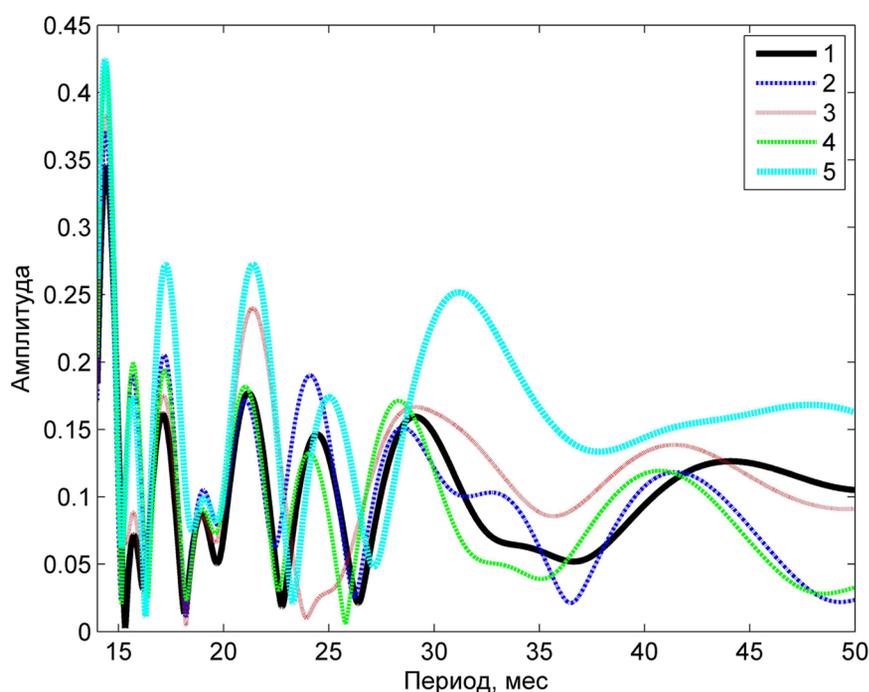


Рис. 5. Амплитудные спектры вариаций CO (10^{17} молек/см²) в области периодов 13–50 мес. 1 — NL_Goc, 2 — NL_Soc, 3 — AH_Goc, 4 — AH_Soc, 5 — SY_G (амплитуда в ppb уменьшена в 5 раз).

колебаний, усредненные для всего анализируемого периода. Как было показано ранее (рис. 2, табл. 1), фазовые соотношения в области сезонных вариаций для спутниковых и наземных данных совпадают. Для оценки фазовых соотношений в области периодов 14–50 мес. дополнительно были использованы композитный метод (Вишератин, 2012, Вишератин и др., 2017) и кросс-вейвлетный анализ (Torrence, Compo, 1998). Для примера композитные временные ряды содержащие сумму колебаний в интервале 14–50 мес. показаны для наземных и спутниковых данных для ст. Новолазаревская на рис. 6а.

На рис. 6б представлены результаты кросс-вейвлетного анализа. Как следует из рис. 6, фазовые соотношения между наземными и спутниковыми данными в области длиннопериодных колебаний (менее 50 мес.) достаточно хорошо согласуются, как по данным композитного, так и вейвлетного

анализов. Аналогичная картина наблюдается и для данных AH_Goc и AH_Soc. Кросс-вейвлетный анализ данных Съовы и Новолазаревской показал, что наблюдаемые по данным спектрально-го анализа (рис. 5) различия в периодах гармоник в области более 3 лет проявляются только в первой половине анализируемого периода, а после 2010 г. фазы колебаний синхронизируются для всего интервала 14–50 мес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты многолетних измерений общего содержания CO на станции Новолазаревская и результаты сопоставления с данными ст. Арривал-Хайтс, ст. Съова и спутниковыми данными МОРИТТ. Результаты измерений общего содержания CO на станции Новолазаревская в пределах погрешности согласуются с аналогичными

Таблица 2. Параметры гармоник с периодами более 14 мес.

Станция	Период колебаний, мес. (амплитуда, 10^{17} молек/см ²)					
NL_Goc	14.4(0.35)	17.1(0.16)	21.2(0.18)	24.4(0.15)	29.1(0.16)	44.1(0.13)
NL_Soc	14.4(0.37)	17.2(0.20)	21.0(0.17)	24.1(0.19)	28.5(0.15)	41.5(0.12)
AH_Goc	14.4(0.38)	17.1(0.17)	21.4(0.24)	-	29.1(0.17)	41.4(0.14)
AH_Soc	14.4(0.42)	17.2(0.19)	21.0(0.18)	24.1(0.13)	28.3(0.17)	40.7(0.12)
SY_G (ppb)	14.4(2.1)	17.2(1.4)	21.4(1.4)	25.0(0.9)	31.2(1.3)	47.9(0.8)

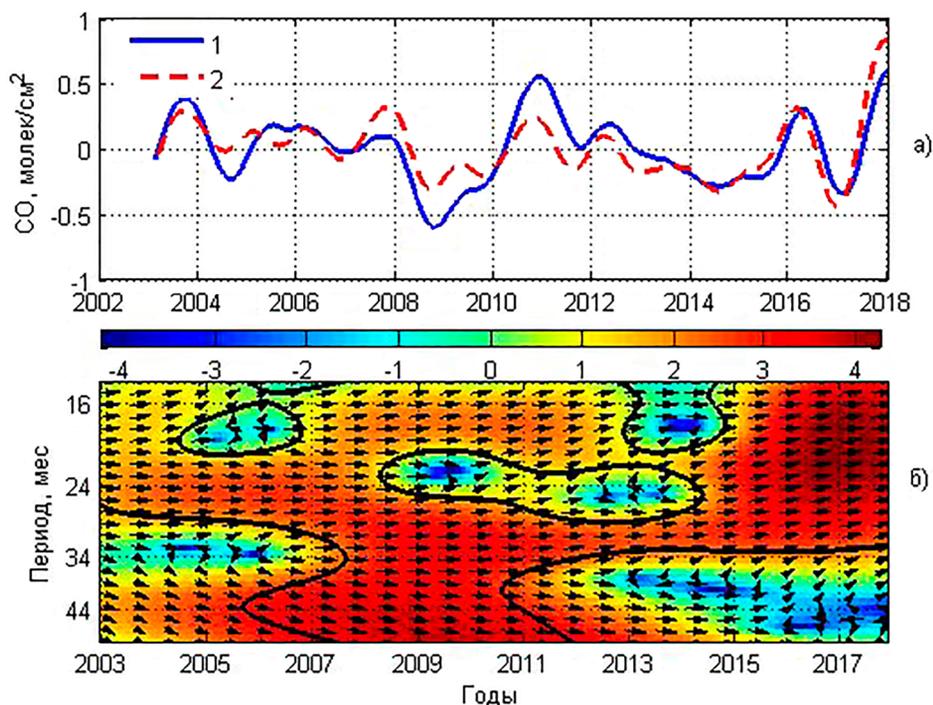


Рис. 6. Сопоставление временных вариаций CO для периодов 14–50 мес. *a* — композитные временные ряды и *б* — результаты кросс-вейвлетного анализа (1 — NL_Gos, 2 — NL_Soc). Цветовая гамма в относительных единицах, направление стрелок вправо соответствует синхронности колебаний, жирная линия выделяет области с доверительным интервалом более 95%.

измерениями на станции Арривал-Хайтс. Спутниковые данные MORITT превышают данные приземных измерений на ст. Новолазаревская и ст. Арривал-Хайтс на 19% и 14% соответственно, причем относительное отклонение имеет периодический характер и минимально в периоды, близкие к солнцестоянию. Значения средней по высоте относительной объемной концентрации CO на станции Новолазаревская на 37% меньше приземной концентрации на станции Сева. Линейные тренды для всех рядов незначимы. Отмечен рост общего содержания CO в 2010 г., а также рост минимальных значений в период после 2014 г.

Согласно спектральному анализу распределение амплитуд и периодов колебаний в области более 6 мес. схоже для всех представленных рядов, независимо от метода и места измерений. По данным вейвлетного и композитного анализов наблюдается сфазированность вариаций CO не только для годовой и полугодовой гармоник, но и для колебаний в области 13–50 мес.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.Ф. Радионову за помощь в организации работ в Антарктиде.

Авторы признательны коллективам ученых, предоставивших доступ к базам данных: MORITT Multispectral CO Total Column (Giovanni online data system), FTIR CO Total Column (NDACC), Atmospheric Carbon Monoxide Dry Air Mole Fractions (ESRL).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бримблклуб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 351 с.
- Вишератин К.Н. Фазовые соотношения между квазидесятилетними колебаниями общего содержания озона и 11-летним циклом солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 1. С. 99–108.
- Вишератин К.Н., Каменоградский Н. Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Синяков В.П., Сорокина Л.И. Спектрально-временная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 205–223.
- Вишератин К.Н., Нерушев А.Ф., Орозалиев М.Д., Zheng X., Sun Sh., Liu L. Временная изменчивость общего содержания озона в Азиатском регионе по данным наземных и спутниковых измерений // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 59–68.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в Южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых

регионов земного шара в XX веке // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 5–17.

Кашин Ф. В., Арефьев В. Н., Вишератин К. Н., Каменоградский Н. Е., Семенов В. К., Сняжков В. П. Результаты экспериментальных исследований радиационно-активных составляющих атмосферы в центре Евразии // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36. № 4. С. 463–492.

Кашин Ф. В., Радионов В. Ф., Гречко Е. И. Вариации общего содержания окиси углерода и метана в Антарктической атмосфере // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 96–102.

Макарова М. В., Поберовский А. В., Осипов С. И. Временная изменчивость общего содержания СО в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 801–808.

Ракитин В. С., Штабкин Ю. А., Еланский Е. Ф., Панкратова Н. В., Скороход А. И., Гречко Е. И., Сафронов А. Н. Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания СО, СН₄ и СО₂ с наземными спектроскопическими данными // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 816–824.

Ситнов С. А., Мохов И. И., Джола А. В. Общее содержание оксида углерода в атмосфере над российскими регионами по спутниковым данным // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 38–55.

Тимофеев Ю. М. Исследования атмосферы методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 368 с.

Buchholz R. R., Deeter M. N., Worden H. M., Gille J., Edwards D. P., Hannigan J. W., Jones N. B., Paton-Walsh C., Griffith D. W. T., Smale D., Robinson J., Strong K., Conway S., Sussmann R., Hase F., Blumenstock T., Mahieu E., Langerock B. Validation of MOPITT carbon monoxide using ground-based Fourier

transform infrared spectrometer data from NDACC // Atmos. Meas. Tech. 2017. № 10. P. 1927 – 1956.

Fioletov V. E., Labow G. J., Evans R., Hare E. W., Kohler U., McElroy C. T., Miyagawa K., Redondas A., Savastiouk V., Shalamyansky A. M., Staehelin J., Vanicek K., Weber M. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D14313. doi:10.1029/2008JD009809

Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov I. E., Barbe A., Benner C. D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. G., Wagner G. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.2013

Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. V. 263. P. 835–853.

Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78.

WMO, World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) Data Summary. 2018. WDCGG № 42. P. 35–40.

Yurganov L. N., Grechko E. I., Dzholia A. V. Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // Rec. Res. Dev. Geophys. 2002. № 4. P. 249–265.

Variations of Carbon Monoxide in the Atmosphere of Antarctica According to Ground-Based and Satellite Measurements

V. P. Ustinov, E. L. Baranova, K. N. Visheratin, M. I. Grachev, A. V. Kalsin

Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia

The results of systematic (2003–2017) measurements of the total content and the volume mixing ratio of CO at Novolazarevskaya station with a spectrometer with a resolution of 0.2 cm⁻¹ are presented. The inverse problem of determining the total CO content, as well as interfering gases (H₂O and N₂O), was solved using the SFIT4 software package. Data analysis showed that over the measurement period the average total CO content at Novolazarevskaya amounted to $(8 \pm 2) \cdot 10^{17}$ molec/cm², and the average volume mixing ratio amounted to (37 ± 8) ppb. The obtained data are compared with variations in the total content of CO in Arrival-Heights station, with MOPITT satellite data, as well as with surface values of CO concentration at Syova station. The maximum values of CO are observed in September, the minimum — in January–February. For all the considered series, the trends are insignificant, while there are periods of increased CO content (2010). In recent years (2014–2017) there is a tendency towards an increase in the minimum values of CO. For Novolazarevskaya and Arrival-Heights satellite data are characterized by the excess of over ground data, amounting to 19% and 14%, respectively, while there is a seasonal dependence of the deviation with the minimum in December–January. Surface measurements of the total CO content are in fairly good agreement at Novolazarevskaya and Arrival-Heights, and since 2010 the average deviation is 2.4%. The average value of the concentration of CO on Syova 51 ppb is higher than the average volume mixing ratio at Novolazarevskaya. According to the spectral, wavelet and composite analyzes, in all the considered series there are oscillations in the range of 6–45 months with closely coinciding periods and phases.

Keywords: carbon monoxide, total content, Antarctica, ground-based and satellite measurements, spectral and cross-wavelet analysis

REFERENCES

- Brimblecombe P.* Sostav i khimiya atmosfery [Composition and chemistry of the atmosphere]. M.: Mir, 1988. 351 s. (in Russian).
- Buchholz R.R., Deeter M.N., Worden H.M., Gille J., Edwards D.P., Hannigan J.W., Jones N. B., Paton-Walsh C., Griffith D.W.T., Smale D., Robinson J., Strong K., Conway S., Sussmann R., Hase F., Blumenstock T., Mahieu E., Langerock B.* Validation of MOPITT carbon monoxide using ground-based Fourier transform infrared spectrometer data from NDACC // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. № 10. P. 1927 – 1956.
- Fioletov V.E., Labow G.J., Evans R., Hare E.W., Kohler U., McElroy C.T., Miyagawa K., Redondas A., Savastiouk V., Shalamyansky A.M., Staehelin J., Vanicek K., Weber M.* Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. D14313. doi:10.1029/2008JD009809.
- Gruza G.V., Rankova E.Ya., Rocheva E.V.* Krupnomashtabnye kolebaniya tsirkulyatsii atmosfery v Yuzhnom polusharii i ikh vliyaniye na izmeneniye klimata nekotorykh regionov zemnogo shara v XX veke [Large-scale fluctuations in atmospheric circulation in the southern hemisphere and their effect on climate change in some regions of the globe in the 20th century] // *Meteorologiya i gidrologiya.* 2007. № 7. S. 5–17. (in Russian).
- Kashin F.V., Arefyev V.N., Visheratin K.N., Kamenogradsky N.E., Semenov V.K., Sinyakov V.P.* Rezultaty eksperimentalnykh izzledovaniy radiatsionno-aktivnykh sostavlyayushchikh atmosfery v tsentre Evrazii [The results of experimental studies of the radiation-active components of the atmosphere in the center of Eurasia] // *Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana.* 2000. T. 36. № 4. S. 463–492. (in Russian).
- Kashin F.V., Radionov V.F., Grechko E.I.* Variatsii obshchego sodержaniya oksidi ugleroda i metana v Antarkticheskoy atmosfere [Variations in total carbon monoxide and methane in the Antarctic atmosphere] // *Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana.* 2007. T. 43. № 4. S. 96–102. (in Russian).
- Makarova M.V., Poberovsky A.V., Osipov S.I.* Vremennaya izmenchivost obshchego sodержaniya CO v atmosfere vblizi Sankt-Peterburga [Temporal variability of total CO content in the atmosphere near St. Petersburg] // *Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana.* 2011. T. 47. № 6. S. 801–808. (in Russian).
- Rakitin V.S., Shtabkin Yu.A., Elansky E.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Safronov A.N.* Rezultaty sopolstavleniya sputnikovykh izmereniy obshchego sodержaniya CO, CH₄ i CO₂ s nazemnymi spektroskopicheskimi dannymi [The results of the comparison of satellite measurements of the total content of CO, CH₄ and CO₂ with ground-based spectroscopic data] // *Optika atmosf. i okeana.* 2015. T. 28. № 9. S. 816–824. (in Russian).
- Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov I.E., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Bizsocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I., Wagner G.* The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.2013
- Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *The Astrophysical Journal.* 1982. V. 263. P. 835–853.
- Sitnov S.A., Mokhov I.I., Dzhola A.V.* Obshchee sodержaniye oksida ugleroda v atmosfere nad rossiyskimi regionami po sputnikovym dannym [The total content of carbon monoxide in the atmosphere over the Russian regions by satellite data] // *Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana.* 2017. T. 53. № 1. S. 38–55. (in Russian).
- Timofeev Yu.M.* Issledovaniya atmosfery metodom prozrachnosti [Studies of the atmosphere by the method of transparency]. SPb.: Nauka, 2016. 368 s. (in Russian).
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78.
- Visheratin K.N.* Fazovye sootnosheniya mezhdru kvazidesyatiletnimi kolebaniyami obshchego sodержaniya ozona i 11-letnim tsiklom solnechnoy aktivnosti [Phase relations between quasi-ten-year oscillations of the total ozone content and the 11-year solar activity cycle] // *Geomagnetizm i aeronomiya.* 2012. T. 52. № 1. S. 99–108. (in Russian).
- Visheratin K.N., Kamenogradsky N.E., Kashin F.V., Semenov V.K., Sinyakov V.P., Sorokina L.I.* Spekttralno-vremennaya struktura variatsiy obshchego sodержaniya ozona v atmosfere tsentralnoy chasti Evrazii [The spectral-temporal structure of variations in the total ozone content in the atmosphere of the central part of Eurasia] // *Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana.* 2006. T. 42. №2. S. 205–223. (in Russian).
- Visheratin K.N., Nerushev A.F., Orozaliev M.D., Zheng X., Sun Sh., Liu L.* Vremennaya izmenchivost obshchego sodержaniya ozona v Aziatskom regione po dannym nazemnykh i sputnikovykh izmereniy [Temporal variability of total ozone in the Asian region based on ground-based and satellite measurements] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2017. № 1. S. 59–68. (in Russian).
- WMO, World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) Data Summary. 2018. WDCGG No.42. P. 35–40.
- Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V.* Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // *Rec. Res. Devel. Geophys.* 2002. № 4. P. 249–265.