

УДК 551.510.41;551.510.534

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ NO₂ В СТРАТОСФЕРЕ И ТРОПОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОГО ПРИБОРА OMI С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2023 г. А. Н. Груздев^а, *, А. С. Елохов^а

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2022 г.

После доработки 08.10.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Выполнено сопоставление результатов измерений содержания NO₂ в вертикальных столбах стратосферы и тропосферы с помощью прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument) с борта спутника EOS–Aura в 2004–2020 гг. с результатами наземных измерений на станциях Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC), в первую очередь, – с результатами измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ЗНС). Сопоставление спутниковых данных с данными ЗНС выполнено по обоим продуктам спутниковых измерений – содержанию NO₂ в стратосферном и тропосферном столбах. При сопоставлении данных OMI с данными наземных измерений на других станциях сопоставлялись спутниковые значения содержания NO₂ в стратосферном столбе со значениями общего содержания (OC) NO₂, полученными в наземных измерениях. Соответствие между результатами спутниковых и наземных измерений характеризуется величиной разности между ними, коэффициентами линейной корреляции и коэффициентами регрессии. Разность имеет заметный сезонный ход. Корреляция и коэффициенты регрессии существенно зависят от сезона. Выявлены характерные закономерности изменения коэффициентов корреляции с широтой и особенности корреляции между спутниковыми и наземными данными в полярных и средних широтах южного полушария в весенний период. Для некоторых станций выявлена зависимость количественных характеристик соответствия между результатами спутниковых и наземных измерений от облачности. В безоблачных условиях на ЗНС отмечено ослабление корреляции между спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO₂ и усиление корреляции между значениями тропосферного содержания NO₂. Выявлена зависимость характеристик соответствия между данными спутниковых и наземных измерений от уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота. Корреляция между значениями тропосферного содержания NO₂ в окрестности ЗНС при сильном загрязнении возрастает, а корреляция между значениями стратосферного содержания NO₂ уменьшается. По результатам сопоставления спутниковых и наземных данных получены оценки верхних пороговых значений содержания NO₂ в тропосфере на разных станциях. Наименьшие значения получены для полярных станций, а наибольшее – для ЗНС, сильнее всех подверженной антропогенному загрязнению ввиду ее близости к московскому мегаполису.

Ключевые слова: NO₂, спектрометрические измерения, OMI, NDACC, сопоставление

DOI: 10.31857/S0002351523010054, **EDN:** EHNORD

1. ВВЕДЕНИЕ

Окислы азота NO и NO₂ играют ключевую роль в фотохимическом балансе атмосферного озона. Их источником в стратосфере служит фотоллиз закиси азота N₂O [1], а основным источником в нижней тропосфере служит сжигание ископаемого топлива – выбросы автомобилей и тепловых станций [2]. Окислы азота – существенный фактор антропогенного загрязнения погранич-

ного слоя атмосферы в крупных городах и промышленных районах, оказывающий вредное воздействие на здоровье людей [3].

NO₂ имеет хорошо дифференцированные полосы поглощения в видимой области спектра, и это позволяет проводить дистанционные измерения содержания NO₂ с поверхности земли и со спутников. Ряд наземных станций, выполняющих измерения содержания NO₂ в атмосфере, включены в

состав Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Используемые на ней приборы и методики определения содержания NO_2 прошли поверку в международных сравнениях.

С 2004 г. выполняются измерения содержания NO_2 с помощью прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленного на спутнике EOS-Aura. В первые годы после начала спутниковых измерений была выполнена валидация данных OMI по данным наземных измерений [4–11]. Методика восстановления содержания NO_2 по результатам измерений на приборе OMI с течением времени совершенствовалась [12, 13], и количественные оценки соответствия между данными OMI и результатами наземных измерений уточнялись [11, 14, 15]. Временной ряд содержания NO_2 , полученный по измерениям на приборе OMI, в настоящее время превышает 1.5 десятка лет, и это дает возможность использовать эти данные в разных задачах, включая анализ долговременной изменчивости.

Цель настоящей работы состоит в сопоставлении результатов многолетних измерений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере с помощью прибора OMI с результатами наземных спектрометрических измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ЗНС) и других станциях сети NDACC, полученных при пролетах спутника над станциями. Результаты сопоставления должны помочь определить условия, при которых данные OMI можно использовать для анализа долговременных трендов и межгодовой изменчивости NO_2 в различных регионах.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ, МЕТОДИК И ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

Опишем основные особенности данных измерений содержания NO_2 , и методик их получения, которые необходимо учитывать при сопоставлении, и ошибок. Сведения о них можно найти в [5, 12, 13] (OMI) и [10, 11, 16–18] (наземные измерения).

Спектрометр OMI измеряет рассеянную атмосферой Земли солнечную радиацию в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Пространственное (горизонтальное) разрешение составляет $13 \times 24 \text{ км}^2$ в надири. Для определения содержания NO_2 используется видимая часть спектрального диапазона. По результатам измерений восстанавливается содержание NO_2 . Стандартными продуктами измерений в настоящее время являются содержание NO_2 в столбе тропосферы, содержание NO_2 в столбе стратосферы и ОС NO_2 в атмосфере.

Результаты измерений содержания NO_2 с помощью прибора OMI в окрестностях наземных станций приведены в виде отдельных файлов по интернет-адресу <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMNO2/>. Файлы также содержат сопутствующую информацию о координатах области измерений и ее расстоянии от наземной станции, зенитном угле Солнца, доле облаков, давлении воздуха на уровне облаков, отражательной способности местности. Для сопоставления мы использовали данные из 10-тилометровых окрестностей наземных станций. Звенигородская станция находится на расстоянии около 40 км к западу от Московской кольцевой автодороги, а в 10–17 км южнее и севернее ЗНС проходят крупные автотрассы (Можайское, Минское и Новорижское шоссе). Поэтому радиус окрестности ограничен 10-ю км, чтобы уменьшить влияние этих источников антропогенного загрязнения пограничного слоя атмосферы окислами азота. Такое же ограничение применялось и к данным OMI для окрестностей других станций.

В работе использованы результаты измерений содержания NO_2 на станциях NDACC по рассеянному из зенита солнечному излучению в видимой области спектра. Список станций, их координаты, используемые для измерений приборы с указанием ответственных за измерения организаций, приведены в табл. 1. Измерения выполняются во время утренних и/или вечерних сумерек при восходе и заходе солнца. По измеренным спектрам рассеянной радиации определяется так называемое наклонное содержание NO_2 , и по нему рассчитывается ОС NO_2 в вертикальном столбе атмосферы [17]. На всех станциях, кроме станции Звенигород, пересчет производится путем деления наклонного содержания на воздушную массу NO_2 , которая зависит от зенитного угла Солнца и формы вертикального профиля NO_2 . Как правило, сеанс измерений проводится при значениях зенитного угла Солнца в окрестности 90° , и определяемое по наклонному содержанию общее содержание NO_2 соответствует зенитному углу солнца 90° . Используемые значения воздушной массы NO_2 при этом угле обычно находятся в пределах от 17 до 19 (табл. 2). Значения воздушной массы NO_2 задаются априори.

Воздушная масса нижнетропосферной части NO_2 при зенитных сумеречных измерениях составляет порядка единицы, поэтому чувствительность получаемого описанным выше способом ОС NO_2 к содержанию NO_2 в пограничном слое атмосферы мала – на порядок меньше, чем чувствительность к содержанию NO_2 в стратосфере. По этой причине ОС NO_2 , измеренное зенитным сумеречным методом в фоновых условиях или в

Таблица 1. Станции NDACC с наблюдениями NO₂

Станция	Широта, град	Долгота, град	Высота над уровнем моря, м	Организация, ответственная за измерения*	Прибор**
Скорсбисунн (Scoresbysund)	70.48 N	21.97 W	68	LATMOS	Спектрометр SAOZ
Соданкюля (Sodankylä)	67.37 N	26.65 E	179	LATMOS	Спектрометр SAOZ
Звенигород	55.7 N	36.8 E	200	ИФА	Сканирующий монохроматор МДР-23
Обс. От-Прованс (Obs. Haute Provence)	43.94 N	5.71 E	650	LATMOS	Спектрометр SAOZ
о. Реюньон (Reunion Isl.)	21.1 S	55.4 E	2155	LATMOS	Спектрометр SAOZ
Бауру (Bauru)	22.3 S	49.0 W	640	LATMOS	Спектрометр SAOZ
Лаудер (Lauder)	45.04 S	169.68 E	370	NIWA	Сканирующий монохроматор
					Спектрометр SAOZ
о. Кергелен (Kerguelen Isl.)	49.3 S	70.3 E	10	LATMOS	Спектрометр SAOZ
о. Маккуори (Macquarie Isl.)	54.5 S	158.95 E	6	NIWA	Сканирующий монохроматор
Дюмон-Дюрвиль (Dumont d'Urville)	66.67 S	140.0 E	20	LATMOS	Спектрометр SAOZ

* LATMOS – Laboratoire atmosphères, milieu, observations spatiales, France; NIWA – National Institute of Water and Atmospheric Research, Lauder, New Zealand; ИФА – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия.

** SAOZ – Système d'Analyse par Observation Zénithale.

Таблица 2. Среднемесячные (для января и июля) оценки случайных абсолютных и относительных (в скобках) ошибок ОС NO₂, а также среднемесячные значения воздушной массы NO₂ при зенитном угле солнца 90° и их среднеквадратичные отклонения (в скобках, в процентах)

Станция	Абсолютная (10 ¹³ см ⁻²) и относительная (%) ошибки, утро, зима/лето	Абсолютная (10 ¹³ см ⁻²) и относительная (%) ошибки, вечер, зима/лето	Возд. масса, утро зима/лето	Возд. масса, вечер зима/лето
Скорсбисунн	3.1/1.8 (2.6/0.3)	2.9/1.8 (2.3/0.3)	17.7 (0.2)/18.7 (0.1)	17.9 (~0)/18.7 (~0)
Соданкюля	6.4/2.5 (9.8/0.4)	5.8/2.3 (8.9/0.4)	17.6 (0.4)/18.7 (0.1)	17.9 (0.1)/18.7 (~0)
Звенигород*	12/18 (11.7/4.2)	14/23 (9.3/3.8)	18.5 (3.2)/18.9 (4.0)	18.9 (2.4)/18.3 (4.7)
	6.2/12 (8.5/2.5)	7.1/12 (5.7/2.0)	18.7 (3.9)/19.1 (3.6)	20.0 (3.5)/18.7 (3.5)
Обс. От-Прованс	2.0/1.7 (1.2/0.5)	1.7/2.3 (0.7/0.5)	17.7 (0.2)/18.4 (0.1)	17.8 (0.3)/18.4 (0.1)
о. Реюньон	2.9/2.8 (1.6/1.3)	2.8/3.2 (0.9/1.0)	17.6 (~0)/18.3 (~0)	17.7 (0.1)/18.1 (~0)
Бауру	2.5/3.0 (1.1/1.1)	2.8/4.0 (0.8/1.0)	17.6 (0.2)/18.4 (0.2)	17.7 (0.3)/18.2 (0.2)
Лаудер	14/15 (8.2/3.8)	15/15 (5.2/2.6)	17 (0)/17 (0)	17 (0)/17 (0)
о. Кергелен	1.4/2.3 (0.9/0.7)	1.6/3.0 (0.7/0.6)	18.0 (0.2)/18.5 (0.1)	17.9 (0.3)/18.5 (0.1)
о. Маккуори	21/21 (11.4/4.5)	20/21 (7.9/3.2)	17 (0)/17 (0)	17 (0)/17 (0)
Дюмон-Дюрвиль	3.7/1.5 (5.1/1.3)	3.5/1.6 (4.0/0.3)	18.3 (0.9)/18.6 (0.1)	18.5 (1.2)/18.6 (0.1)

* Данные для Звенигорода относятся к содержанию NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с исключением из него содержания NO₂ в ПСА. Верхний ряд значений получен по всем данным, нижний ряд – по данным с нулевым содержанием NO₂ в приземном слое.

районах с незначительным антропогенным загрязнением, считается равным содержанию NO_2 в столбе стратосферы.

На станции Звенигород (ЗНС) используется свой метод определения содержания NO_2 в вертикальном столбе по значениям измеренного наклонного содержания [10, 17]. Измерения наклонного содержания выполняются в широком диапазоне зенитных углов Солнца 84° – 96° , и, путем решения обратной задачи, с привлечением фотохимического моделирования суточного хода NO_2 , восстанавливается вертикальное распределение NO_2 . Значения содержания NO_2 приводятся к моментам времени, соответствующим зенитному углу Солнца 84° . По вертикальному распределению NO_2 рассчитываются содержания NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы и ОС NO_2 . Воздушная масса NO_2 рассчитывается на основе восстановленного вертикального профиля NO_2 . Разделение тропосферной и стратосферной частей NO_2 особенно важно в условиях антропогенного загрязнения, которому станция подвержена ввиду близости московского мегаполиса [19]. В задаче валидации результатов спутниковых измерений это разделение позволяет выполнить валидацию тропосферных и стратосферных значений содержания NO_2 .

Концентрация NO_2 в свободной тропосфере намного меньше стратосферной концентрации NO_2 , и основной вклад в интегральное содержание NO_2 в столбе тропосферы в условия загрязнения дает пограничный слой атмосферы [17, 19]. Весовые функции, характеризующие высотные распределения вкладов стратосферного и погранслоного содержаний NO_2 в измеряемое наклонное содержание NO_2 при зенитных сумеречных измерениях (так называемые усредняющие ядра), практически не перекрываются [20]. Поэтому определяемые нами значения содержания NO_2 в стратосферном и тропосферном столбах можно считать независимыми.

Использованные в работе данные измерений на станциях NDACC находятся в открытом доступе по интернет-адресу <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html#>. Содержащиеся там звенигородские данные представлены в виде значений ОС NO_2 в вертикальном столбе атмосферы, из которого исключено содержание в приземном слое атмосферы (ПСА), и содержание NO_2 в ПСА. Однако в настоящей работе мы используем значения содержания NO_2 в столбе тропосферы (0–10 км), включающее приземное содержание NO_2 , и содержание NO_2 в столбе стратосферы (10–50 км). Эти значения рассчитаны с использованием сечений поглощения NO_2 при температуре 220 К [21].

ОС NO_2 на станциях, оснащенных французскими приборами SAOZ (см. табл. 1), также определяется с использованием сечений поглощения из [21] при температуре 220 К, а для расчета ОС NO_2 на станциях, оснащенных новозеландскими приборами, используются сечения поглощения из [22] при температуре -46°C (около 227 К). Температурная зависимость сечений поглощения ни на одной из станций, включая ЗНС, не учитывается. В обработке первичных данных ОМІ использованы сечения поглощения из [21] при 220 К, но при определении содержания NO_2 вводится эмпирическая поправка на температуру [12]. Значения температуры 220 К и 227 К примерно соответствуют температуре стратосферы в окрестности высотного максимума NO_2 (~30 км на ЗНС [17, 19, 23]).

Ошибка ОС NO_2 по измерениям на приборе ОМІ определяется ошибкой измерения наклонного содержания NO_2 , неопределенностями тропосферной и стратосферной воздушных масс NO_2 и алгоритмом, используемым для разделения вкладов тропосферной и стратосферной частей NO_2 [12]. Ошибка наклонного содержания NO_2 определяется при аппроксимации (fitting) измеренного спектра солнечной радиации методом дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (Differential Optical Absorption Spectroscopy – DOAS), используемым при интерпретации спутниковых и наземных измерений [12, 17, 24]. Согласно [12], глобально осредненная ошибка содержания NO_2 в столбе тропосферы составляет порядка 10^{15} молекул/см² в безоблачных условиях, а при сплошной облачности она возрастает примерно втрое. Относительная ошибка определения тропосферного содержания NO_2 в загрязненных регионах может достигать при облачных условиях 100%. Ошибка определения содержания NO_2 в столбе стратосферы составляет около 0.2×10^{15} молекул/см².

Ошибка ОС NO_2 по измерениям на наземных станциях определяется ошибкой измерения наклонного содержания NO_2 , неопределенностью воздушной массы NO_2 и температурной зависимостью сечений поглощения NO_2 . На ошибки определения ОС NO_2 на ЗНС влияют дополнительные факторы, которые будут рассмотрены ниже. В таблице 2 приведены сведения о среднемесячных за январь и июль абсолютных и относительных ошибках общего содержания NO_2 и значениях воздушной массы NO_2 при зенитном угле солнца 90° .

Абсолютные ошибки для станций, оснащенных приборами SAOZ, кроме станции Соданкюля, невелики и намного, вплоть до порядка величины, меньше суммарной ошибки содержания

NO₂ в столбе стратосферы на приборе OMI (см. выше). Абсолютные ошибки для станций, оснащенных сканирующими монохроматорами (ЗНС, Ладдер и Маккуори) и станции Соданкюля сопоставимы по порядку величины с ошибкой измерений стратосферного содержания NO₂ на приборе OMI. Абсолютные ошибки для высокоширотных станций летом меньше, чем зимой.

Среднемесячные относительные ошибки ОС NO₂ на станциях, оснащенных приборами SAOZ, кроме станции Соданкюля, заключены в пределах от долей процента до нескольких процентов. При этом ошибки вечерних измерений меньше ошибок утренних измерений, а летние ошибки на внутритропических станциях меньше зимних ошибок (эти особенности справедливы и для других станций). Ошибки для станций, оснащенных сканирующими приборами, и станции Соданкюля существенно больше. В зимний период они могут составлять порядка 10%.

Годовые изменения воздушной массы NO₂ на большинстве станций заключены в пределах нескольких процентов, и они отражены в годовом ходе ОС NO₂. Однако внутримесячные и межгодовые вариации воздушной массы NO₂ на всех станциях, кроме ЗНС, малы (отсутствуют или, в большинстве случаев, составляют малые доли процента — см. приведенные в скобках среднеквадратичные отклонения). Поэтому приведенные в табл. 2 среднемесячные ошибки на этих станциях фактически обусловлены ошибками наклонного содержания NO₂. Согласно [12], неопределенность воздушной массы стратосферного содержания NO₂ в измерениях на приборе OMI принята равной 2%. Эти измерения выполняются в дневное время, когда зенитный угол солнца заметно меньше 90°. Естественно допустить, что неопределенность воздушной массы возрастает при зенитном угле солнца 90°.

Воздушная масса NO₂ при измерениях на ЗНС определяется по результатам восстановления вертикального профиля NO₂. Межгодовые и внутримесячные вариации воздушной массы NO₂ на ЗНС достаточно велики, их среднеквадратичное отклонение составляет 3–5% (табл. 2). Если предположить, что подобная изменчивость свойственна и другим регионам, то ошибки данных наземных измерений ОС NO₂ (кроме измерений на ЗНС) должна возрасти, при этом средние относительные ошибки должны увеличиться на несколько процентов.

Оценим погрешность определения содержания NO₂, связанную с пренебрежением температурной зависимостью сечений поглощения NO₂. Значения содержания NO₂, полученные с использованием приведенных в [21] сечений погло-

щения при значениях температуры 220 и 294 К, отличаются между собой примерно на 18% (для спектрального диапазона 435–450 нм, используемого в наблюдениях на ЗНС) при большем значении для более высокой температуры. Расчеты температуры воздуха для ЗНС по данным реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>) дают многолетнее среднемесячное значение температуры в окрестности стратосферного максимума NO₂ около 220 К в январе и 235 К в июле, а в ПСА — 267 К в январе и 292 К в июле. Следовательно, из-за пренебрежения температурной зависимостью сечений поглощения NO₂ стратосферное содержание NO₂ по измерениям на ЗНС в среднем занижено в июле примерно на 4%. Аналогично, содержание NO₂ в ПСА занижено в среднем на 11% в январе и 18% в июле.

С другой стороны, так как при восстановлении содержания NO₂ по значениям наклонного содержания не учитывается многократное рассеяние [17], то значения содержания NO₂ в нижней тропосфере завышены по сравнению с теми, которые могли бы быть получены при учете многократного рассеяния. Это обусловлено тем, что, увеличение поглощения NO₂ в результате многократного рассеяния приводит к увеличению воздушной массы NO₂ в слое нижней тропосферы по сравнению со значением массы в приближении однократного рассеяния.

Случайная ошибка содержания NO₂ в нижней тропосфере сильно варьирует в зависимости от уровня и стабильности загрязнения ПСА. Относительная ошибка содержания NO₂ в ПСА на ЗНС варьирует от 5 до 100%. Например, она мала в стабильных условиях с большим содержанием NO₂ и велика при малых значениях содержания NO₂ в ПСА. Среднемноголетние абсолютные ошибки содержания NO₂ в ПСА на ЗНС равны 0.24×10^{15} и 0.29×10^{15} молекул/см² утром и вечером, соответственно, что составляет порядка 20% от среднемноголетних значений содержания NO₂.

Дополнительная неопределенность оценок содержания NO₂ связана с вариациями атмосферных параметров, влияющих на стратификацию атмосферы и поглощение солнечной радиации в используемом для измерений спектральном диапазоне. Это, в первую очередь, вариации температуры и содержания озона. В методике наблюдений, используемой на ЗНС, их влияние на точность восстановления содержания NO₂ осуществляется через влияние на фотохимические процессы, описываемые фотохимической моделью, и радиационные процессы в модели переноса излучения.

Для оценки чувствительности определяемого по измерениям содержания NO₂ к изменениям

Таблица 3. Чувствительность содержания NO_2 к вариациям температуры T и/или содержания O_3 на величину среднеквадратичного отклонения в задаче восстановления вертикального профиля NO_2^*

Вариант изменения T и O_3	Стратосфера, январь/июль, %	Тропосфера без ПСА, январь/июль, %	ПСА, январь/июль, %
1. T в стратосфере	3.3/1.4 3.7/1.5	–8.7/–1.0 –12/–1.3	–60/–69 –60/–70
2. T в тропосфере	0.07/0.02 –0.08/0.01	–4.3/–0.43 2.2/–0.50	2.6/–0.61 2.7/–0.40
3. T в стратосфере и тропосфере	3.3/1.4 3.6/1.5	–7.7/–0.43 –9.8/–1.1	–60/–68 –57/–69
4. O_3 в стратосфере	0.47/0.2	–1.1/1.8	–18/–17
5. O_3 в тропосфере	0.04/0.01	–4.3/–0.5	2.9/–0.02
6. O_3 в стратосфере и тропосфере	0.45/0.16	–1.1/2.1	–18/–15
7. T и O_3 в стратосфере	3.9/1.7 4.1/1.8	–12/–0.71 –20/0.07	–67/–91 –65/–96

* Верхние строчки — при учете вариаций T и O_3 только в фотохимической модели, нижние строчки — при их учете в фотохимической модели и в модели переноса излучения. Наличие одной строчки означает, что результаты двух вариантов совпадают.

этих параметров выполнено специальное исследование. В нем использованы рассчитанные по данным реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>) соответствующие географическому положению ЗНС многолетние среднемесячные профили температуры и концентрации озона и их среднеквадратичные отклонения. По многолетним среднемесячным профилям NO_2 за весь период измерений на ЗНС (с 1990 г.) решена прямая задача, и в результате получены значения наклонного содержания NO_2 в диапазоне зенитных углов солнца $84\text{--}96^\circ$, имитирующие результаты измерений. В прямой задаче использованы среднемесячные профили температуры (и соответствующие им профили плотности воздуха). Затем по полученным значениям наклонного содержания NO_2 решались обратные задачи с использованием возмущенных профилей температуры и/или озона. Возмущения задавались в различных сочетаниях в соответствии со среднеквадратичными отклонениями. Полученные значения содержания NO_2 сопоставлялись со значениями, соответствующими профилям NO_2 , восстановленным с использованием невозмущенных профилей температуры и озона. Разность содержаний NO_2 , восстановленных при возмущенных и невозмущенных условиях, характеризует чувствительность NO_2 к вариациям температуры и озона и служит оценкой неопределенности результатов измерений, связанной с изменчивостью этих параметров обратной задачи.

Результаты приведены в табл. 3. В ней представлены рассчитанные изменения содержания

NO_2 в столбах стратосферы, тропосферы выше ПСА и в ПСА, обусловленные возмущением исходных профилей температуры (T) и озона (O_3) на величину их среднеквадратичных отклонений. Показаны результаты для января и июля. Рассмотрены семь вариантов возмущения профилей: по отдельности в стратосфере (варианты 1 и 4), тропосфере (2 и 5), одновременно, но с разным знаком, в стратосфере и тропосфере (3 и 6), а также одновременные возмущения профилей T и O_3 одного знака в стратосфере (7). Для каждого варианта рассмотрены два случая. Один, представленный в табл. 3 верхними рядами значений, — когда при решении обратной задачи возмущения учитывались только в фотохимической модели. Во втором случае возмущения профилей T и O_3 учитывались в полной мере, то есть в модели переноса излучения и в фотохимической модели (нижние ряды значений). При совпадении результатов для этих случаев приведена одна строчка оценок чувствительности. Положительный знак значений в таблице указывает на то, что изменение содержания NO_2 имеет тот же знак, что и возмущение параметров T или O_3 , а отрицательный знак — на противоположность знаков изменения содержания NO_2 и возмущения параметра.

Сопоставление значений в верхних и нижних строчках табл. 3 показывает, что основная часть неопределенности содержания NO_2 , обусловленная неопределенностью задания атмосферных параметров, связана с изменением содержания NO_2 во время сеанса измерений вследствие фотохимических процессов. При этом чувствитель-

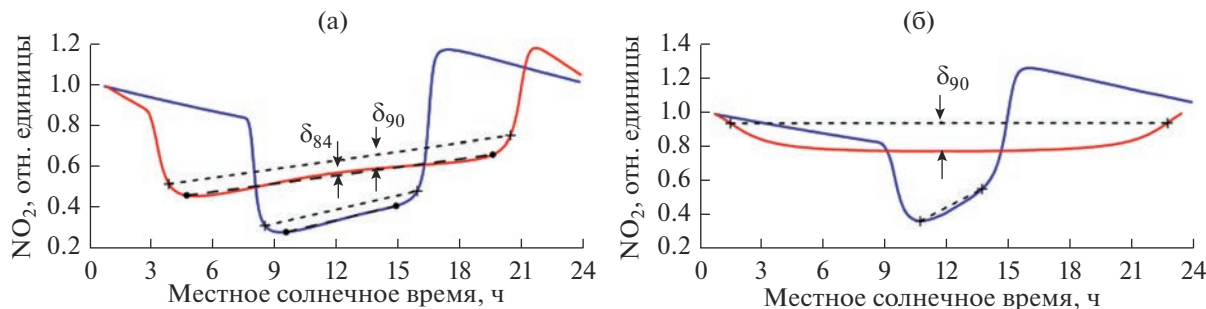


Рис. 1. Суточный ход содержания NO_2 в столбе стратосферы по расчетам с помощью фотохимической модели для условий середины января (синие кривые) и середины июля (красные кривые) на широтах станций Звенигород (а) и Соданкюля (б). Точки на кривых соответствуют зенитным углам Солнца 84° , крестики – зенитным углам Солнца 90° . Штриховые и пунктирные прямые – линейные интерполяции между парами значений содержания NO_2 при зенитных углах Солнца 84° и 90° , соответственно. Параметры δ_{84} и δ_{90} – корректирующие добавки к линейно интерполированным значениям содержания NO_2 .

ность NO_2 в тропосфере выше ПСА к вариациям T и O_3 значительно больше, чем чувствительность стратосферной NO_2 , а чувствительность NO_2 в ПСА к вариациям стратосферной температуры и с стратосферного озона многократно превосходит соответствующие значения чувствительности для стратосферы и тропосферы. Чувствительность NO_2 во всех слоях к вариациям стратосферной температуры больше, чем к вариациям тропосферной температуры (ср. варианты 1 и 3 с вариантом 2). Чувствительность стратосферной NO_2 к вариациям T и O_3 зимой существенно больше, чем летом. В большинстве случаев это справедливо и в отношении тропосферной NO_2 .

Неопределенность стратосферной температуры вызывает неопределенность до 4% зимой и около 1.5% летом в стратосферном содержании NO_2 , до 10% зимой и около 1% летом в тропосферном содержании NO_2 и до 70% в содержании NO_2 в ПСА. Вариации тропосферной температуры приводят к неопределенности в 2–3% в зимнем содержании NO_2 в тропосфере и ПСА. Эффект вариаций O_3 значительно слабее эффекта вариаций температуры. Однако их одновременное воздействие приводит к увеличению неопределенности содержания NO_2 до 20% зимой в тропосфере и до 100% летом в ПСА (вариант 7 в табл. 3).

3. ПРИНЦИПЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Результаты наземных и спутниковых измерений были подвергнуты статистической проверке с целью отбраковки из них больших выбросов. Отбраковка проводилась по данным измерений стратосферного (ОМІ и ЗНС) или общего содержания NO_2 (другие станции). Если какое-то значение выходило за пределы четырехкратного среднеквадратичного отклонения относительно многолетнего среднемесячного значения содержания

NO_2 , то оно исключалось из данных, предназначенных для сопоставления. Одновременно с ним исключалось соответствующее ему значение содержания NO_2 в тропосфере (в случае с ОМІ и ЗНС). Эта процедура была повторена итерационно до исчезновения выбросов.

Данные наблюдений, предназначенные для сопоставления, должны по возможности максимально соответствовать друг другу по месту и времени наблюдений. Высокое пространственное разрешение прибора ОМІ и приблизительно полярная солнечно синхронизованная орбита спутника позволили получить довольно большие выборки измерений содержания NO_2 в окрестностях станций наземных наблюдений.

Содержание NO_2 имеет значительный суточный ход. Поэтому результаты наземных наблюдений NO_2 интерполировались по времени к моментам, соответствующим наблюдениям со спутника. Большинство спутниковых данных получено в дневное время суток. На рис. 1 приведены рассчитанные для середины января и середины июля суточные изменения содержания NO_2 в столбе стратосферы на широтах станций Звенигород и Соданкюля. Расчеты выполнены с помощью одномерной фотохимической модели, используемой в методе восстановления вертикального распределения NO_2 на ЗНС [10, 11, 17]. Фотохимически обусловленные изменения стратосферного содержания NO_2 в дневное время суток относительно медленные и достаточно просто могут быть учтены с использованием рассчитанного суточного хода NO_2 , который предполагает, в частности, что при прочих равных условиях в течение дня происходит увеличение стратосферного содержания NO_2 . Более того, изменение содержания NO_2 в период между утренним и вечерним значениями зенитного угла Солнца 84° квазилинейны во времени,

отклоняясь от линейной зависимости (штриховые прямые на рис. 1а) лишь на небольшую величину, обозначенную δ_{84} . Однако интерполяция утреннего и вечернего значений содержания NO_2 , соответствующих зенитному углу Солнца 90° , к дневным условиям требует гораздо большей поправки δ_{90} (рис. 1а, 1б).

Способ приведения данных наземных измерений ко времени измерений со спутника состоял в следующем. Если на день измерений со спутника имелись данные и утренних, и вечерних измерений, то выполнялась их интерполяция ко времени спутниковых измерений. Значения содержания NO_2 , полученные по утренним и вечерним наземным измерениям линейно интерполировались ко времени спутниковых измерений. Затем по результатам расчетов с помощью фотохимической модели для данного календарного дня и соответствующей широты проводилась линейная интерполяция на это же время суток модельных значений стратосферного содержания NO_2 для утра и вечера при зенитных углах Солнца 84° (в случае ЗНС) или 90° (в случае других станций). Разность между точным расчетным значением и интерполированным значением для этого момента времени (δ_{84} или δ_{90}) затем добавлялась к значению содержания NO_2 (содержанию в стратосферном столбе в случае ЗНС и ОС в случае других станций), полученному интерполяцией экспериментальных результатов. Полученное значение содержания NO_2 рассматривалось как результат наземных измерений, соответствующий по времени значению, полученному с помощью прибора ОМІ. Если значению содержания NO_2 , измеренному со спутника, соответствовало только утреннее или только вечернее значение содержания NO_2 , полученное в наземных измерениях, то приведение результатов наземных измерений ко времени спутниковых измерений выполнялось (экстраполировалось) на основании лишь кривых рассчитанного суточного хода NO_2 . Значение тропосферного содержания NO_2 (только для ЗНС) приписывалось моменту измерений со спутника неизменным, без учета фотохимических изменений.

Из-за разной геометрии наблюдений горизонтальное разрешение наземных и спутниковых данных различается. Разрешение данных ОМІ находится в пределах нескольких десятков километров ($13 \text{ км} \times 24 \text{ км}$ в надире). При наземных зенитных сумеречных наблюдениях горизонтальное разрешение тропосферных данных определяется в основном полем зрения прибора. Поскольку основной вклад в тропосферное содержание NO_2 во время эпизодов загрязнения вносит ПСА, то горизонтальное разрешение этих данных не хуже

нескольких сотен метров, то есть данные относятся к малой окрестности станции.

В алгоритме определения стратосферного содержания NO_2 по данным ОМІ над областями с тропосферным загрязнением используются процедуры привязки оценок стратосферного содержания NO_2 к координатной сетке $1^\circ \times 1^\circ$, сглаживания с прямоугольным окном $5^\circ \times 3^\circ$ (примерно $300 \times 300 \text{ км}^2$ в средних широтах) и интерполирования к координатам центра пикселя (области, определяемой полем зрения прибора) [12]. Сглаживание приводит к удалению из поля стратосферного содержания NO_2 неоднородностей с масштабами, меньшими масштаба осреднения.

Оценку горизонтального разрешения сумеречных измерений стратосферного содержания NO_2 получим, умножая ширину стратосферного слоя NO_2 на воздушную массу NO_2 . При ширине слоя около 20 км [17] и воздушной массе порядка 20 (табл. 2) получим разрешение $\sim 400 \text{ км}$ при зенитном угле солнца 90° . Аналогичная оценка при зенитном угле солнца 96° возрастает примерно вдвое. Таким образом, горизонтальное разрешение значений содержания NO_2 в стратосферном столбе на ЗНС не хуже 800 км , а разрешение значений ОС NO_2 на других станциях — порядка 400 км . Получаемые значения содержания NO_2 в стратосферном столбе соответствуют не области, расположенной непосредственно над станцией, но области, центр которой отстоит от станции примерно на 400 км в случае ЗНС и 200 км в случае других станций. Отметим, что горизонтальное разрешение (масштаб осреднения) данных наземных измерений при зенитном угле солнца 90° сопоставимо по порядку величины с масштабом сглаживания стратосферных данных ОМІ.

Полученные оценки горизонтального разрешения стратосферных данных наземных измерений намного меньше масштаба зональных неоднородностей в стратосфере, обусловленных в период с конца осени по начало весны крупномасштабными возмущениями с зональными волновыми числами 1 и 2. Масштаб неоднородности стратосферных полей в летний период меньше, но при этом меньше и степень (амплитуда) неоднородностей.

Направления, в которых ориентированы наземные сумеречные наблюдения зимой и летом отклоняются от зональных направлений к югу и северу, соответственно. Согласно [25], изменения ОС NO_2 с широтой в окрестности ЗНС летом относительно невелики, но зимой в поясе примерно от 45° N до 65° N отмечается устойчивое убывание ОС NO_2 с широтой. С учетом приведенных выше оценок горизонтального разрешения

для стратосферного содержания NO_2 и приведенного в [25] широтного хода ОС NO_2 получим, что получаемые из измерений на ЗНС значения стратосферного содержания NO_2 , возможно, в среднем завышают содержание NO_2 над станцией примерно на 10% зимой и занижают его примерно на 5% летом.

В работе использованы данные спутниковых измерений в 10-км окрестностях станций. Величина окрестности влияет на результаты сопоставления. Соответствие между спутниковыми и наземными данными улучшается при уменьшении окрестности до размеров, сопоставимых с горизонтальным разрешением данных ОМІ. Так, коэффициент корреляции между значениями содержания NO_2 в столбе тропосферы на ЗНС по наземным и спутниковым данным возрастает от 0.46 до 0.66, а величина невязки между данными уменьшается с уменьшением радиуса окрестности от 30 км до 5 км. При этом число пар сопоставляемых значений при радиусе 5 км уменьшается на порядок по сравнению с числом пар при радиусе 30 км, что ухудшает статистическую обеспеченность результатов. При радиусе окрестности 10 км объем сопоставляемых данных вдвое больше, чем при радиусе 5 км, но составляет менее трети доступных для сопоставления данных измерений на ЗНС.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Поскольку измерения на ЗНС дают значения содержания NO_2 в тропосфере и стратосфере, аналогичные типовым продуктам измерений с помощью прибора ОМІ, то основная часть представленных в статье результатов получена при сопоставлении данных ОМІ с результатами измерений на ЗНС.

4.1. Общие характеристики сопоставления

Значения содержания NO_2 в столбах стратосферы и тропосферы в окрестности ЗНС по результатам спутниковых и наземных измерений приведены на рис. 2а, 2в. Стратосферное содержание NO_2 испытывает значительный годовой ход с минимумом в январе ($\sim 10^{15}$ молекул/см²) и максимумом в июле (около 4.5×10^{15} молекул/см²), уверенно воспроизводимый наземными и спутниковыми данными. Результаты спутниковых и наземных измерений тропосферного содержания NO_2 гораздо хуже соответствуют друг другу (рис. 2в). Причиной этому могут служить пространственная (горизонтальная) неоднородность поля NO_2 в подверженном антропогенному загрязнению слое атмосферы, большая временная изменчивость NO_2 в ПСА и разная степень осреднения

(разное горизонтальное разрешение) спутниковых и наземных данных. Тем не менее, на основании тех и других данных выявляются определенные закономерности временного поведения тропосферного содержания NO_2 в окрестности ЗНС: большое содержание NO_2 чаще наблюдается зимой, чем летом.

Разность (невязка) между значениями содержания NO_2 , измеренными со спутника и с земли (данные ОМІ минус данные ЗНС) приведена на рис. 2б, 2г для стратосферы и тропосферы, соответственно. Разность стратосферных содержаний варьирует вокруг нуля с амплитудой годовых колебаний около 0.3×10^{15} молекул/см². Содержание NO_2 в стратосферном столбе по данным ОМІ в январе в целом несколько выше, а в июле — ниже, чем это следует из результатов измерений на ЗНС. Среднее за весь период сопоставления расхождение составляет около 0.03×10^{15} молекул/см², или около 1% в относительных единицах.

Отмеченное расхождение не может быть следствием того, что в наземных данных не учтена температурная зависимость сечений поглощения NO_2 . Ее учет привел бы к увеличению летних значений содержания NO_2 , полученных из наземных измерений примерно на 0.2×10^{15} молекул/см² в июле (см. раздел 2) и, следовательно, к увеличению разности. Расхождение на рис. 2б также нельзя связать с сезонными изменениями азимута сумеречных зенитных наблюдений при наличии широтного хода NO_2 . Вызванные этим поправки, оцененные в разделе 3, привели бы к усилению расхождения. Возможно, разность уменьшилась бы, если бы при определении стратосферного содержания NO_2 по наземным данным учитывались годовые изменения высоты тропопаузы.

Разность тропосферных значений содержания NO_2 не имеет столь же ярко выраженного сезонного хода (рис. 2г). В целом, содержание NO_2 в тропосферном столбе по данным ОМІ обычно больше, чем по данным наземных измерений на ЗНС. Среднее за период сопоставления превышение составляет 1.2×10^{15} молекул/см², или около 25% в относительных единицах. Учет температурной зависимости сечений поглощения NO_2 мог бы, вероятно, уменьшить среднемноголетнее расхождение, поскольку такой учет мог бы увеличить зимние значения тропосферного содержания NO_2 по наземным данным в среднем на величину $\sim 10^{15}$ молекул/см² зимой и около 0.4×10^{15} молекул/см² летом.

Другая причина того, что тропосферное содержание NO_2 по данным ОМІ в целом больше, чем по данным измерений на ЗНС, кроется в существенном различии пространственного разреше-

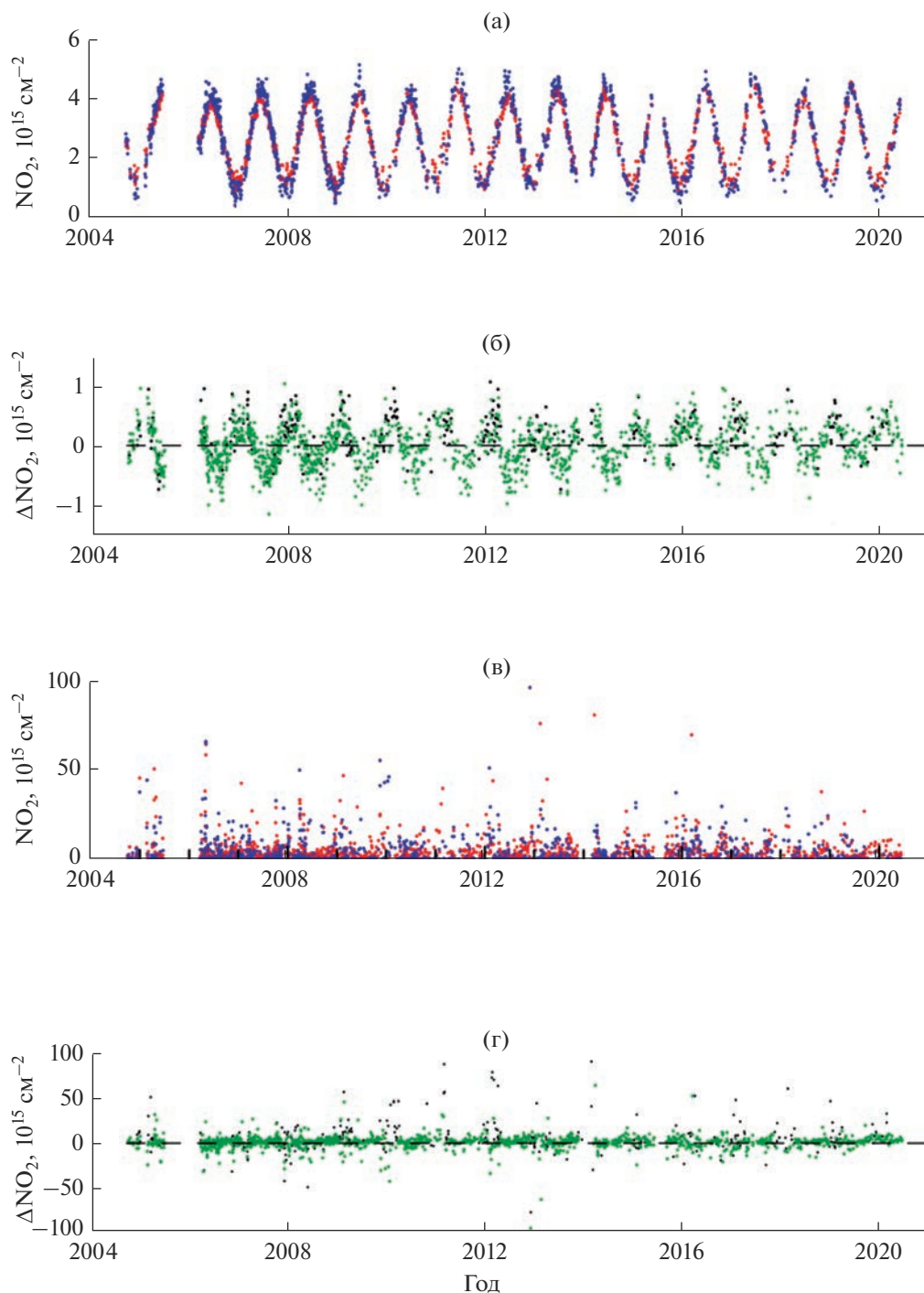


Рис. 2. Содержание NO_2 в столбах стратосферы (а) и тропосферы (в) в окрестности ЗНС по результатам измерений со спутника с помощью прибора ОМІ (красные точки) и по результатам наземных измерений (синие точки), а также разности (спутниковые значения минус звенигородские значения) между стратосферными (б) и тропосферными (г) содержаниями NO_2 . Черные точки на графиках б и г соответствуют облачным условиям с долей облаков 0.99–1, зеленые точки — с долей облаков от 0 до 0.99.

ния тех и других данных при горизонтальной неоднородности поля NO_2 в ПСА в окрестности ЗНС. Согласно разделу 3, увеличение окрестности, из которой выбираются данные ОМІ, приводит к увеличению их расхождения с данными

ЗНС, то есть к включению в сопоставление более высоких значений тропосферного содержания NO_2 по данным ОМІ. Отсюда следует, что окрестность ЗНС в целом сильнее загрязнена окислами азота, чем территория ЗНС. Поэтому поле зрения

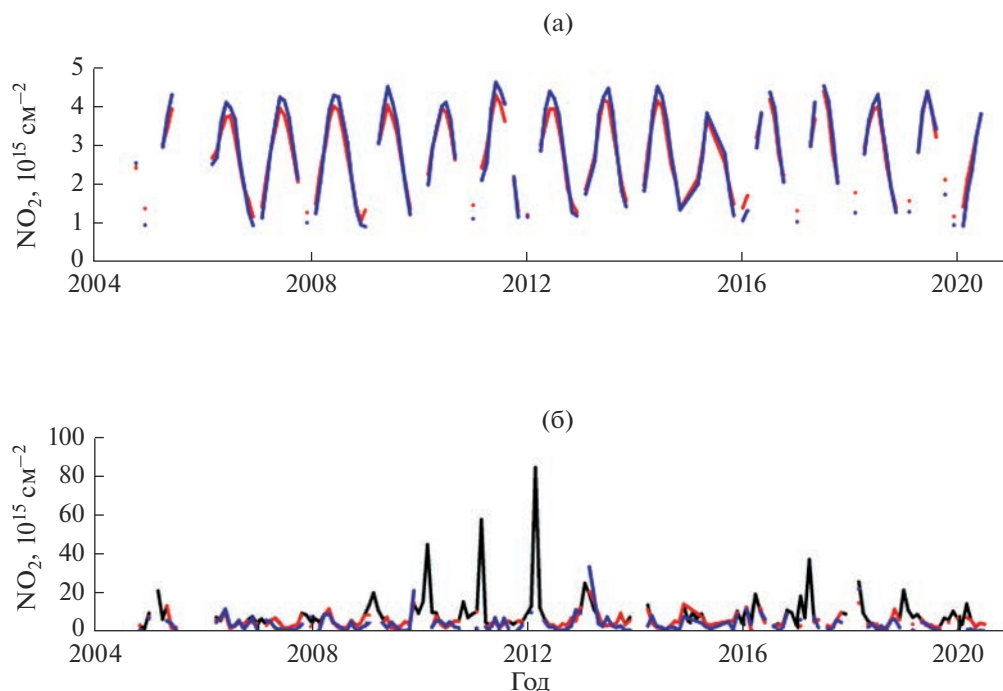


Рис. 3. Среднемесячные значения содержания NO_2 в стратосферном (а) и тропосферном (б) столбах в окрестности ЗНС по результатам измерений с помощью прибора OMI (красные кривые) и по наземным измерениям (синие кривые) по данным с верхним пороговым значением доли облаков 0.99. Черная кривая на графике б — среднемесячные значения содержания NO_2 в тропосфере по данным OMI в отсутствие ограничения на облачность.

прибора OMI включает участки, в среднем более загрязненные, чем ЗНС.

Черными точками на рис. 2б, 2г показаны значения разности содержания NO_2 по данным прибора OMI с данными наземных измерений в условиях сплошной облачности со значениями доли облаков (cloud fraction) более 0.99. Эти значения существенно ухудшают соответствие спутниковых данных данным наземных измерений на ЗНС, и в дальнейшем они исключены из рассмотрения. Данные OMI, полученные в облачных условиях с такими же показателями доли облаков исключены из рассмотрения и при сопоставлении результатов спутниковых и наземных измерений над другими станциями.

На рис. 3 приведены среднемесячные значения содержания NO_2 в столбах стратосферы и тропосферы, рассчитанные по результатам спутниковых и наземных измерений на ЗНС. Число дней, по которым рассчитывались среднемесячные, не менее трех. Соответствие между спутниковыми и наземными данными для стратосферы довольно хорошее, но амплитуда годового хода NO_2 по данным OMI меньше, чем по данным наземных измерений. Межгодовые вариации, наиболее легко выявляемые визуально по годовым экстремумам годового хода, присутствуют и в тех, и в других данных.

Рисунок 3б показывает, что в целом имеется качественное соответствие временного хода среднемесячных значений тропосферного содержания NO_2 по данным OMI и временного хода NO_2 по данным наземных измерений после наложения указанных выше ограничений на облачность (ср. синюю и красную кривые). В годовом ходе можно отметить зимне-весенний максимум и летний минимум. Игнорирование ограничений на облачность приводит к существенному изменению среднемесячных значений тропосферного содержания NO_2 по данным OMI — их резкому возрастанию в отдельные годы зимой (черная кривая на рис. 3б).

Разность — лишь один из количественных показателей соответствия между результатами измерений. Оценку линейной связи между ними получим с помощью линейной регрессии. На рис. 4 приведены корреляционные диаграммы стратосферного и тропосферного содержаний NO_2 в окрестности ЗНС по результатам наземных и спутниковых измерений. Синий цвет соответствует суточным значениям, а красный цвет — среднемесячным значениям содержания NO_2 . Уравнения регрессий, описывающие зависимость содержания NO_2 по данным OMI от содержания NO_2 по данным наземных измерений, и значения коэффициентов корреляции приведены на графиках (нижний

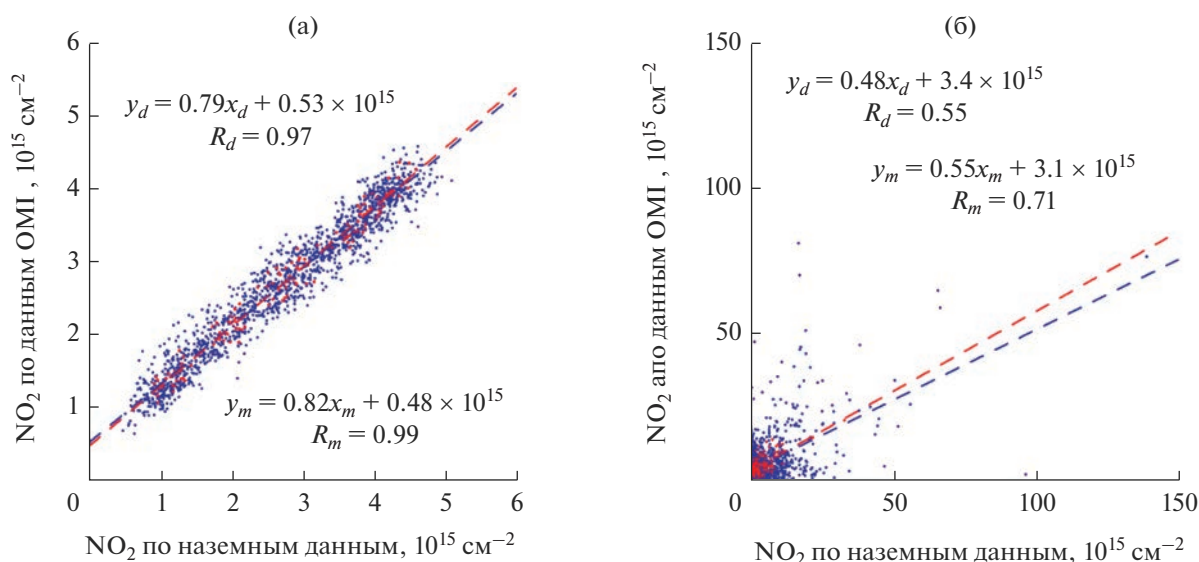


Рис. 4. Корреляционные диаграммы стратосферного (а) и тропосферного (б) содержания NO_2 в окрестности ЗНС по результатам наземных и спутниковых измерений. Синий цвет — суточные значения, красный цвет — среднемесячные значения. Штриховые прямые соответствующего цвета — линейная регрессия данных ОМИ на данные наземных измерений. Уравнения регрессии приведены на графиках.

индекс d — для суточных, индекс m — для среднемесячных значений).

Коэффициент корреляции между стратосферными значениями высокий и составляет 0.97 при использовании ежедневных данных и 0.99 при использовании среднемесячных данных. Доля дисперсии стратосферного содержания NO_2 по данным ОМИ, обусловленная их линейной связью с результатами наземных измерений (коэффициент детерминации), составляет в этих случаях 94 и 98% от полной дисперсии, соответственно. Коэффициент наклона прямых регрессии меньше единицы (~ 0.8), что вызвано, в частности, различием амплитуд годового хода стратосферной NO_2 по данным ОМИ и наземных измерений. Следует отметить, что, несмотря на близость к нулю средней разности между стратосферными значениями содержания NO_2 (рис. 2б; см. также рис. 7а), свободный член уравнения линейной регрессии (рис. 4а) существенно отличается от нуля. Его значение составляет около $2/3$ от диапазона годовых колебаний разности.

Коэффициент корреляции между значениями тропосферного содержания NO_2 меньше: 0.55 при использовании суточных данных и 0.71 при использовании среднемесячных данных (рис. 4б). Доля дисперсии тропосферного содержания NO_2 по данным ОМИ, обусловленная их линейной связью с результатами наземных измерений, составляет в этих случаях 30 и 50% от полной дисперсии, соответственно. Коэффициент наклона регрессионных прямых примерно вдвое меньше

единицы, а свободный член уравнения регрессии намного выше нуля. Он почти втрое превышает среднюю разность между тропосферными значениями содержания NO_2 (рис. 2г; см. также рис. 7б).

Перейдем к сравнению результатов измерений с помощью прибора ОМИ с результатами измерений на других станциях NDACC. Примеры временных рядов содержания NO_2 по наземным измерениям на станциях Соданкюля и От-Прованс и по соответствующим им данным ОМИ приведены на рис. 5. ОС NO_2 по наземным измерениям на станциях сравнивается на рис. 5а и 5в с результатами измерений ОС NO_2 со спутника, а на рис. 5б и 5г эти же наземные данные сравниваются с результатами спутниковых измерений содержания NO_2 в столбе стратосферы. Из сопоставления спутниковых и наземных данных очевидно, что тропосферное содержание NO_2 составляет значительную долю измеренного прибором ОМИ ОС NO_2 (заметим, что масштаб вертикальных осей на рис. 5а и 5в логарифмический). Эта доля особенно значительна для станции От-Прованс, расположенной в Западной Европе. Соответствие между собой спутниковых и наземных значений содержания NO_2 на рис. 5б, г намного лучше, чем на рис. 5а, в. Вклад тропосферной NO_2 в ОС NO_2 по данным наземных измерений выявить трудно. Однако на рис. 5г можно отметить больший разброс данных наземных измерений на станции От-Прованс по сравнению с разбросом спутниковых данных, что служит указанием на то, что загрязнение нижней тропосферы в окрестности этой

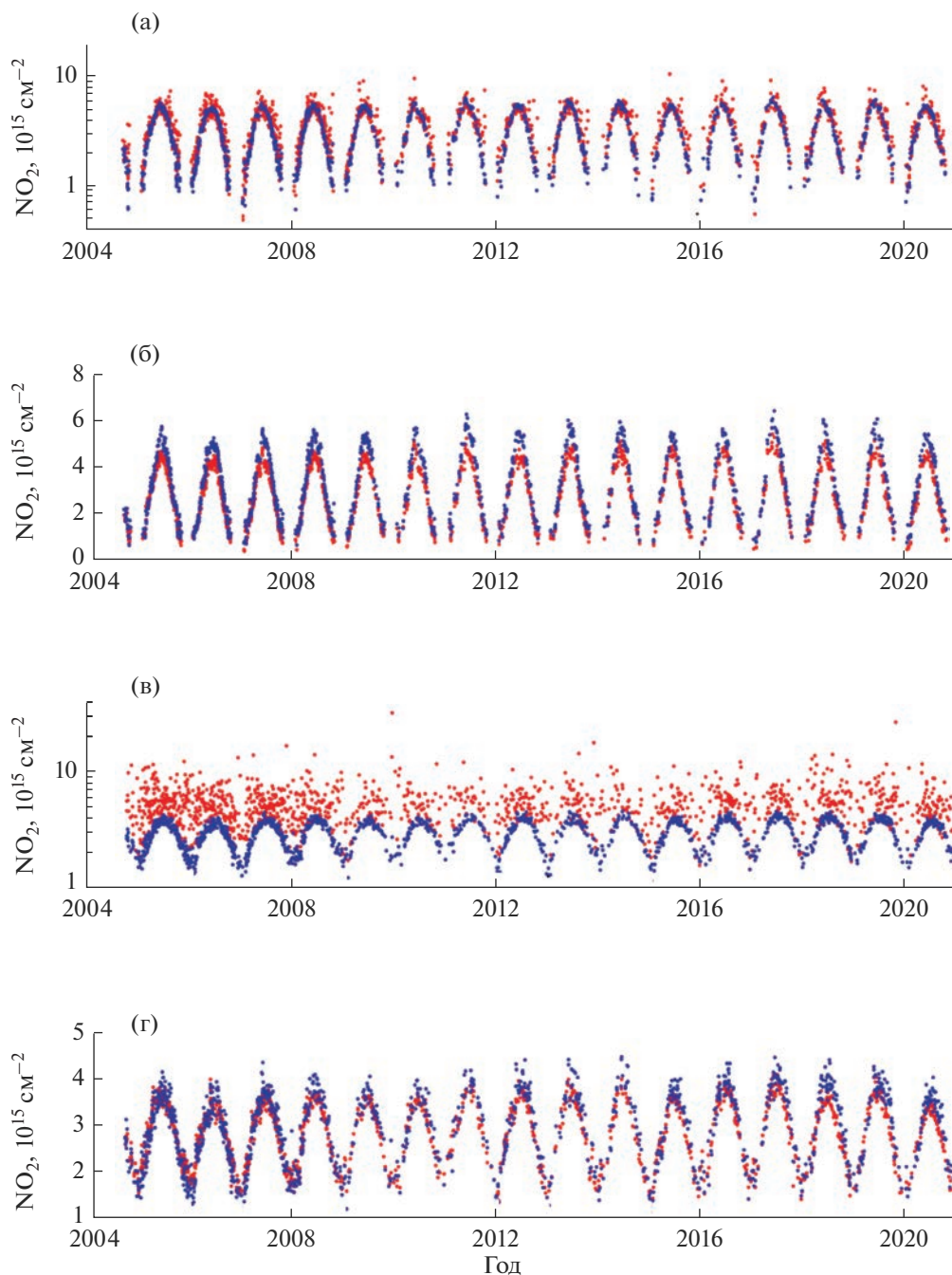


Рис. 5. а–б: Общее содержание NO_2 (а) и содержание NO_2 в стратосферном столбе (б) по данным OMI (красные точки) в сравнении с общим содержанием NO_2 по данным наземных измерений (синие точки) на станции Соданкюля. в–г: аналогично а–б, но для станции Обсерватория От-Прованс.

станции влияет на результаты наземных измерений ОС NO_2 .

Разности между результатами спутниковых измерений содержания NO_2 в стратосферном столбе и результатами наземных измерений ОС NO_2 на ряде станций, оснащенных однотипными приборами (SAOZ) приведены на рис. 6. Графики приведены в порядке изменения широты станций

в направлении от Арктики к Антарктике. Все разности имеют годовой ход, качественно похожий на годовой ход разности между стратосферными значениями содержания NO_2 в окрестности ЗНС на рис. 2б. Минимумы разностей приходятся на лето, а максимумы — на зимне-весенний период. Вариации разностей на рис. 6 составляют тот же порядок величины, что и на рис. 2б. Средняя раз-

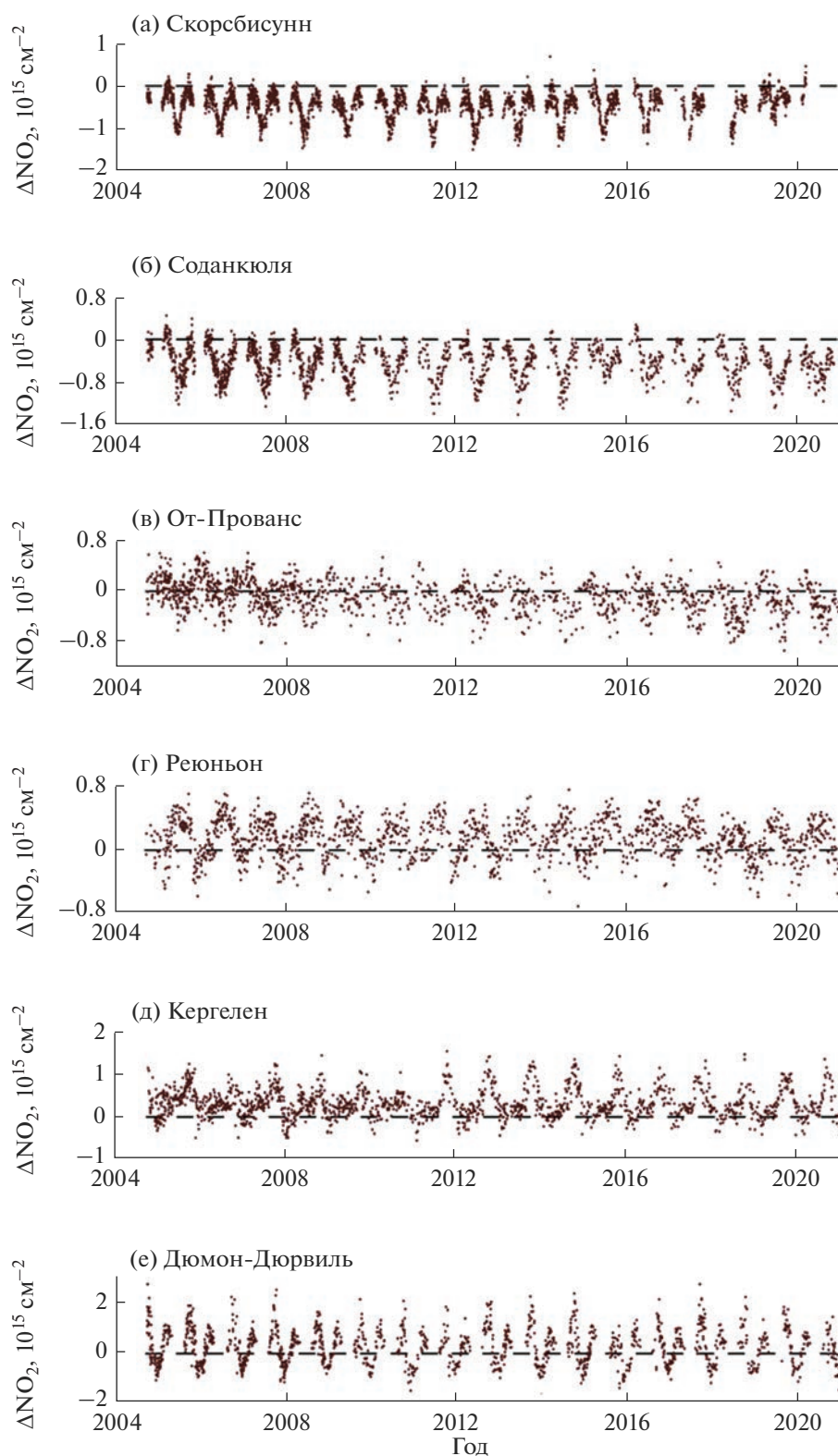


Рис. 6. Разности между стратосферным содержанием NO₂ по данным OMI и общим содержанием NO₂ по данным наземных измерений на станциях Скорсбисунн (а), Соданкюля (б) От-Прованс (в), Реюньон (г), Кергелен (д) и Дюмон-Дюрвиль (е).

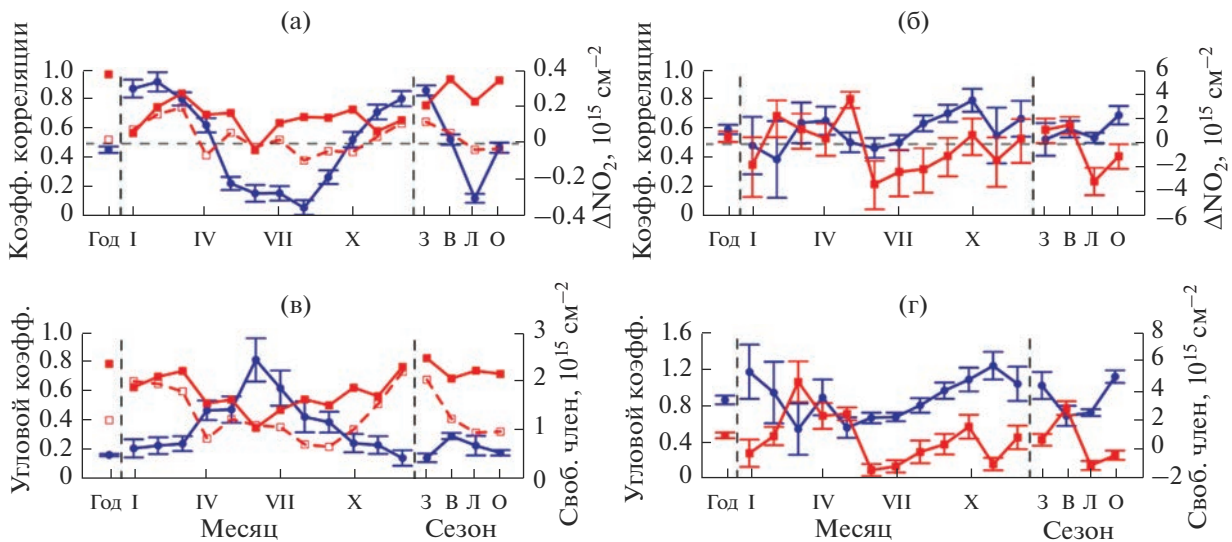


Рис. 7. а–б: годовые, месячные и сезонные значения коэффициента корреляции (красный цвет) и разности (синий цвет) между значениями содержания NO_2 в столбе стратосферы (а) и тропосферы (б) по данным ОМІ и данным наземных измерений на ЗНС. в–г: годовые, месячные и сезонные значения углового коэффициента (красный цвет) и свободного члена (синий цвет) линейной регрессии стратосферных (в) и тропосферных (г) значений содержания NO_2 по данным ОМІ на аналогичные значения содержания NO_2 по данным наземных измерений на ЗНС. Сплошные кривые и сплошь заполненные символы – без вычитания годового хода из данных, штриховые кривые и незаполненные символы – при вычитенном годовом ходе из данных. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы.

ность для большинства станций заметно отличается от нуля, и ее знак может быть разным на разных станциях.

4.2. Сезонная и широтная зависимости характеристик сопоставления

Высокая корреляция между стратосферными содержаниями NO_2 (рис. 4а) в значительной степени обусловлена сильным годовым ходом NO_2 , основные особенности которого воспроизводятся и наземными, и спутниковыми данными (рис. 2а, 3а, 5б, 5г). Однако корреляция заметно снижается, если ее определять по данным за отдельные сезоны или месяцы. На рис. 7а красным цветом показаны коэффициенты корреляции (КК) между спутниковыми и наземными значениями содержания NO_2 в стратосферном столбе на ЗНС, рассчитанные по всем данным, по данным за все месяцы года и по данным за четыре сезона: зиму, весну, лето и осень. Доверительные интервалы для КК не показаны, чтобы не перегружать график. Они существенно меньше самих значений КК. Если не удалять из данных годовой ход, то КК имеет вполне характерную сезонную зависимость с весенним и осенним максимумами и зимним и летним минимумами (сплошная кривая). Минимальное значение в июне составляет лишь 0.4, а максимальное в марте равно 0.8. Более высокие КК весной и осенью обусловлены более быстрыми в эти периоды сезонными изменениями стра-

тосферного содержания NO_2 (рис. 2а, 3а). Увеличение КК при расчете их по сезонам (правая часть рис. 7а), а не по месяцам, тоже вызвано влиянием годового хода NO_2 .

Отмеченные качественные особенности сезонной зависимости КК между результатами спутниковых и наземных измерений в целом характерны и для других станций, за исключением антарктической станции Дюмон–Дюрвиль и ближайшей к ней среднеширотной станции Маккуори (см. табл. 1). Самые низкие значения КК для этих двух станций отмечены весной (около 0.4 в октябре и 0.2 в сентябре, соответственно).

Штриховая красная кривая на рис. 7а показывает КК между данными после удаления из них годового хода. Он удалялся с помощью множественной линейной регрессии. Регрессионная модель включает константу, три пары синусов и косинусов с периодами год, полгода и 1/3 года и остаточный ряд, который и представляет собой результат удаления из данных годового хода. Корреляция между стратосферными данными ОМІ и ЗНС после удаления годового хода уменьшилась, при этом она максимальна зимой (0.65) и падает к лету (0.46). Годовое значение КК уменьшилось от 0.97 до 0.53.

Синим цветом на рис. 7а показаны значения разности между данными спутниковых и наземных измерений стратосферного содержания NO_2 над ЗНС, осредненные за весь срок совместных

измерений, по месяцам и по сезонам. Вертикальные отрезки — это 95%-е доверительные интервалы разности. Они пропорциональны ошибке среднего, а не среднеквадратичному отклонению разности, и значительно меньше последнего. Сезонный ход разности на рис. 7а отражает главные особенности ее временных изменений на рис. 2б. Среднемесячное значение разности близко к нулю (неотличимо от него с учетом доверительного интервала), но ее среднемесячные значения отличны от нуля. Амплитуда годовых колебаний разности составляет около 0.3×10^{15} молекул/см².

Коэффициенты линейной регрессии стратосферного содержания NO₂ по данным ОМІ на стратосферное содержание NO₂ по наземным данным показаны на рис. 7в. Наихудшие (далекие от единицы) значения углового коэффициента (сплошная красная кривая) получены для летних месяцев с минимальным значением, близким к 0.3, в июне. Для этого периода года также характерно значительное увеличение свободного члена регрессии (синяя кривая на рис. 7в). Удаление годового хода из данных ведет к уменьшению углового коэффициента регрессии (штриховая красная кривая). Его сезонные значения уменьшаются от 0.69 зимой до 0.33 летом и осенью, и их ход качественно подобен ходу сезонных КК на рис. 7а. Годовое значение углового коэффициента уменьшилось в результате удаления годового хода из данных от 0.8 до 0.4. Все отмеченное, в совокупности с ухудшением корреляции, указывает на то, что соответствие между стратосферными значениями содержания NO₂ по данным спутника и наземного прибора на ЗНС вряд ли можно считать удовлетворительным. Причем ухудшение соответствия получено для летнего периода, когда стратосферное содержание NO₂ максимально, а уровень антропогенного загрязнения минимален (рис. 3), что, казалось бы, должно способствовать лучшему согласию между данными измерений.

Наилучшая корреляция между содержаниями NO₂ в тропосферном столбе по данным спутниковых и наземных измерений на ЗНС наблюдается весной (0.6–0.7 в апреле–мае), а наиболее слабая (0.2–0.3) — летом (сплошная красная кривая на рис. 7б). Исключение годового хода из тропосферных данных практически не влияет на КК и угловой коэффициент регрессии между тропосферными данными ОМІ и ЗНС. С учетом разного горизонтального разрешения спутниковых и наземных данных и неточного соответствия между областью подспутниковых измерений и положением ЗНС, большая степень горизонтальной однородности содержания NO₂ в ПСА должна способствовать более высокой корреляции между

данными. Это возможно при значительных эпизодах загрязнения, охватывающих достаточно большую площадь. Такие эпизоды с высоким тропосферным содержанием NO₂ свойственны зимне-весеннему периоду (рис. 2в, 3б). Летом горизонтальный атмосферный перенос ослаблен, загрязнение ПСА окислами азота в большей степени зависит от местных источников, и горизонтальный масштаб неоднородностей NO₂ в ПСА относительно невелик.

Сезонный ход углового коэффициента регрессии для тропосферных содержаний NO₂ в целом повторяет ход КК (ср. красные кривые на рис. 7б и 7г), его значения весной близки, а в апреле даже превышают самые высокие значения аналогичного коэффициента для стратосферных содержаний NO₂ (ср. сплошные красные кривые на рис. 7г и 7в).

Свободный член линейной регрессии тропосферных содержаний NO₂, как и свободный член регрессии стратосферных содержаний, положительный (синие кривые на рис. 7г и 7в), а их сезонные зависимости в общих чертах противоположны. После вычитания годового хода из данных все значения свободного члена близки к нулю.

По результатам сопоставления для других станций получены коэффициенты линейной регрессии и корреляции между значениями стратосферного содержания NO₂, измеренными со спутника, и значениями ОС NO₂ по данным наземных измерений. Наибольший интерес представляет корреляция между ними. Коэффициенты корреляции, рассчитанные по данным за полные периоды совместных измерений и за отдельные сезоны, приведены на рис. 8 в зависимости от широты.

Годовые значения КК между спутниковыми и стационарными значениями содержания NO₂ в северном полушарии (СП) выше, чем в южном полушарии (ЮП) (сплошные черные кривые с символами-кружками). В северной полярной области они близки к 1. Весенние и осенние КК (зеленые и желтые кривые, соответственно) в СП несколько ниже годовых значений, но остаются высокими. Зимние и летние КК (синие и красные кривые, соответственно) имеют более низкие значения, но зимний КК еще достаточно высок в полярной области. Годовые и все сезонные значения КК в СП в целом уменьшаются с уменьшением широты. Особенно резкое уменьшение свойственно летнему сезону.

Широтная зависимость КК во внетропических широтах ЮП другая. Годовое и осеннее значения КК самые низкие на антарктической станции Дюмон–Дюрвиль. При этом осенние значения на всех станциях несколько больше годовых. Широтная зависимость зимних и летних КК в об-

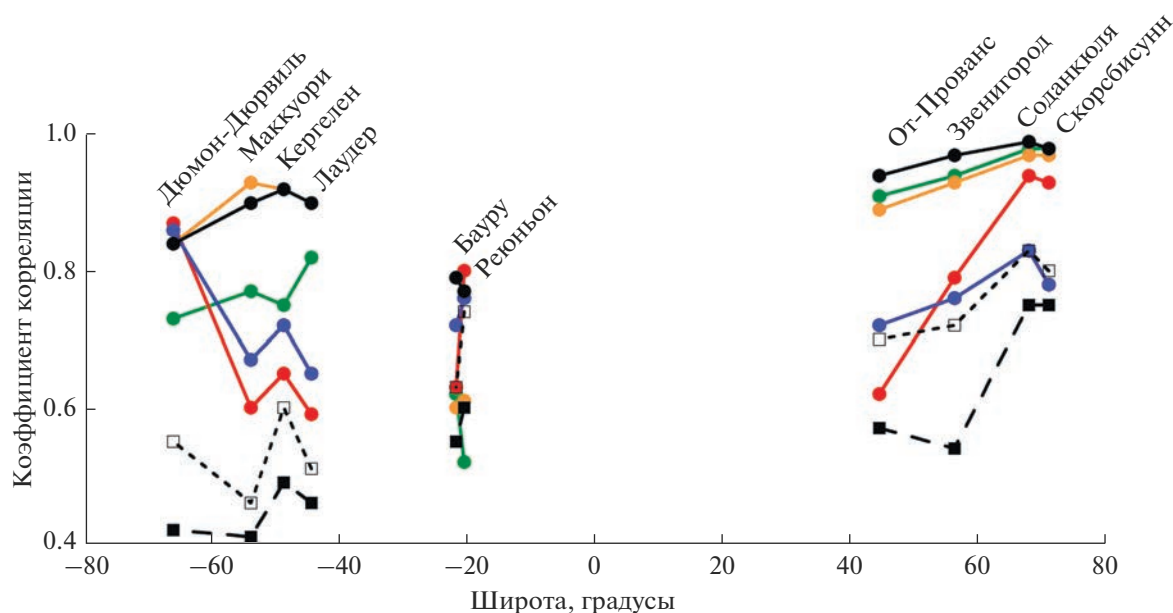


Рис. 8. Широтная зависимость коэффициента корреляции между результатами измерений общего содержания NO_2 (на ЗНС — содержания NO_2 в столбе стратосферы) на сети NDACC и результатами измерений содержания NO_2 в стратосферном столбе с помощью прибора ОМ1 за весь период совместных измерений (черный цвет), зимой (синий цвет), весной (зеленый цвет), летом (красный цвет) и осенью (желтый цвет). Сплошные кривые с кружками — без удаления годового хода из данных, черная штриховая кривая с заполненными квадратами — при удалении годового хода из данных, черная пунктирная кривая с незаполненными квадратами — на основе среднемесячных данных при удалении из них годового хода.

щих чертах противоположна зависимости годовых значений. Зимний и летний КК на антарктической станции очень близки к годовому и осеннему КК и сохраняют довольно большие значения около 0.85, но корреляция в средних широтах в эти сезоны значительно ухудшается.

Самое низкое значение КК ~ 0.7 на антарктической станции отмечено весной. Значительное понижение КК в этот сезон по сравнению с осенью характерно и для средних широт ЮП. Широтная зависимость корреляции в весенний период такова, что КК уменьшается в направлении от средних широт к Антарктиде.

Тропические южнополушарные станции Реюньон и Бауру очень близки по широте, но расположены в разных регионах: одна на малонаселенном высоком плато одноименного острова Реюньон в Индийском океане, а другая — в населенной местности в Бразилии (см. координаты станций в табл. 1). Годовые КК для них значительно меньше, чем для других станций. Другая специфическая особенность этих станций — более низкие КК весной и осенью по сравнению с зимой и летом. Наиболее низкие значения КК в эти сезоны, менее 0.6, получены для станции Реюньон. Причина более низкой корреляции весной и осенью на тропических станциях заключается в том, что на эти сезоны приходятся экстремумы годового хода стратосферного содержания

NO_2 — годовой максимум и годовой минимум, соответственно.

Исключение годового хода из данных измерений приводит к уменьшению КК. Широтный ход годовых значений КК показан на рис. 8 штриховой черной кривой с зачерненными символами-квадратами. Его основные особенности — общее уменьшение КК в направлении от Арктики к Антарктиде с резкими перепадами значений КК при переходе от высоких широт к средним широтам в СП и в средних широтах ЮП. Годовая оценка КК для антарктической станции Дюмон–Дюрвиль почти вдвое меньше, чем для Арктики (0.42 против 0.75). Максимальные значения сезонных КК для большинства станций (6 из 10) отмечены зимой (не показаны на рис. 8). При этом зимний КК для антарктической станции близок к КК для арктических станций (~ 0.8).

Пунктирной кривой с незаполненными символами-квадратами на рис. 8 показаны годовые оценки КК, полученные на основе среднемесячных значений содержания NO_2 после удаления из данных годового хода. Они характеризуют согласованность межгодовых изменений стационарных и спутниковых данных. В этом случае корреляция лучше, чем в предыдущем случае, поднимаясь в СП до значений 0.7–0.8, но лишь до 0.5–0.6 во внетропических широтах ЮП.

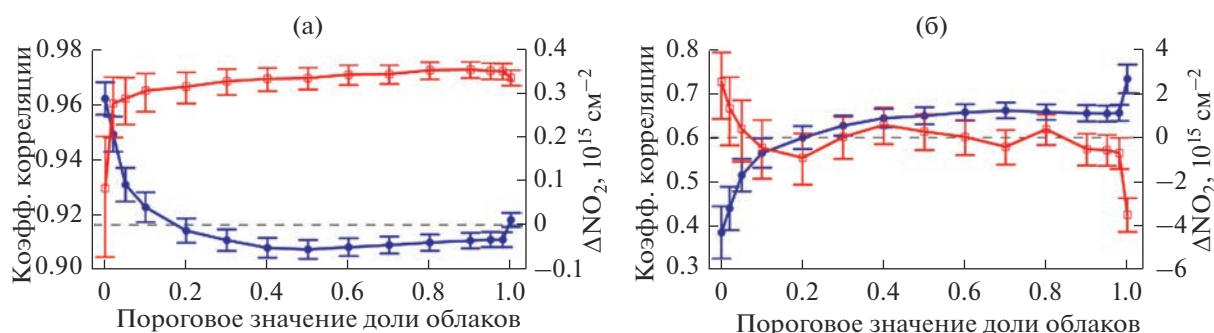


Рис. 9. Коэффициент корреляции (красный цвет) и средняя разность (синий цвет) между значениями содержания NO_2 в столбе стратосферы (а) и тропосферы (б) по данным ОМІ и данным наземных измерений на ЗНС в зависимости от верхнего порогового значения доли облачков. Вертикальные отрезки — 95% доверительные интервалы.

4.3. Зависимость от облачности

Зависимость результатов сопоставления от облачности будем определять с использованием значений параметра, характеризующего долю облаков (cloud fraction) в поле зрения спутникового прибора. При этом необходимо иметь в виду, что степень покрытия неба облаками (cloud cover) над наземной станцией и в области наблюдений со спутника может существенно различаться как по причине различия времени спутниковых и наземных измерений, так и из-за неоднородности поля облачности. В связи с этим отметим, что результаты наземных сумеречных зенитных измерений малочувствительны к облачности, если облачные условия в поле зрения смотрящего в зенит прибора были стационарны в течение сеанса измерений. Дополнительным фактором, ослабляющим влияние облачности на измерения на ЗНС, служит и то, что используемый в них узкий спектральный диапазон позволяет линеаризовать и исключить спектральную зависимость поглощения и рассеяния аэрозолем и облаками.

На рис. 9 приведены годовые КК и разности между данными спутниковых и наземных измерений на ЗНС в зависимости от задаваемого верхнего порогового значения доли облаков в поле зрения спутникового прибора. Прежде всего, отметим резкое ухудшение соответствия между данными ОМІ и наземными данными при пороговых значениях доли облаков, превышающих 0.99. Это с очевидностью демонстрируется также рис. 2б, 2г и 3б (см. точки и кривые черного цвета). По этой причине данные спутниковых измерений, полученных при значениях доли облаков более 0.99, как и соответствующие им данные наземных измерений, исключены из анализа, о чем было сказано выше.

Сравнение рис. 9а и 9б указывает на то, что изменения соответствующих кривых для стратосферной и тропосферной частей содержания NO_2 в общих чертах противоположны друг другу. Кор-

реляция между стратосферными содержаниями NO_2 в безоблачных условиях ухудшается, при этом увеличивается разность между данными. Корреляция между тропосферными содержаниями NO_2 в малооблачных условиях, наоборот, возрастает. При этом значения тропосферного содержания NO_2 по измерениям со спутника в отсутствие облаков в среднем значительно меньше значений, полученных в измерениях на ЗНС, и невязка между ними (до -4×10^{15} молекул/см²) существенно более значительная и противоположного знака по сравнению с тем, что получено при умеренных и высоких пороговых значениях доли облаков. Если при использовании всех данных, вне зависимости от облачности, тропосферное содержание NO_2 по данным ОМІ в среднем больше, чем по наземным данным, то тропосферное содержание NO_2 , полученное в измерениях со спутника в отсутствие облаков, в среднем намного меньше содержания, полученного в наземных измерениях.

Ухудшение соответствия между данными ОМІ и данными ЗНС для стратосферной части NO_2 и усиление корреляции между данными для тропосферной части NO_2 в безоблачных условиях можно связать с загрязнением ПСА в окрестности ЗНС окислами азота (рис. 2в и раздел 4.4). Другой фактор влияния на результаты сопоставления в отсутствие облаков — характер и альbedo подстилающей поверхности.

Диапазон изменения доли облаков при спутниковых измерениях в окрестности ЗНС максимально широкий (от 0 до 1). Это позволило выявить описанные выше закономерности. Однако диапазон изменений доли облаков в окрестности других станций, как правило, намного уже. В табл. 4 приведены типичные и наиболее частые (в скобках) значения доли облаков при наблюдениях со спутника. Там же даны значения КК и средней невязки между значениями содержания NO_2

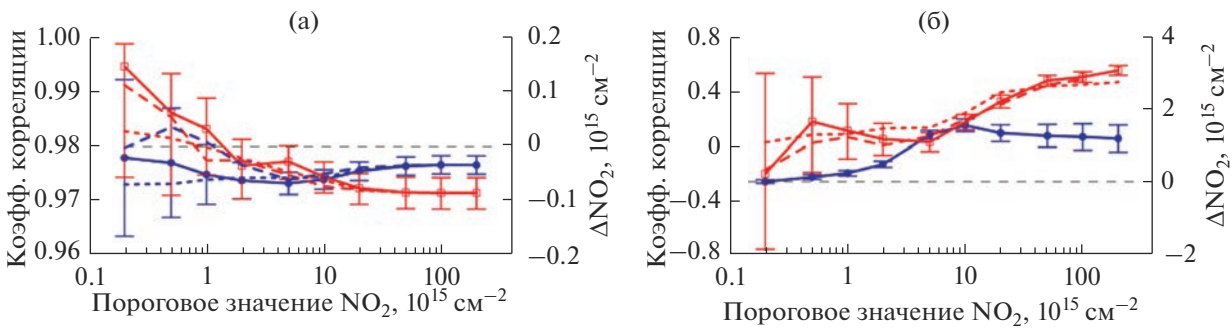


Рис. 10. Коэффициент корреляции (красный цвет) и средняя разность (синий цвет) между значениями содержания NO₂ в столбе стратосферы (а) и тропосферы (б) по данным ОМІ и данным наземных измерений на ЗНС в зависимости от верхнего порогового значения содержания NO₂ в столбе тропосферы. Пороговое значение применялось одновременно к данным ОМІ и данным ЗНС (сплошные кривые), только к данным ОМІ (штриховые кривые) или только к данным ЗНС (пунктирные кривые).

в столбе стратосферы по данным ОМІ и по наземным данным при малых (0–0.05) и больших (0.98) пороговых значениях доли облаков (ОС NO₂ по наземным измерениям на всех станциях, кроме ЗНС, принимается за содержание в столбе стратосферы – см. раздел 2). Жирным шрифтом выделены лучшие, с точки зрения соответствия между спутниковыми и наземными данными, значения из пары приведенных значений.

Усиление корреляции в малооблачных условиях получено на одной станции (Бауру), а уменьшение невязки – на трех станциях. Однако величина невязки не является вполне адекватным критерием соответствия из-за возможности систематических расхождений между результатами наземных и спутниковых измерений (рис. 6). На большинстве станций (на 7 из 10) не выявлено зависимости КК от облачности. Уровень тропосферного содержания NO₂ на них невелик (кроме станции От-Прованс). Кроме того, большая часть сопоставляемых данных на полярных станциях и

станции От-Прованс получена при низких и нулевых значениях доли облаков (табл. 4). Для станции Реюньон с ее низким уровнем загрязнения окислами азота получено ухудшение корреляции в безоблачных условиях. Вероятно, это обусловлено горным рельефом острова (станция расположена на высоте более 2000 над уровнем моря относительно недалеко от побережья, см. табл. 1).

4.4. Зависимости от уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота

Зависимости КК и средней разности между спутниковыми и наземными значениями содержания NO₂ в столбе стратосферы на ЗНС от задаваемого верхнего порогового значения содержания NO₂ в столбе тропосферы приведены на рис. 10а. Пороговое ограничение применялось как порознь к данным ОМІ или данным наземных измерений, так и одновременно к тем и другим данным. В соответствии с рис. 10а, корреляция меж-

Таблица 4. Значения коэффициента корреляции и средней невязки между спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO₂ при малых и максимальных (в скобках) пороговых значениях доли облаков

Станция	Типичные и наиболее частые (в скобках) значения доли облаков	Коэффициент корреляции	Средняя невязка, 10 ¹⁵ см ⁻²
Скорсбисунн	0–0.9 (0)	0.98 (0.98)	–0.43 (–0.47)
Соданкюля	0–0.9 (0)	0.98 (0.99)	–0.2 (–0.44)
Звенигород	0–0.95	0.93 (0.97)	0.3 (–0.03)
Обс. От-Прованс	0–0.2 (0.05)	0.96 (0.95)	–0.02 (–0.09)
о. Реюньон	0.1–0.4 (0.15)	0.74 (0.77)	0.1 (0.15)
Бауру	0–0.3 (0.15)	0.83 (0.79)	–0.13 (–0.24)
Лаудер	0–0.3 (0.2)	0.91 (0.90)	–0.48 (–0.34)
о. Кергелен	0.1–0.7 (0.3–0.5)	0.92 (0.92)	0.18 (0.33)
о. Маккуори	0.2–0.8 (0.5–0.7)	0.88 (0.9)	–0.61 (–0.46)
Дюмон-Дюрвиль	0–0.05 (0)	0.84 (0.84)	0.25 (0.24)

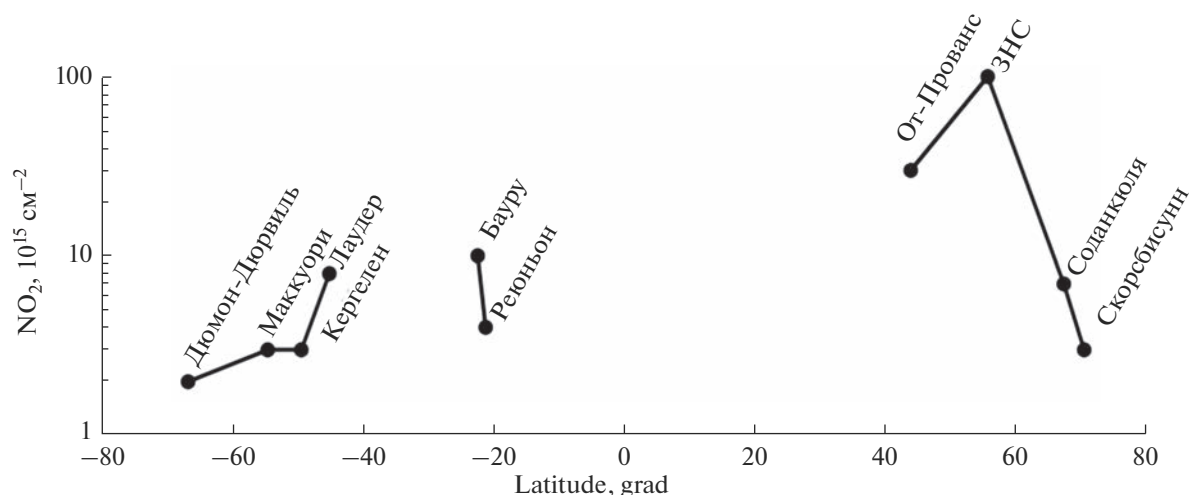


Рис. 11. Широтная зависимость максимального порогового значения содержания NO_2 в столбе тропосферы в окрестностях станций NDACC по данным OMI.

ду спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO_2 во всех случаях увеличивается с уменьшением порогового значения тропосферного содержания NO_2 , то есть с уменьшением уровня загрязнения нижнего слоя тропосферы окислами азота. При этом увеличение КК в случае применения порогового ограничения только к данным OMI (штриховая красная кривая) больше, чем в случае применения ограничения только к данным ЗНС (пунктирная красная кривая). Улучшение корреляции в общем случае (сплошная красная кривая) в основном обусловлено влиянием уровня загрязнения на данные OMI. Вполне вероятно, что относительно более слабая зависимость КК от уровня загрязнения, изображаемая пунктирной кривой, тоже обусловлена влиянием загрязнения на стратосферные данные OMI, так как пороговое ограничение тропосферных данных ЗНС частично работает таким же образом и в отношении тропосферных данных OMI ввиду корреляции между тропосферными данными OMI и ЗНС.

Тропосферное загрязнение влияет и на величину невязки между стратосферными содержаниями NO_2 (кривые синего цвета на рис. 10а). При малом пороговом значении тропосферного содержания NO_2 по данным OMI средняя невязка близка к нулю (штриховая и сплошная синие кривые). Впрочем, она невелика при всех пороговых значениях NO_2 : она на два порядка величины меньше содержания NO_2 в стратосфере.

На рис. 10б показаны КК и средняя разность между спутниковыми и наземными значениями тропосферного содержания NO_2 в зависимости от верхнего порогового содержания NO_2 в тропо-

сфере. Ход корреляционных кривых (красного цвета) для трех случаев примерно одинаков. Корреляция практически отсутствует при тропосферном содержании NO_2 менее 10^{16} молекул/ см^2 и возрастает с усилением загрязнения до своего максимального значения, соответствующего годовой оценке КК на рис. 7б. Улучшение корреляции происходит, по-видимому, ввиду того, что более сильное загрязнение “накрывает” большую территорию, и значения тропосферного содержания NO_2 в поле зрения OMI лучше коррелируют с локальными значениями на ЗНС.

Отсутствие корреляции при малых значениях тропосферного содержания NO_2 может быть следствием того, что горизонтальный масштаб неоднородностей поля NO_2 в тропосфере невелик, то есть содержание NO_2 в окрестности ЗНС в первую очередь определяется местными источниками, а не переносом от крупных и более мощных источников загрязнения (например, со стороны московского мегаполиса или крупных автомобильных магистралей).

Средняя разность между спутниковыми и наземными значениями содержания NO_2 в тропосферном столбе (синяя кривая на рис. 10б) изменяется от нуля при малых пороговых значениях до величины, соответствующей годовой оценке разности на рис. 7б, при высоких пороговых значениях.

Аналогичные расчеты КК и средней разности между результатами спутниковых и наземных измерений в зависимости от верхнего порогового значения содержания NO_2 в тропосфере (по данным OMI) проведены и для других станций NDACC из табл. 1. Пороговое значение, начиная

с которого КК и средняя разность становятся постоянными, считаем максимальным пороговым значением. Его распределение в зависимости от станций, расположенных в порядке их географической широты, приведено на рис. 11. Арктическая и антарктическая станции, Скорсбисунн и Дюмон—Дюрвиль, две островные станции в ЮП, Маккуори и Кергелен, и островная тропическая высокогорная станция Реюньон являются фоновыми с относительно малым тропосферным содержанием NO_2 , которое не должно заметно влиять на результаты зенитных сумеречных измерений (см. раздел 2). Тропосферное содержание NO_2 в окрестности других станций может достигать достаточно больших значений, вкладом которых в общее содержание NO_2 , определяемое из наземных измерений, нельзя пренебрегать. Наибольшее максимальное пороговое значение получено для ЗНС, расположенной вблизи московского мегаполиса. Ближайшее к нему по величине пороговое значение получено для западноевропейской станции От-Прованс, расположенной в предгорьях Альп.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное сопоставление результатов измерений содержания NO_2 в атмосфере с помощью спутникового прибора ОМІ в 2004–2020 гг. с результатами наземных зенитных сумеречных измерений на станциях NDACC показало, что степень соответствия данных спутниковых и наземных измерений зависит от сезона, места измерений, облачных условий, загрязненности нижней тропосферы окислами азота. Сопоставление данных ОМІ с данными измерений на ЗНС выполнено по двум продуктам спутниковых измерений: содержанию NO_2 в столбе стратосферы и содержанию NO_2 в столбе тропосферы. При сопоставлении данных ОМІ с данными наземных измерений на других станциях сопоставлялись спутниковые значения содержания NO_2 в столбе стратосферы со значениями общего содержания NO_2 , полученными в наземных измерениях. В качестве количественных характеристик соответствия между данными спутниковых и наземных измерений рассмотрены разность между данными, коэффициент линейной корреляции и коэффициенты линейной регрессии. Между данными измерений на большинстве станций и данными ОМІ имеются систематические расхождения, и соответствующие значения средней разности отличны от нуля. Средняя разность между значениями содержания NO_2 в столбе стратосферы по данным ЗНС и ОМІ близка к нулю. Содержание NO_2 в тропосферном столбе в окрестности ЗНС по данным

ОМІ в целом превышает тропосферное содержание, полученное в наземных измерениях на ЗНС.

Все характеристики соответствия между спутниковыми и наземными данными сезонно зависимы. Корреляция между данными в сезоны, когда наблюдаются годовые максимумы и минимумы (для стратосферного содержания NO_2 это лето и зима на внетропических станциях северного и южного полушарий и весна и осень на южнополюснотропических станциях), как правило, хуже, чем в другие сезоны. Важное исключение из этого правила — антарктическая станция Дюмон—Дюрвиль, где корреляция весной заметно хуже, чем в остальные сезоны.

Коэффициенты корреляции между данными ОМІ и наземными данными в северном полушарии уменьшаются с уменьшением географической широты станции. Особенно заметное уменьшение отмечено в летний сезон, что характерно и для южного полушария. Корреляция для тропических станций в целом существенно ниже, чем для остальных станций.

Корреляция между результатами спутниковых и наземных измерений содержания NO_2 в столбе тропосферы (только по данным ЗНС) в целом ниже, чем между значениями стратосферного содержания NO_2 . Она усиливается в условиях значительного загрязнения ПСА окислами азота, а при малом уровне загрязнения близка к нулевой. Тропосферное загрязнение отражается и на соответствии между данными измерений содержания NO_2 в стратосфере, приводя к уменьшению коэффициента корреляции между ними.

По результатам сопоставления спутниковых и наземных данных получены оценки уровня тропосферного загрязнения окрестностей станций окислами азота. Полярные и островные станции являются по этому показателю фоновыми. Однако содержание NO_2 в столбе тропосферы на станциях, расположенных в населенной местности, может быть достаточно большим, чтобы оказывать влияние на значения общего содержания NO_2 , получаемые в результате наземных измерений. Наибольший уровень антропогенного загрязнения тропосферы окислами азота свойствен ЗНС. Однако метод определения содержания NO_2 на ЗНС на основе восстановления вертикального профиля NO_2 минимизирует влияние загрязнения на значение определяемого по профилю содержания NO_2 в столбе стратосферы.

Для отдельных станций выявлена зависимость результатов сопоставления от облачности. В безоблачных условиях на ЗНС получена более слабая корреляция между спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO_2 и более сильная корреляция между значениями тро-

посферного содержания NO_2 по сравнению с облачными условиями. Однако для большинства станций зависимость результатов сопоставления от облачности не выявлена. Для них характерен небольшой диапазон облачных условий, в которых в основном получены сопоставляемые данные.

Факторами, понижающими корреляцию между значениями стратосферного содержания NO_2 по данным ОМІ и наземными данными, может служить антропогенное загрязнение нижней тропосферы окислами азота (как на ЗНС, расположенной вблизи московского мегаполиса), а также характер и альbedo подстилающей поверхности (как на станции Реюньон, расположенной на гористом океаническом острове).

Продолжительные измерения содержания NO_2 со спутника с помощью прибора ОМІ позволяют ставить задачу оценки на их основе трендов и межгодовых вариаций NO_2 в стратосфере и тропосфере. Поверка (валидация) спутниковых данных на основе результатов независимых измерений — важная подготовительная часть этой работы. Выполненное нами сопоставление показало, что соответствие между данными спутниковых и наземных измерений зависит от ряда факторов, которые могут по-разному влиять на результаты измерений со спутника и с поверхности земли. В определенные сезоны и в определенных условиях согласие между данными может существенно ухудшаться. По-видимому, есть регионы, где соответствие между данными в целом оставляет желать лучшего. Использование многолетних данных ОМІ для анализа долговременной изменчивости NO_2 должно опираться на результаты аналогичного анализа наземных данных с учетом результатов сопоставления, в том числе, тех, что изложены в представленной работе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты измерений содержания NO_2 с помощью прибора ОМІ в окрестности наземных станций подготовлены Центром валидации данных Аура (Aura Validation Data Center) Годдардского центра космических полетов НАСА (NASA Goddard Space Flight Center). Используемые в работе данные наземных измерений общего содержания NO_2 находятся в свободном доступе в базе данных NDACC (NDACC Data Host Facility). Авторы благодарны всем, обеспечивающим проведение наземных измерений, обработку и подготовку данных: А. Pazmino, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. David, J. Jumelet (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observation Spatiales, France); Institut Pierre-Simon Laplace, France), R. Querel, P. Johnston (National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand), N. Jepsen (Danish Meteorological Institute), R. Kivi (Finnish Meteorological Institute), T. Portafaix (Université

de la Réunion), G. Held (Universidade Estadual Paulista, Brazil), M. Tully (Bureau of Meteorology Australia). В работе использованы данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (EAMWF). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-05-00274 (измерения на ЗНС, анализ данных наземных измерений) и Российского научного фонда в рамках проекта № 21-17-00210 (анализ спутниковых данных). Авторы благодарны рецензенту и члену редколлегии журнала за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brasseur G.P., Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Dordrecht, the Netherlands: Springer. 2005. 644. P.
2. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 2006. 1225 p.
3. Hu Y., Liu C., Chen R., Kan H., Zhou M., Zhao B. Associations between total mortality and personal exposure to outdoor-originated NO_2 in 271 Chinese cities // *Atmos. Environ.* 2021. V. 246. 118170.
4. Boersma K.F., Jakob D.J., Eskes H.J., Pinder R.W., Wang J., van der A R.J. Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO_2 columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D16S26. <https://doi.org/10.1029/2007JD008816>
5. Celarier E.A., Brinksma E.J., Gleason J.F., Veeffkind J.P., Cede A., Herman J.R., Ionov D., Goutail F., Pommereau J.P., Lambert J.C., van Roozendael M., Pinardi G., Wittrock F., Schonhardt A., Richter A., Ibrahim O.W., Wagner T., Bojkov B., Mount G., Spinei E., Chen C. M., Pongetti T.J., Sander S.P., Bucsela E.J., Wenig M.O., Swart D.P.J., Volten H., Kronen M., Levelt P.F. Validation of Ozone Monitoring Instrument nitrogen dioxide columns // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D15S15. <https://doi.org/10.1029/2007JD008908>
6. Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P., Semenov V.K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucsela E.J., Celarier E.A., Kroon M. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO_2 vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D15S08. <https://doi.org/10.1029/2007JD008659>
7. Irie H., Kanaya Y., Akimoto H., Tanimoto H., Wang Z., Gleason J.F., Bucsela E.J. Validation of OMI tropospheric NO_2 column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 6577–6586.
8. Kramer L.J., Leigh R.J., Remedios J.J., Monks P.S. Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D16S39.

9. *Wenig M.O., Cede A.M., Bucsela E.J., Celarier E.A., Boersma K.F., Veefkind J.P., Brinksma E.J., Gleason J.F., and Herman J.R.* Validation of OMI tropospheric NO₂ column densities using direct-Sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center // *J. Geophys. Res.*, 2008, V. 113. D16S45. <https://doi.org/10.1029/2007JD008988>
10. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора OMI с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 4. С. 477–488.
11. *Gruzdev A.N., Elovkhov A.S.* Validation of Ozone Monitoring Instrument NO₂ measurements using ground based NO₂ measurements at Zvenigorod, Russia // *Internat. J. Remote Sens.* 2010. V. 31. № 2. P. 497–511. <https://doi.org/10.1080/01431160902893527>
12. *Bucsela E.J., Krotkov N.A., Celarier E.A., Lamsal L.N., Swartz W.H., Bhartia P.K., Boersma F., Veefkind J.P., Gleason J.F., Pickering K.E.* A new stratospheric and tropospheric NO₂ retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: applications to OMI // *J. Meas. Techn.* 2013. V. 6. P. 2607–2626.
13. *Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J. et al.* The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 5600–5745.
14. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Новые результаты валидации данных измерений содержания NO₂ с помощью прибора OMI на основе данных измерений на Звенигородской научной станции // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 1. С. 16–27. <https://doi.org/10.7868/S0205961412060024>
15. *Gruzdev A.N., Elovkhov A.S.* Comparison of the results of ground-based and satellite (OMI) measurements of the NO₂ contents in the stratosphere and troposphere over Zvenigorod: Sensitivity to cloud cover and tropospheric pollution // *Proceed. SPIE*. 2021. V. 11916. 1191628. <https://doi.org/10.1117/12.2601814>
16. *Johnston P.V., McKenzie R.L.* NO₂ observations at 45°S during the decreasing phase of solar cycle 21, from 1980 to 1987 // *J. Geophys. Res.* V. 94. № D3. P. 3473–3486.
17. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
18. *Vaughan G., Quinn P.T., Green A.C., Bean J., Roscoe H.K., van Roozendaal M., Goutail F.* SAOZ measurements of NO₂ at Aberystwyth // *J. Environ. Monit.* 2006. V. 8. P. 353–361. <https://doi.org/10.1039/b511482a>
19. *Gruzdev A.N., Elovkhov A.S.* Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Internat. J. Remote Sens.* 2011. V. 32. № 11. P. 3115–3127. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541524>
20. *Hendrick F., Barret B., Van Roozendaal M., Boesch H., Butz A., De Mazière M., Goutail F., Hermans C., Lambert J.-C., Pfeilsticker K., Pommereau J.-P.* Retrieval of nitrogen dioxide stratospheric profiles from ground-based zenith-sky UV-visible observations: validation of the technique through correlative comparisons // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. № 8. P. 2091–2106.
21. *Vandaele A.C., Hermans C., Simon M., Carleer M., Colin R., Fally S., Mérienne M.-F., Jenouvrier A., Coquart B.* Measurements of the NO₂ absorption cross section from 42,000 cm⁻¹ to 10000 cm⁻¹ (238–1000 nm) at 220 and 294 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 1998. V. 59. № 3–5. P. 171–184.
22. *Harder J.W., Brault J.W., Johnston P.V., Mount G.H.* Temperature dependent NO₂ cross sections at high spectral resolution // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D3. P. 3861–3879.
23. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Изменения общего содержания и вертикального распределения NO₂ по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–112.
24. *Platt U., Stutz J.* Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principle and Applications / Berlin: Springer Verlag/ 2008. 597 p. ISBN 978-3-540-21193-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75776-4>
25. *Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO₂ // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 3. С. 345–359.

Comparison of Results of Long-Term Measurements of Stratospheric and Tropospheric Column NO₂ Contents using Satellite Ozone Monitoring Instrument to Results of Ground-Based Measurements

A. N. Gruzdev¹, * and A. S. Elovkhov¹

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhovsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Results of measurements of NO₂ contents in vertical columns of the stratosphere and troposphere using the Ozone Monitoring Instrument aboard the EOS–Aura satellite in 2004–2020 are compared to results of ground-based measurements at stations of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), first of all, to results of measurements at the Zvenigorod Scientific Station (ZSS) of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences. The comparison of satellite

data to the ZSS data is done using the both products of satellite measurements—the stratospheric and tropospheric column NO_2 contents. When comparing the data of OMI and ground-based measurements at other stations, satellite values of the NO_2 content in the stratospheric column are compared to values of the total column NO_2 content obtained in ground-based measurements. Correspondence between the results of satellite and ground-based measurements is characterized by the magnitude of the difference between them, linear correlation coefficients and regression coefficients. The difference has a noticeable seasonal variation. Correlation and regression coefficients depend significantly on the season. Characteristic patterns of correlation coefficient changes with latitude as well as features of correlation between satellite and ground-based data in the polar and middle latitudes of the southern hemisphere in spring have been revealed. For some stations, the dependence of the quantitative characteristics of the correspondence between the results of satellite and ground-based measurements on cloudiness has been revealed. Under cloudless conditions at the ZSS, a weakening of the correlation between satellite and ground-based values of the stratospheric NO_2 content and an increase in the correlation between the values of the tropospheric NO_2 content is noted. The dependence of the correspondence characteristics between the data of satellite and ground-based measurements on the level of pollution of the lower troposphere with nitrogen oxides has been revealed. The correlation between the values of the tropospheric NO_2 content in the vicinity of the ZSS under strong pollution increases, while the correlation between the values of the stratospheric NO_2 content decreases. Based on the results of the comparison of satellite and ground-based data, estimates of the upper threshold values of the tropospheric NO_2 content at different stations is obtained. The lowest values have been obtained for polar stations, and the highest value has been obtained for the ZSS which is most susceptible to anthropogenic pollution due to its proximity to the Moscow megapolis.

Keywords: NO_2 , spectrometric measurements, OMI, NDACC, comparison