

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ИКФС-2: АНАЛИЗ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2024 г. А. Н. Рублев^{1, *}, В. В. Голомолзин¹, А. Б. Успенский¹, Ю. В. Киселева¹,
Д. А. Козлов², Б. Д. Белан³, М. Ю. Аршинов³, Ю. М. Тимофеев⁴, А. В. Панов⁵,
А. С. Прокушкин⁵

¹Научно-исследовательский центр “Планета”, Москва, Россия

²Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, Москва, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА), Томск, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт леса им В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: alex.rublev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

На основе ретроспективного сопоставления с данными наземных спектроскопических измерений в Петергофе Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) и самолетных измерений в районе Новосибирского водохранилища Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА), проведенных в 2019–2022 гг., выполнен анализ результатов применения новой версии регрессионной методики определения общего содержания диоксида углерода ХСО₂ (мольной доли атмосферного СО₂ в сухом воздухе) по измерениям инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 российского метеорологического спутника “Метеор-М” №2. Дано описание внесенных изменений в методику с целью повышения точности спутниковых оценок. Так, для компенсации влияния изменения характеристик ИКФС-2 во время длительного полета на оценки ХСО₂ используется их калибровка по результатам наземных измерений обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи). После калибровки и фильтрации облачных сцен расхождение спутниковых оценок с данными наземных и самолетных измерений характеризуется средним квадратическим отклонением ~4 млн⁻¹ или 1% от общего содержания ХСО₂. Чтобы ускорить адаптацию регрессионного алгоритма оценки ХСО₂ к данным ИКФС-2 на новых спутниках предлагается дополнительно к контактным измерениям концентраций СО₂ использовать оценки ХСО₂ наземной сети TCCON. Также в регрессиях в качестве еще одного предиктора, характеризующего состояние прибора, целесообразно использовать толщину криоосадка на стекле фотоприемника ИКФС-2.

Ключевые слова: диоксид углерода, регрессия, оптическая толщина, ИКФС-2, наземные измерения и поперечная горизонтальная циркуляция

DOI: 10.31857/S0205961424040051, **EDN:** EMDUPJ

ВВЕДЕНИЕ

Изменения концентрации атмосферных долгоживущих парниковых газов оказывают существенное влияние на климат Земли. Из них диоксид углерода – наиболее важный парниковый газ. Глобальная концентрация атмосферного СО₂ увеличилась с 280 млн⁻¹ (в доиндустриальную эпоху) до 419.9 млн⁻¹ к 2022 г. (Бюллетень ВМО, 2023). В Бюллетене Всемирной Метеорологической Организации (Бюллетень ВМО, 2023) указывается, что в период с 1990 по 2022 год радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов увели-

чилось на 49%, при этом на долю СО₂ приходится 78% этого увеличения. Для улучшения нашего понимания природных и антропогенных процессов, управляющих парниковым эффектом атмосферы, необходимы глобальные данные содержания атмосферного СО₂ с хорошим пространственным и временным разрешением, обеспечить получение которых можно только путем развития спутниковых методов измерений. В их основе лежат анализ спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения, регистрируемых с помощью спектрометров БИК диапазона (TANSO-FTS, OCO), или анализ спектров уходящего теплового излучения,

регистрируемых с помощью гиперспектрометров ИК диапазона (фурье-спектрометры IASI, CrIS, TES, HIRAS, ИКФС-2, дифракционный спектрометр AIRS) (Успенский, 2022).

Следует отметить, что инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 (Завелевич, 2009) в настоящее время является единственным в России серийным спутниковым прибором, который может быть использован для глобального мониторинга содержания диоксида углерода в атмосфере. Он устанавливается на отечественных полярно-орбитальных космических аппаратах (КА) серии “Метеор-М”. В частности, прибор успешно функционировал на орбите во время всего срока активного существования КА “Метеор-М” № 2 (2014 – 2023 гг.). Стабильность радиометрических характеристик ИКФС-2, подтвержденная в ряде интеркалибровок по зарубежным спутниковым приборам, позволила разработать регрессионную методику оценки объемного содержания диоксида углерода X_{CO_2} в земной атмосфере, подробно изложенную в (Голомолзин, 2022; Успенский, 2022). Предикторы в уравнении регрессии из (Голомолзин, 2022) – эффективные оптические толщины, вычисленные по измерениям спектральной интенсивности уходящего ИК излучения в каналах ИКФС-2 в диапазоне 11–14 мкм, примыкающем к сильной полосе поглощения CO_2 с центром 15 мкм. Эталонными значениями для построения регрессии служили значения X_{CO_2} , вычисленные по высокоточным измерениям в 2015–2016 гг. концентраций диоксида углерода, проведенных на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO (экспериментальная площадка Института леса им В.Н. Сукачева СО РАН, примерно в 22 км от поселка Зотино, на левом берегу Енисея, Центральная Сибирь), и опубликованным данным самолетных измерений (Аршинов, 2009), выполненных ранее в районе

Новосибирского водохранилища. Дополнительно привлекались оценки X_{CO_2} , полученные по результатам наземных измерений 2015–2016 гг. обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи).

Проведенное в (Голомолзин, 2022) сравнение оценок X_{CO_2} (ИКФС) с аналогичными оценками по данным зарубежных спутниковых спектрометров CrIS и OCO над территорией Евразии за 11 дней в октябре 2021 г. показало хорошее согласие. Средние значения X_{CO_2} (ИКФС) занимали промежуточные значения между оценками аналогов: на 3.2 млн^{-1} выше X_{CO_2} (CrIS) и на 1.2 млн^{-1} ниже X_{CO_2} (OCO). В безоблачных условиях для совпадающих по месту расположения пикселей ИКФС-2 и OCO среднеквадратичная невязка оценок X_{CO_2} не превышает 2 млн^{-1} .

Однако, при сопоставлении (Никитенко, 2024) с оценками X_{CO_2} , полученными в СПбГУ по наземным измерениям потоков солнечного излучения ИК фурье-спектрометром Bruker 125HR (Петергоф, период 2019–2022 гг.), была выявлена значительно большая амплитуда годового хода X_{CO_2} (ИКФС) и существенное занижение их величин, начиная с 2021 г. Аналогичная картина наблюдалась и при сравнении с опубликованными данными измерений фурье-спектрометра TANSO-FTS японского спутника GOSAT в районе финской геофизической обсерватории Соданкюля (Taylor, 2022) – ближайшему к Петергофу пункту сети TCCON. Результаты сопоставлений наземных измерений СПбГУ и оценок по данным GOSAT с медианными значениями дневных оценок по данным ИКФС-2 для его пикселей пределах 250 км от Петергофа обсуждаются в (Никитенко, 2024) и показаны на рис. 1.

В (Никитенко, 2024) также представлены первые результаты работ по совершенствованию методики (Голомолзин, 2022), которые сводились к уточнению высотного хода концентрации CO_2 по данным самолетных измерений и дополнительной калибровке оценок X_{CO_2} (ИКФС) по наземным измерениям концентраций CO_2 в обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи), выполненным в 2019–2022 гг.

Работа по дальнейшей модификации методики (Голомолзин, 2022) определения X_{CO_2} (ИКФС) была продолжена и ее результаты отражены в данной статье. Помимо сравнений с наземными измерениями СПбГУ в неё включено описание ретроспективного сопоставления результатов применения модифицированной методики с контактными самолетными измерениями ИОА, которые выполнялись в течение ряда лет в районе Новосибирского водохранилища. Проведенные сопостав-

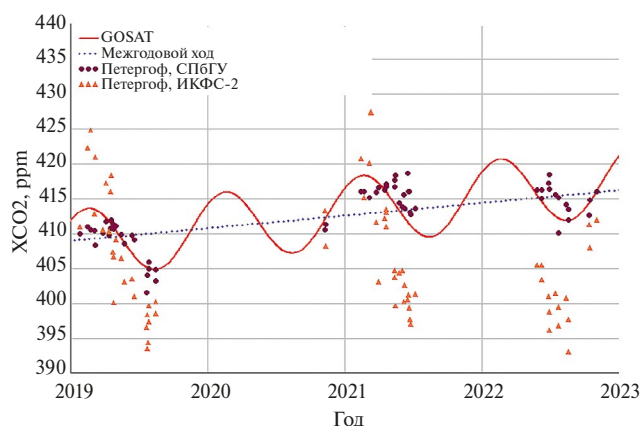


Рис. 1. Временной ход значений X_{CO_2} , полученный по данным наземных и спутниковых измерений вблизи Санкт-Петербурга за 2019–2022 гг.

ления с наземными и самолетными измерениями ХСО₂ в 2019–2022 гг., принятыми за “истину”, подтвердили эффективность предложенных модификаций регрессионной методики (Голомолзин, 2022) определения ХСО₂ (ИКФС-2), состоящих в формировании эталонных значений ХСО₂ для обучающей выборки на основе сочетания контактных измерения концентраций на высотной мачте обсерватории ZOTTO, обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа и самолетных измерений ИОА в Сибири.

Для применения в мониторинге содержания диоксида углерода данных конкретных экземпляров ИКФС-2 на новых КА серии “Метеор-М” (Успенский, 2021) целесообразно использовать модифицированную регрессионную методику (Голомолзин, 2022). При этом организация мониторинга потребует, вообще говоря, оперативного получения регрессий для каждого очередного КА, так как измерения конкретных экземпляров ИКФС-2 содержат различного рода систематические ошибки, включая инструментальные. В связи этим в статье обсуждается включение в состав предикторов регрессии для новых ИКФС-2 толщины криоосадка, изменение величины которой в процессе эксплуатации прибора из-за нелинейности амплитудной характеристики фотоприемника может вызвать смещение оценок ХСО₂. Заметим также, что для валидации спутниковых оценок ХСО₂ и ускорения получения рабочих регрессий можно дополнительно к контактным измерениям использовать данные наземной сети TCCON (Wunch, 2011). Для многих пунктов этой сети результаты измерений ХСО₂ доступны в течение полугода с момента измерений.

Далее дается анализ причин выявленных методических погрешностей регрессионной методики (Голомолзин, 2022) и описаны способы их уменьшения.

УТОЧНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СО₂

Как отмечено выше, сравнение оценок ХСО₂ (ИКФС), полученных по первоначальной версии методики (Голомолзин, 2022), с данными наземных и спутниковых измерений за период 2019–2022 гг. (см. рис. 1) показало значительное расхождение в годовом ходе ХСО₂. Наиболее вероятной причиной является выбранная схема пересчета профилей концентрации СО₂ в эталонные значения общего содержания ХСО₂ по данным измерений на высотной мачте обсерватории ZOTTO при получении рабочей регрессии.

Напомним, что в (Голомолзин, 2022) расчеты эталонных ХСО₂ проводились в дни и часы, ког-

да по данным измерений на мачте перемешивание атмосферы приводило к равномерному распределению концентрации СО₂ в приземном слое атмосферы. Критерием отбора данных являлось совпадение (в пределах ± 1 млн⁻¹) концентраций газа, измеренных на всех площадках мачты (между 4–301 м). При пересчете к общему содержанию ХСО₂ в (Голомолзин, 2022) полагалось, что постоянство объемной концентрации СО₂ сохраняется из-за конвективного перемешивания атмосферы примерно до 1.5 км (Белан, 1994). Между концентрациями на этом уровне, а также на 3 и 7 км для вертикального профиля (Аршинов, 2009), полученного по данным самолетных измерений в соответствующем месяце, использовалась линейная интерполяция по высоте. На 7 км и выше концентрация считалась постоянной. Межгодовой ход данных (Аршинов, 2009) учитывался введением поправок в самолетный профиль относительно концентрации на уровне 0.5 км, которая, в силу сделанного допущения, принималась равной измеренной на мачте ZOTTO. Вычисленные таким образом значения ХСО₂ использовались для получения эталонных значений ХСО₂ на дату пролета спутника “Метеор-М” № 2 линейной интерполяцией по времени.

Однако при сопоставлении с данными аппроксимации самолетных измерений, проводимых ИОА непосредственно в 2015–2016 гг. (Антонович, 2023), когда осуществлялся набор статистики для получения регрессии (Голомолзин, 2022), оказалось, что для теплого периода года наблюдается существенная разница между измерениями концентраций СО₂ на мачте ZOTTO и самолетными уже на высоте 500 м. Как показано на рис. 2, наземные измерения дают более низкие значения концентраций по сравнению с самолетными (Антонович, 2023), причем занижение достигает примерно 15 млн⁻¹.

Исходя из этого, в вертикальный профиль объемных концентраций СО₂, используемый для расчета эталонных значений ХСО₂, были внесены изменения. До 300 м он определялся концентрацией, измеренной на мачте ZOTTO; между 300 м и 7 км — линейной интерполяцией по высоте самолетных измерений ИОА, а выше 7 км — постоянной концентрацией, равной самолетной на 7 км.

Следует отметить, что измерения ИКФС-2 на борту КА “Метеор-М” № 2 проводились в утренние (~9 часов утра местного времени) и вечерние часы (~9 часов вечера), когда в теплый период фотосинтез еще/уже не мог скомпенсировать накопление диоксида углерода за счет дыхания почвы и растительности. Однако уточнение на время пролета спутника эталонных значений ХСО₂ не проводилось. Как показали выполненные оценки, вносимые поправки, учитывающие фактические

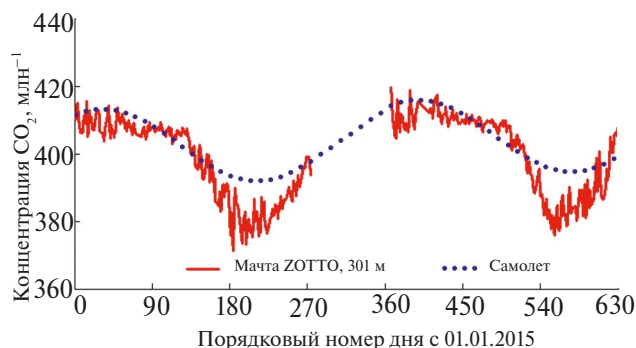


Рис. 2. Сопоставление самолетных измерений ИОА СО РАН с измерениями объемных концентраций CO_2 на высотной мачте обсерватории ZOTTO.

значения концентраций в диапазоне 0–300 м, носят случайный характер и не превышают $1\text{--}2 \text{ млн}^{-1}$ для большинства случаев. Это существенно меньше, чем разброс оценок XCO_2 в отдельных пикселях ИКФС-2, особенно в условиях разорванной облачности, когда он может достигать 20 млн^{-1} .

Для измерений в обсерватории NOAA на Мауна-Лоа, которые также использовались для получения рабочей регрессии, вертикальный профиль концентрации CO_2 полагался постоянным и равным среднесуточному значению. Проведенная проверка по доступным профилям самолетных измерений (Вертикальные профили диоксида углерода, электронный ресурс) над островом Молокаи (Гавайский архипелаг) показала постоянство по высоте объемной концентрации CO_2 в течение всего года, поэтому изменения в ранее полученные значения не вносились.

Уточнение вертикального профиля концентрации CO_2 , используемого для определения эталонных XCO_2 в Центральной Сибири при получении рабочей регрессии, позволило уменьшить амплитуду годового хода оценок XCO_2 (ИКФС) примерно до $10\text{--}12 \text{ млн}^{-1}$ (Голомолзин, 2022), т. е. до значений, которые соответствуют наземным (Bruker 125HR) и спутниковым (GOSAT) измерениям в районе Петергофа.

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИКФС-2

Уменьшение амплитуды годового хода в оценках XCO_2 никак не повлияло на увеличивающееся со временем занижение оценок XCO_2 (ИКФС) по сравнению с независимыми наземными и спутниковыми оценками. Зависимость рассогласования оценок от времени означает, что есть какие-то изменения радиометрических характеристик ИКФС-2 — инструментальные факторы, влияющие

на определение XCO_2 (ИКФС) в периоды получения рабочей регрессии и/или дальнейших регулярных измерений. Во время всего срока активного существования КА “Метеор-М” № 2 (2014–2023 гг.) фурье-спектрометр ИКФС-2 успешно функционировал на орбите, неоднократно участвовал в различных интеркалибровочных кампаниях, подтвердивших стабильность его характеристик и высокую точность измерений. Погрешность, вносимая в измерения спектральных интенсивностей (или яркостных температур) ИК излучения различными факторами, находится в пределах допусков, предусмотренных техническим заданием на создание прибора, однако, тем не менее, может влиять на погрешность оценок XCO_2 .

В качестве примера такого влияющего фактора на рис. 3 приведен временной ход калибровки ИКФС-2 в яркостных температурах по трем спектральным ИК каналам радиометра SEVIRI, установленного на борту европейских геостационарных КА Meteosat-10 (до 2018 г.) и Meteosat-11 (начиная с 2018 г.). Калибровки осуществлялись по синхронным регистрациям ИК уходящего излучения в момент пролета КА “Метеор-М” № 2 района подспутниковой точки стояния (0°) геостационарных КА в Гвинейском заливе Атлантического океана. В свою очередь радиометр SEVIRI периодически калибровался по фурье-спектрометру IASI, установленному на полярно-орбитальных КА Metop-A и -B. Отметим, что специальной группой GSICS (Global Space based Inter-Calibration System) при Всемирной метеорологической организации фурье-спектрометр IASI признан в качестве образцового прибора для проверок (интеркалибровок) ИК спутниковых приборов на орбите. Результаты интеркалибровок яркостных температур SEVIRI по IASI отчетливо видны на графике для канала 13.4 мкм, в котором после каждой калибровки (Meteosat-11, 2018–2023) значения поправок уходят на нулевой уровень. Это свидетельствует о стабильности работы ИКФС-2 в спектральном рабочем диапазоне этого канала. Напротив, в канале 12 мкм наблюдается изменение калибровочной поправки с $+0.1\text{K}$ (2019 г.) до -0.1K (2023 г.), которое не компенсируется интеркалибровками с IASI, т. е. это изменение калибровки самого ИКФС-2.

Дополнительные искажения спектральной зависимости между измерениями в отдельных каналах ИКФС-2 могут вносить криосадки — лед. На рис. 4 приведен временной ход убывания скорости нарастания льда на ртутно-кадмиево-теллурическом (РКТ) фоторезисторе ИКФС-2 с собственной температурой примерно 80K.

Очистка фоторезистора (“размораживание”) начинается при достижении толщины льда $h = 1 \text{ мкм}$. В 2015–2016 гг. она проводилась примерно раз

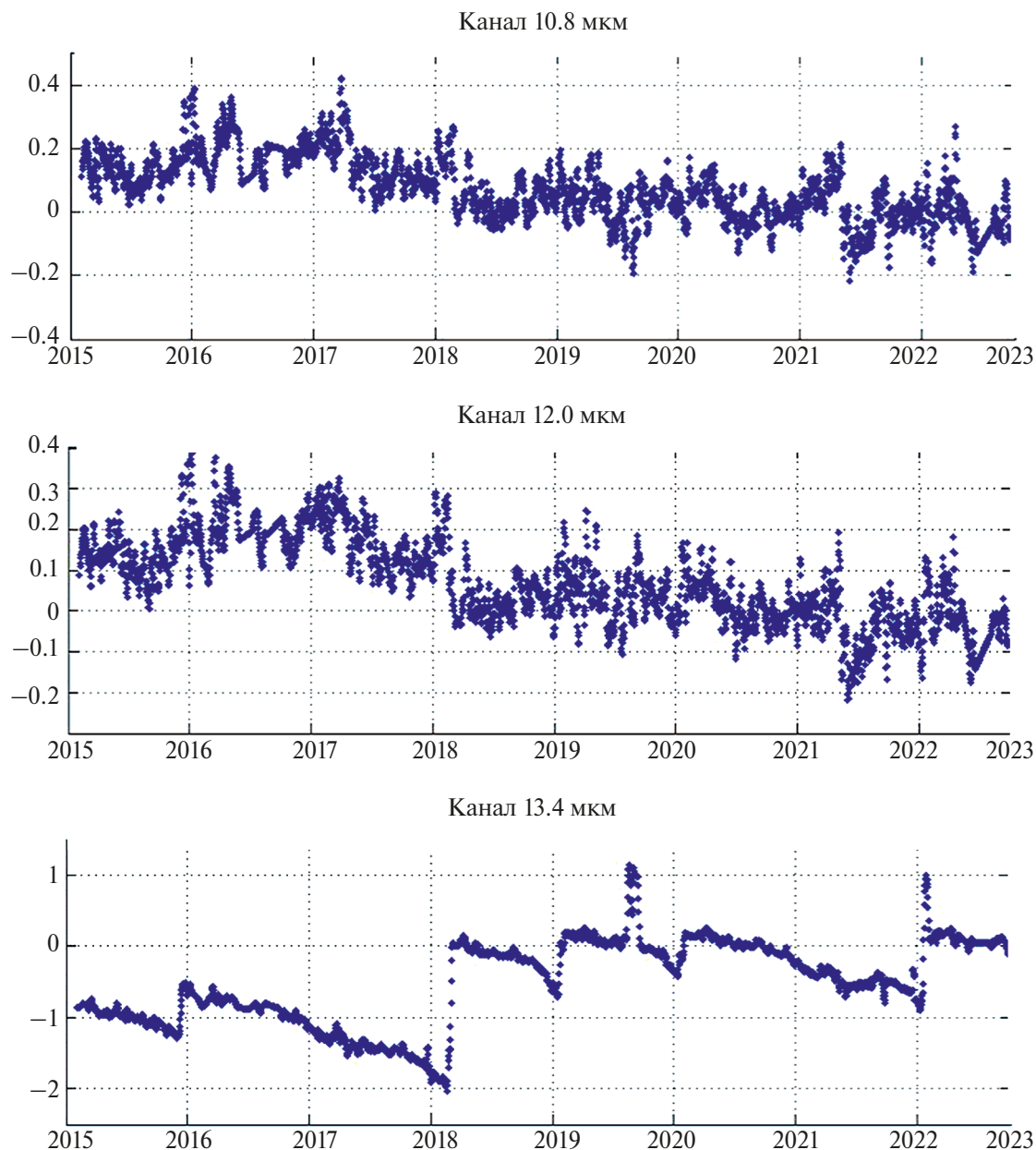


Рис. 3. Временной ход калибровки ИКФС-2 в яркостных температурах для каналов SEVIRI КА Meteosat-10 (до 2018 г.) и Meteosat-11 (начиная с 2018 г.).

в 10 дней. С уменьшением скорости нарастания осадка период очистки увеличивался. В 2021 г. он достиг 60 дней и дальше не менялся. Уровень криоосадка в ИКФС-2 контролируется по значению шума NSRF в центре полосы поглощения льда. Спектральное (в зависимости от волнового числа ν , см^{-1}) пропускание ледяной пленкой различной толщины h без учета интерференционного отражения на ее границах (Hudgins, 1993) показано на рис. 5.

Слева от 950 см^{-1} — в спектральной области, задействованной для определения XCO_2 , — мини-

мальное пропускание для толщины ледяной пленки 1 мкм составляет примерно 67%, при этом пропускание на 900.1 см^{-1} — опорной частоте, которая соответствует максимальной прозрачности атмосферы и используется в алгоритме для определения спектральных толщин поглощения атмосферы — будет равно 80%. Использование при измерениях ИКФС-2 внутренней калибровки по бортовому калибровочному источнику существенно нивелирует эту разницу, но наличие криоосадков вызывает смещение рабочей точки на нелинейной амплитудной характеристике РКТ детектора ИКФС-2

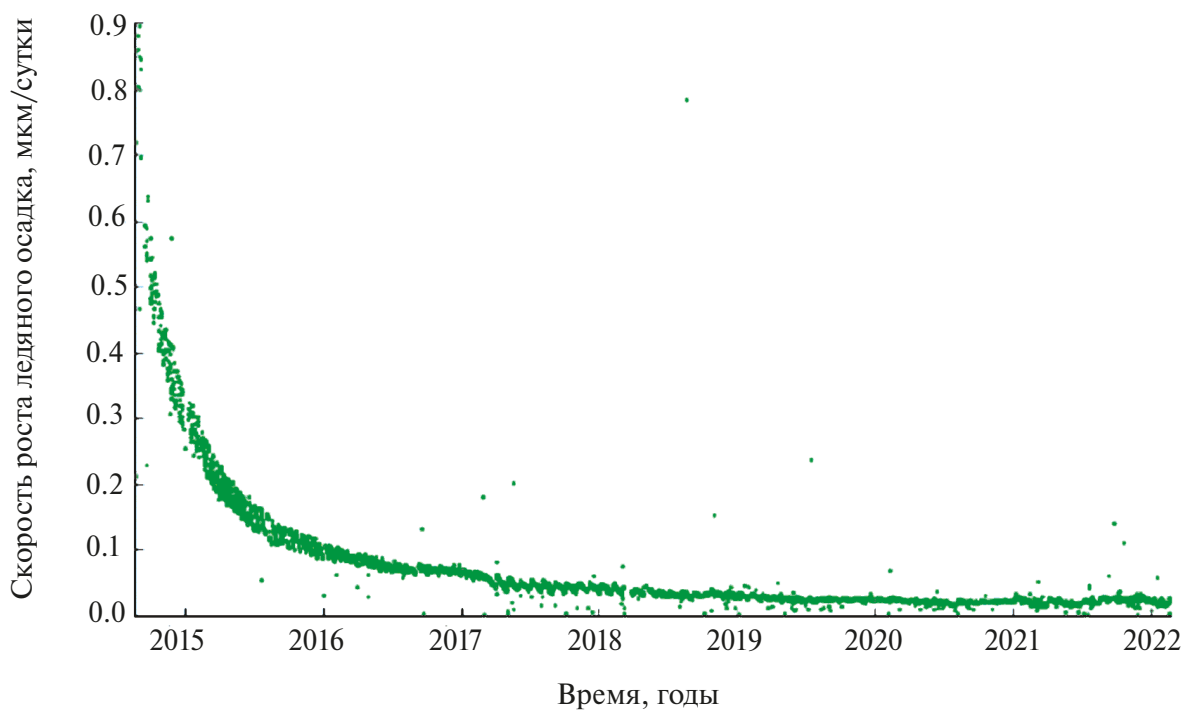


Рис. 4. Изменение скорости нарастания криоосадков на фоторезисторе ИКФС-2.

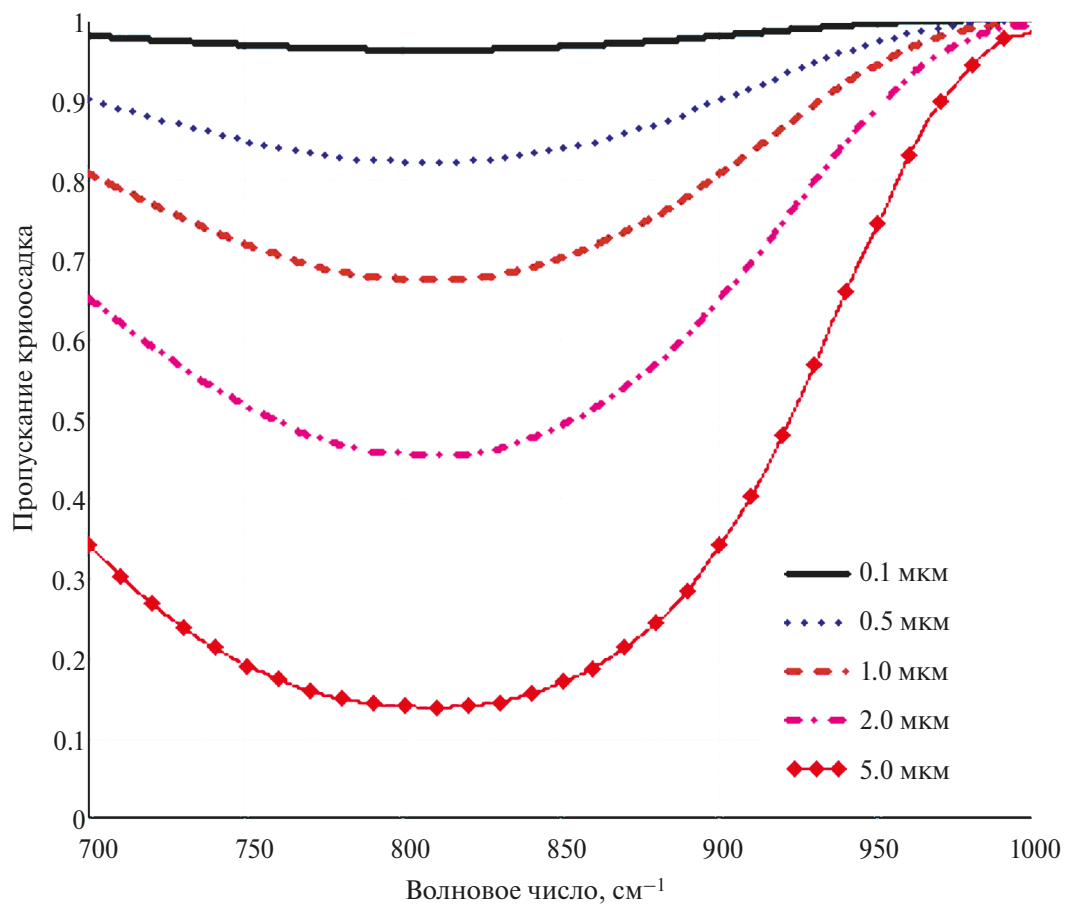


Рис. 5. Спектральное пропускание криоосадков.

и появление дополнительных спектральных искажений (Анохин, 2011). Величины этих искажений в каналах ИКФС-2 малы, но неизвестны, и, учитывая задействие в рабочей регрессии измерений нескольких каналов и ее нелинейный характер, могут вызвать случайную ошибку в оценке временного тренда ХСО₂. Следует учесть, что сразу после очистки скорость нарастания криоосадка существенно выше (Михальченко, 1988), чем в конце рабочего периода при приближении его толщины к предельному значению $h=1$ мкм. Это ведет к нарушению однородности условий измерений при получении коэффициентов регрессии и ее использовании для оценок ХСО₂. Например, в 2015–2016 гг., когда очистки выполнялась 1 раз в 10 дней, доля времени проведения измерений ИКФС-2 с $h > 0.5$ мкм при получении регрессии была примерно на 7% меньше, чем при проведении оценок ХСО₂ в 2019–2022 гг., когда период очистки составлял 60 дней.

Как следует из приведенного рассмотрения, корректное определение межгодового тренда ХСО₂, во многом связано с учетом состояния прибора в течение всего срока эксплуатации, включая период проведения измерений для получения рабочей регрессии. Практическое осуществление такого учета возможно включением толщины криоосадка, доступного из стандартного набора выходных данных ИКФС-2, в качестве предикторов регрессии. Это необходимо сделать при определении ХСО₂ по данным новых спутников серии “Метеор-М”,

включая КА “Метеор-М” № 4, выведенного на солнечно-синхронную орбиту 29 февраля 2024 г.

КАЛИБРОВКА ОЦЕНОК ХСО₂ ПО КОНТАКТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ОБСЕРВАТОРИИ МАУНА-ЛОА

Учесть возможный временной дрейф отдельных технических характеристик ИКФС-2 (например, деградацию бортового калибровочного источника) при построении регрессии невозможно, т.к. в выходных данных ИКФС-2 нет соответствующих параметров, пригодных для включения в состав предикторов. Вводить какие-то поправки по результатам интеркалибровки во время полета также нельзя: стабильность радиометрических характеристик ИКФС-2 не хуже упомянутого выше фурье-спектрометра IASI (Zavelevich, 2018).

Вследствие сказанного целесообразно контролировать и калибровать сами оценки ХСО₂ (ИКФС), а для этого нужно какие-то измерения выбрать в качестве эталонных. Использование в качестве эталонных оценки по данным GOSAT или OCO-2 (Taylor, 2023) вызывает большие сложности при пространственно-временном совмещении различных спутниковых данных: зарубежные приборы, по сравнению с ИКФС-2, имеют существенно более высокое пространственное разрешение; к тому же над большей частью территории России практически полностью отсутствуют измерения GOSAT и OCO-2 в зимний период.

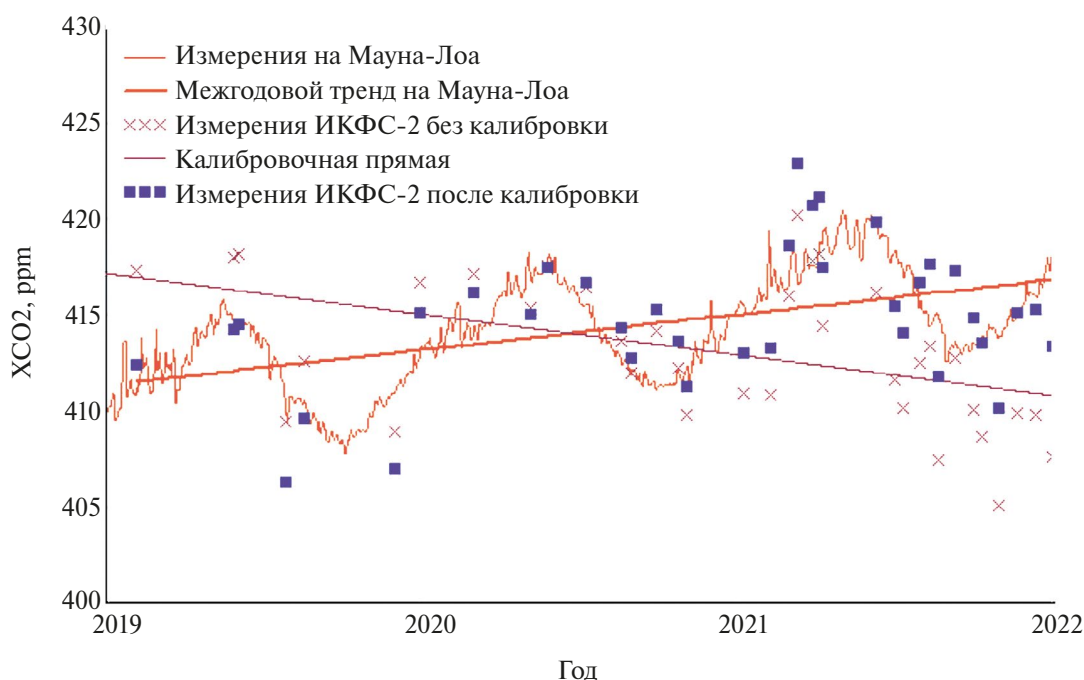


Рис. 6. Сравнение оценок ХСО₂ (ИКФС) до и после калибровки по данным Мауна-Лоа.

Общепризнанные эталонные данные – результаты контактных измерений концентраций CO_2 , которые ведутся более 60 лет в обсерватории на Мауна-Лоа (Гавайские острова) на высоте около 3400 м. Как уже отмечалось, вертикальный профиль относительной концентрации CO_2 практически постоянен (Вертикальные профили, электронный ресурс), поэтому нет сложностей с его пересчетом для получения значений XCO_2 . На рис. 6 представлены результаты калибровки оценок XCO_2 (ИКФС) по измерениям на Мауна-Лоа. Здесь и далее в качестве спутниковых оценок использовались их медианные значения для пикселей ИКФС-2, попавших в квадрат $4^\circ \times 4^\circ$ по широте и долготе с центром в месте нахождения источника эталонных данных.

После калибровки оценок XCO_2 (ИКФС) по данным Мауна-Лоа среднеквадратическая невязка (rms) спутниковых и наземных данных составляет $\text{rms} = 2.6 \text{ млн}^{-1}$, а коэффициент корреляции $R = 0.67$. Дополнительно, для исключения в оценках XCO_2 ошибок, связанных с облачностью, попадающей в поле зрения ИКФС-2, в качестве критерия фильтрации облачных сцен использовано условие $\eta < 1.05$, где η – отношение приземного давления к давлению на высоте, соответствующей яркостной температуре пикселя в одном из микроонок прозрачности атмосферы, в районе 11 мкм.

Пороговая величина $\eta = 1.05$ представляет собой компромисс между приемлемой величиной rms и количеством пикселей ИКФС-2, включаемых в обработку. Критерий $\eta < 1.05$, установленный эмпирически при калибровке по данным Мауна-Лоа, использовался и в дальнейшем при сопоставлении оценок ИКФС-2 с данными наземных и самолетных измерений в Петергофе и над Новосибирским водохранилищем, причем на материале проанализированных выборок он выполнялся примерно для 20% измерений ИКФС-2.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК XCO_2 (ИКФС) С ДАННЫМИ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАЙОНЕ ПЕТЕРГОФА

В (Никитенко, 2024) было выполнено первое сравнение оценок XCO_2 с данными наземных измерений фурье спектрометра Bruker 125HR, выполненных в Петергофе в 2019–2022 гг. Дополнительно привлекались результаты интерполяции (до 2020 г.) и экстраполяции (после 2020 г.) оценок GOSAT (Taylor, 2022) в районе финской геофизической обсерватории Соданкюля, где расположен один из пунктов измерительной сети TCCON, ближайший к Петергофу. В отличие от (Никитенко, 2024), результаты, представленные на рис. 7,

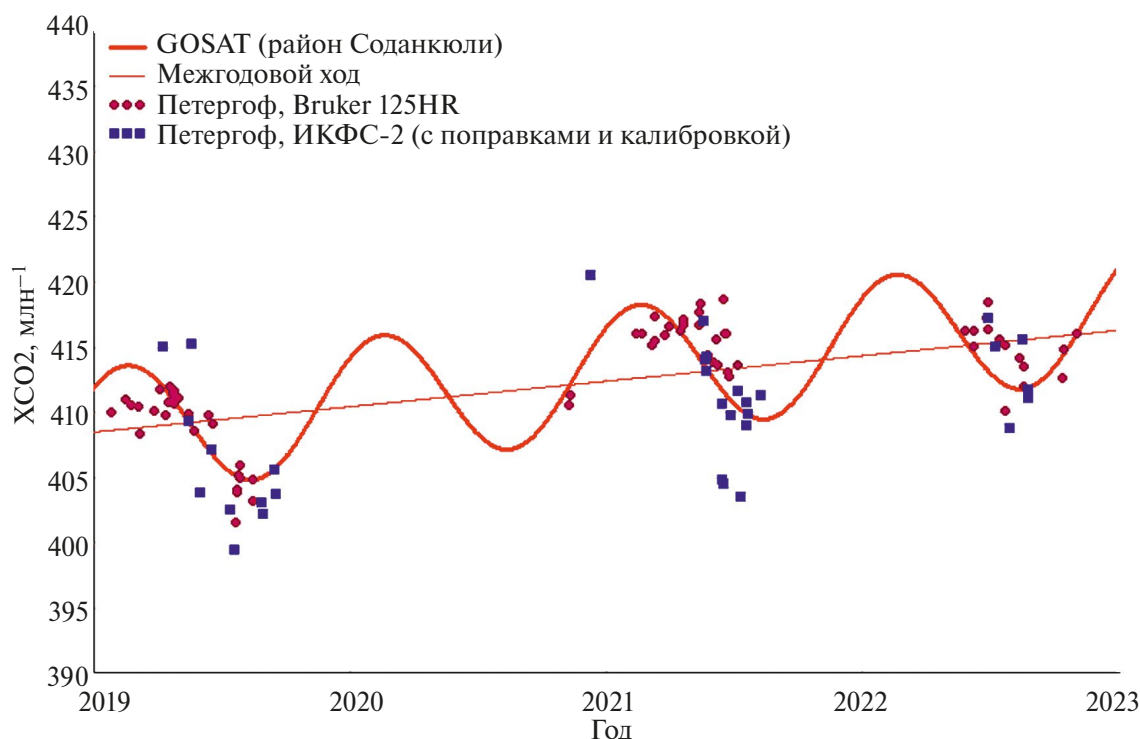


Рис. 7. Сопоставление оценок XCO_2 (ИКФС) со спутниковыми (район Соданкюля) и наземными спектроскопическими измерениями СПбГУ (Bruker 125HR, Петергоф).

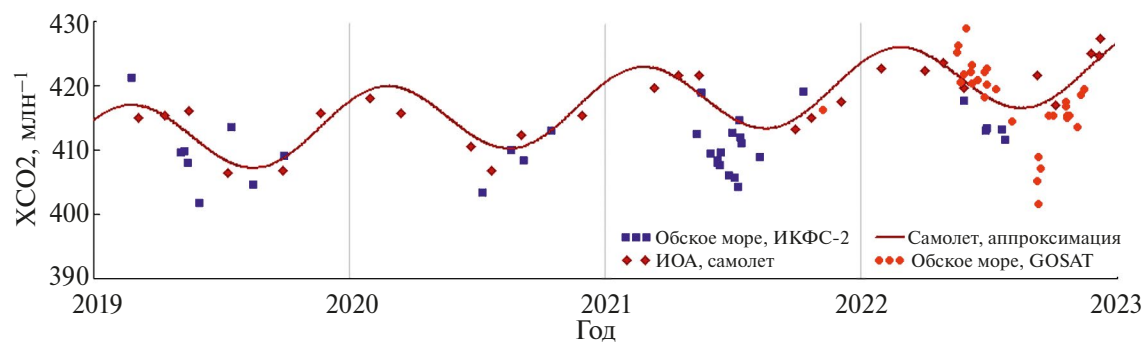


Рис. 8. Сопоставление оценок XCO₂ (ИКФС) с результатами самолетных (ИОА) и спутниковых (GOSAT) измерений в районе Новосибирского водохранилища.

получены с фильтрацией облачных сцен по критерию $\eta < 1.05$ и применением новой линейной функции для коррекции значений XCO₂ (ИКФС), полученной при калибровке оценок XCO₂ по измерениям Мауна-Лоа.

Использование η критерия привело к тому, что не всегда дни измерений ИКФС-2 совпадают с днями наземных измерений Bruker 125HR, поэтому количественная оценка точности спутниковых и наземных восстановлений XCO₂ проводится методом двойных разностей относительно кривой GOSAT, фактически повторяющей (среднеквадратическая невязка $\sigma = 1.8$ млн⁻¹; коэффициент корреляции $R = 0.99$ (Taylor, 2022)) измерения пункта TCCON в Соданкюле. Вычисленное таким образом среднее смещение Δ оценок XCO₂ (ИКФС) относительно наземных измерений Bruker 125HR составило $\Delta = -0.86$ млн⁻¹. Соответственно для ИКФС-2 среднее смещение со значениями кривой GOSAT $\Delta = -0.42$ млн⁻¹, среднеквадратическая невязка $\text{rms} = 3.4$ млн⁻¹, коэффициент корреляции $R = 0.80$; для Bruker 125HR $\Delta = 0.44$ млн⁻¹, $\text{rms} = 2.4$ млн⁻¹, $R = 0.82$. В обоих сопоставлениях стандартные отклонения σ из-за малости средних смещений Δ практически совпали со значениями rms .

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК XCO₂ (ИКФС) С ДАННЫМИ САМОЛЕТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАЙОНЕ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Результаты ретроспективного сопоставления оценок XCO₂ (ИКФС), полученных с помощью модифицированной методики, с самолетными измерениями ИОА в районе Новосибирского водохранилища представлены на рис. 8. На нем также приведены оценки XCO₂ (GOSAT), главным образом, за 2022 г.

Здесь, как и ранее, для сравнения результатов различных по количеству и времени проведения измерений используется опорная квазипериодическая кривая – аппроксимация годового и межгодового хода общего содержания XCO₂ по самолетным данным. Основой для вычислений и аппроксимации временного хода XCO₂ являлись вертикальные профили концентраций диоксида углерода самолета-лаборатории “Оптик” ИОА на базе ТУ-134 (Анохин, 2011) в диапазоне высот 0–7 км. В отличие от сравнений с кривой по данным GOSAT (рис. 7), построенной по измерениям над Соданкюла примерно в 1000 км от Петергофа, самолетная кривая ИОА отражает данные, полученные непосредственно

Таблица 1. Статистические характеристики отклонений оценок XCO₂ от аппроксимации его хода по многолетним самолетным измерениям ИОА

Источник данных	Δ , млн ⁻¹	rms , млн ⁻¹	σ , млн ⁻¹	R	Количество
Самолет	−0.56	2.4	2.4	0.90	27
GOSAT (весь период)	−1.24	5.7	5.6	0.61	31
GOSAT (с учетом пропусков самолетных данных)	−4.25	6.4	4.8	0.81	18
ИКФС-2 (весь период)	−3.75	5.6	4.1	0.56	36
ИКФС-2 (с учетом пропусков самолетных данных)	−1.7	4.4	4.1	0.74	19

вблизи Новосибирского водохранилища, в районе которого получены оценки XCO_2 (ИКФС). В связи с этим статистические характеристики точности оценок XCO_2 по измерениям GOSAT и ИКФС-2 рассчитаны относительно этой квазипериодической кривой и представлены в таблице 1.

Опорная кривая является аппроксимацией самолетных измерений. Естественно, что она обеспечивает с ними наилучшее согласие по сравнению со спутниковыми. При сопоставлении спутниковых данных статистические характеристики рассчитаны для всего рассматриваемого временного периода 2019–2022 гг. Кроме того, для GOSAT и ИКФС-2 они вычислялись только для временных промежутков, когда не было больших пропусков самолетных данных. Так, в расчеты статистических характеристик не вошли летние месяцы 2021 и 2022 гг., когда полеты самолетов не выполнялись. Как видно из таблицы, в этом случае спутниковые оценки дают лучшее согласие и корреляцию с самолетными измерениями для обоих приборов.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Сравнение оценок общего содержания диоксида углерода XCO_2 (ИКФС) с оценками XCO_2 в районе Петергофа (2019–2022 гг.) по данным наземных измерений ИК фурье-спектрометра Bruker 125HR и японского спутника GOSAT выявили большую амплитуду годового хода XCO_2 в оценках по данным ИКФС-2 и их существенное занижение со временем. Вследствие этого в разработанной ранее регрессионной методике уточнена процедура вычисления вертикального профиля концентрации CO_2 и эталонных значений XCO_2 , используемых при получении регрессии. Дополнительно, для корректного определения межгодового хода XCO_2 , выполнена калибровка получаемых оценок по эталонным данным — контактными измерениями XCO_2 на Мауна-Лоа.

Проведенная модификация регрессионной методики позволила существенно уменьшить расхождения с наземными и спутниковыми данными. Среднее смещение оценок XCO_2 (ИКФС) относительно наземных измерений Bruker 125HR в Петергофе и самолетных измерений в районе Новосибирского водохранилища не превышает 1 и 2 млн⁻¹ соответственно. Стандартное отклонение оценок XCO_2 (ИКФС) от данных наземных и самолетных измерений составляет примерно 4 млн⁻¹ при коэффициенте корреляции $R \approx 0.7\text{--}0.8$. Сопоставление с данными многолетних самолетных измерений ИОА в Сибири показало близость статистических характеристик отклонений оценок XCO_2 (ИКФС) и XCO_2 (GOSAT).

Исходя из этого, целесообразно сохранить прежний регрессионный подход к определению XCO_2 по данным ИКФС-2. Для получения рабочей регрессии рекомендуется использовать эталонные контактные измерения концентраций диоксида углерода на высотной мачте обсерватории ZOTTO, на вулкане Мауна Лоа (обсерватория NOAA) и самолетные измерения ИОА; последние для более точного определения вертикального профиля концентрации CO_2 желательно проводить в Центральной Сибири, в районе обсерватории ZOTTO.

Для учета возможного влияния криоосадков на точность оценки XCO_2 их толщину следует включать в состав предикторов рабочих регрессий, получаемых для новых спутников серии “Метеор-М”.

Систематическую ошибку в оценках XCO_2 , связанную с состоянием спутникового радиометра и возможным изменением его характеристик, трудно или невозможно учесть в регрессионном алгоритме. Для корректного определения межгодового хода XCO_2 требуется калибровка получаемых оценок по эталонным измерениям. Наиболее простым способом этой калибровки является использование контактных измерений на Мауна-Лоа без какого-либо использования априорной и модельной информации.

Для валидации получаемых оценок, а также ускорения получения рабочих регрессий по контактными измерениями целесообразно дополнительно использовать данные наземной сети TCCON. Сеть TCCON на данный момент содержит 26 станций. Данные измерений XCO_2 на станциях TCCON можно получать оперативно (с временным лагом несколько месяцев от даты измерения (TCCON,

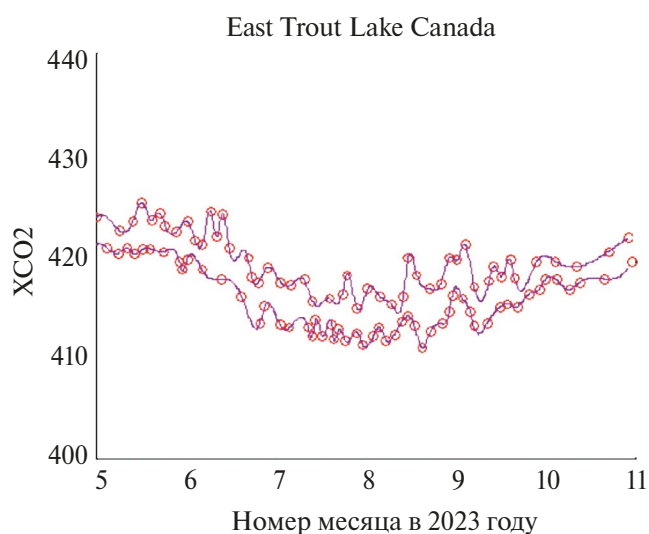


Рис. 9. Временной ход максимальных и минимальных XCO_2 под данным станции East Trout Lake TCCON.

Таблица 2. Станции TCCON для валидации оценок ХСО₂ ИКФС-2

Станция	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м
East Trout Lake (США)	54.35 с.ш.	104.99 з.д.	501.8
Park Falls (США)	45.94 с.ш.	90.27 з.д.	442.0
Sodankyla (Финляндия)	67.37 с.ш.	26.63 з.д.	188.0
Harwell (Великобритания)	51.57 с.ш.	1.32 з.д.	142.0
Izaña, Tenerife (Испания)	28.31 с.ш.	16.50 в.д.	2 367.0

2024)). В качестве примера на рис. 9 показан ход значений ХСО₂ по данным станции East Trout Lake в 2023 году, начиная с мая.

Вероятно, что для валидации оценок ХСО₂ будет достаточно данных с 5 станций TCCON, представленных в таблице 2.

Следует отметить в заключение, что оценки ХСО₂ на сети TCCON при использовании различных версий программного комплекса восстановления ХСО₂, калибруются по самолетным измерениям. Например, переход в этом комплексе на новую спектроскопическую информацию по атмосферным газам в 2021 г. изменил значение коэффициента калибровки на 2% (т.е. увеличение ХСО₂ на 8 млн⁻¹) (Roshe, 2021). Вследствие этого использование данных TCCON должно иметь вспомогательный характер при получении рабочей регрессии для новых ИКФС-2, не подменяя контактные измерения вертикальных профилей концентрации СО₂ с помощью самолетов и высотных мачт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Силицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофанов А.В. Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.С. Самолет – лаборатория ТУ-134 “Оптик” // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 9. С. 805–816.

Антонович В.В., Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Основные результаты мониторинга состава воздуха на территории Западной Сибири и акватории Российского сектора Арктики, проведенного ИОА СО РАН с помощью стационарных и мобильных комплексов // Сборник тезисов “Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2023)”. Санкт-Петербург. 2023. С. 8–9.

Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Вып. 22. № 5. С. 457–464.

База данных измерений сети TCCON. URL: <https://tccodata.org/plots/public> (Дата обращения 10.01.2024).

Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 08. С. 1045–1054.

Бюллетень ВМО, 2023. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19. Geneva: WMO. (Электронный ресурс). URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/68532> (Дата обращения 12.01.2024).

Вертикальные профили диоксида углерода над Молокаи (Гавайский архипелаг). [Электронный ресурс] <https://gml.noaa.gov/dv/data/index.php?site=NAA&type=Aircraft%2BPPF> Р (Дата обращения 14.12.2023).

Голомолзин В.В., Рублев А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Прокушкин А.С., Панов А.В. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата Метеор-М № 2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 79–95.

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В., Козлов Д.А., Мацицкий Ю.П., Никулин А.Г., Травников Р.И., Романовский А.С., Архипов С.А., Целиков В.А. Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2009. Т. 1. С. 259–266.

Михальченко Р.С., Григоренко Б.В., Гетманец В.Ф., Курская Т.А. Влияние толщины криоконденсата на радиационные характеристики экрана теплоизоляции // Препринт № 43-88. ФТИНТ АН УССР. Харьков. 1988. С. 15.

Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Рублев А.Н., Голомолзин В.В., Киселева Ю.В., Успенский А.Б., Козлов Д.А. Сравнения наземных и спутниковых измерений общего содержания СО₂ в Петергофе // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2024. Т. 21. №4. С. 275–283.

Успенский А.Б., Рублев А.Н., Козлов Д.А., Голомолзин В.В., Киселева Ю.В., Козлов И.А., Никулин А.Г. Мониторинг основных климатических переменных атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 5–18.

Успенский А.Б. Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 1. С. 122–14.

Успенский А.Б., Тимофеев Ю.М., Козлов Д.А., Черный И.В. Развитие методов и средств дистанционного температурно-влажностного зондирования земной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 33–44.

Fiedler Lars, Stuart Newman, and Stephan Bakan. Correction of detector nonlinearity in Fourier transform spectroscopy with a low-temperature blackbody // Applied Optics. Vol. 44. No. 25. September 2005. P. 5332–5340.

Hudgins D.M., Sandford S.A., Allamandola L.J., & Tielens A.G.G.M. Mid- and Far-Infrared Spectroscopy of Ices:

Optical Constants and Integrated Absorbances // *Astrophysical Journal Supplement*, 1993, 86, 713.

Roche S., Strong K., Wunch D., Mendonca J., Sweeney C., Baier B., Biraud S.C., Laughner J.L., Toon G.C., and Connor B.J. Retrieval of atmospheric CO₂ vertical profiles from ground-based near-infrared spectra // *Atmos. Meas. Tech.*, 2021, 14, 3087–3118.

Taylor et al. An 11-year record of XCO₂ estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm. URL <https://doi.org/10.5194/essd-14-325-2022>.

Taylor T.E., O'Dell C.W., Baker D., Bruegge C., Chang A., Chapsky L., Chatterjee A., Cheng C., Chevallier F., Crisp D., Dang L., Drouin B., Eldering A., Feng L., Fisher B., Fu D., Gunson M., Haemmerle V., Keller G.R., Kiel M., Kuai L., Kurosu T., Lambert A., Laughner J., Lee R., Liu J., Mandrake L., Marchetti Y., McGarragh G., Merrelli A., Nelson R.R., Osterman G., Oyafuso F., Palmer P.I., Payne V.H., Rosenberg R., Somkuti P., Spiers G.,

To C., Weir B., Wennberg P.O., Yu S., and Zong J. Evaluating the consistency between OCO-2 and OCO-3 XCO₂ estimates derived from the NASA ACOS version 10 retrieval algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 3173–3209, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3173-2023>, 2023.

Wunch Debra, Toon Geoffrey C., Blavier Jean-François L., Washenfelder Rebecca A., Notholt Justus., Connor Brian J., Griffith David W.T., Sherlock Vanessa, Wennberg Paul O. The Total Carbon Column Observing Network // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2011 369, 2087–2112. [Электронный ресурс] URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2010.0240>. DOI: 10.1098/rsta.2010.0240.

Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A. IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // *GSICS Quarterly*. 2018. V. 12. No. 1. P. 4–6.

Derivation Of the Carbon Dioxide Total Column in the Atmosphere from Satellite-Based Infrared Fourier-Transform Spectrometer IKFS–2 Measurements: Analysis and Application Experience

A. N. Rublev¹, V. V. Golomolzin¹, A. B. Uspensky¹, Yu. V. Kiseleva¹, D. A. Kozlov², B. D. Belan³, M. Yu. Arshinov³, Yu. M. Timofeev⁴, A. V. Panov⁵, A. S. Prokushkin⁵

¹State Research Centre “Planeta”, Moscow, Russia

²Federal State Unitary Enterprise Keldysh Research Center, Moscow, Russia

³V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Tomsk, Russia

⁴Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁵Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

The paper discusses the use of a new version of the regression technique for derivation the total content of carbon dioxide in the atmosphere XCO₂ (column-averaged dry-air mole fraction) from measurements of the infrared Fourier-transform spectrometer IKFS–2 installed on board Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2. To evaluate the accuracy of satellite-based XCO₂ estimates the retrospective comparison was made with data from ground-based spectroscopic measurements at Peterhof site of St. Petersburg State University as well as with aircraft measurements of the V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IOA) in the area of the Novosibirsk Reservoir conducted in 2019–2022. A brief description of the regression technique modifications is given made to improve the accuracy of satellite – based XCO₂ estimates. In particular, to compensate for the effect of changes in the IKFS-2 characteristics during a long flight, the XCO₂ estimates calibration is realized using ground – based XCO₂ measurements at the NOAA Observatory on Mauna Loa volcano (island of Hawaii). After calibration and cloud scenes filtering, the discrepancy between satellite estimates and ground-based / aircraft measurements is characterized by root mean square deviation of ~4 ppm or 1% of the CO₂ total content. In order to accelerate the adjustment of the regression technique, used for estimating XCO₂, to IKFS-2 data on new satellites, it is reasonable to use XCO₂ observations at the TCCON terrestrial network in addition to conventional contact measurements of CO₂ concentrations. Along with this, it seems rational to use the cryogenic film thickness on the glass of the IKFS-2 photodetector, characterizing the state of the instrument, as additional predictor in the regression model.

Keywords: greenhouse gas, carbon dioxide, atmospheric concentration, total column, ground-based network, infrared Fourier-transform spectrometer, regression technique

REFERENCES

Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Morozov M.V., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Sikov G.P., Simonenkov D.V., Sinicyn D.S., Tolmachev G.N., Filippov D.V., Fofonov A.V. Chernov D.G., Shamanaev V.S., Shmargunov V.S. Samolet - laboratoriya TU-134 “Optik” // *Optika atmosfery i okeana*. 2011. T. 24. № 9. S. 805–816.

Antonovich V.V., Antohina O.Yu., Antohin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Guruleva E.V., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazhikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Osnovnye rezul'taty monitoringa sostava vozduha na territorii Zapadnoj Sibiri i akvatorii Rossijskogo sektora Arktiki, provedennogo IOA SO RAN s po-

- moshch'yu stacionarnyh i mobil'nyh kompleksov // Sbornik tezisov "Mezhdunarodnyj simpozium «Atmosfernaya radiatsiya i dinamika» (MSARD-2023)". Sankt-Peterburg. 2023. P. 8–9.
- Arshinov M. Yu., Belan B. D., Davydov D. K., Inouje G., Maksyutov Sh., Machida T., Fofonov A. V. Vertikal'noe raspredelenie parnikovyh gazov nad Zapadnoj Sibir'yu po dannym mnogoletnih izmerenij // Optika atmosfery i okeana. 2009. Vyp. 22. № 5. С. 457–464.
- Baza dannyh izmerenij seti TCCON. URL: <https://tccondata.org/plots/public> (Data obrashcheniya 10.01.2024).
- Belan B. D. Dinamika sloya peremeshivaniya po aerolizatsionnym dannym // Optika atmosfery i okeana. 1994. T. 7. № 08. P. 1045–1054.
- Byulleten' WMO, 2023. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19. Geneva: WMO. (Elektronnyj resurs). URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/68532> (Data obrashcheniya 12.01.2024).
- Vertikal'nye profili dioksida ugleroda nad Molokai (Gavajskij arhipelag). [Elektronnyj resurs] <https://gml.noaa.gov/dv/data/index.php?site=HAA&type=Aircraft%2BPFP> (Data obrashcheniya 14.12.2023).
- Golomolzin V. V., Rublev A. N., Kiseleva Yu. V., Kozlov D. A., Prokushkin A. S., Panov A. V. Opredelenie obshchego soderzhaniya dioksida ugleroda nad territoriej Rossii po dannym otechestvennogo kosmicheskogo apparata Meteor-M № 2 // Meteorologiya i gidrologiya. 2022. № 4. P. 79–95.
- Zavelevich F. S., Golovin Yu. M., Desyatov A. V., Kozlov D. A., Macickij Yu. P., Nikulin A. G., Travnikov R. I., Romanovskij A. S., Arhipov S. A., Celikov V. A. Tekhnologicheskij obrazec bortovogo infrakrasnogo fur'e-spektrometra IKFS-2 dlya temperatur-nogo i vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli // Sovr. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa. 2009. T. 1. P. 259–266.
- Mihal'chenko P. S., Grigorenko B. V., Getmanec V. F., Kurskaya T. A. Vliyanie tolshchiny kriokondensata na radiacionnye harakteristiki ekrana teploizolyacii // Preprint № 43–88. FTINT AN USSR. Har'kov. 1988. P. 15.
- Nikitenko A. A., Timofeev Yu. M., Virolajnen Ya. A., Rublev A. N., Golomolzin V. V., Kiseleva Yu. V., Uspenskij A. B., Kozlov D. A. Sravneniya nazemnyh i sputnikovyh izmerenij obshchego soderzhaniya CO₂ v Petergofe // Sovr. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa. 2024. V. 21. № 4. P. 275–283.
- Uspenskij A. B., Rublev A. N., Kozlov D. A., Golomolzin V. V., Kiseleva Yu. V., Kozlov I. A., Nikulin A. G. Monitoring osnovnyh klimaticheskikh peremennyh atmosfery po dannym sputnikovogo IK-zondirovshchika IKFS-2 // Meteorologiya i gidrologiya. 2022. № 11. P. 5–18.
- Uspenskij A. B. Izmereniya raspredeleniya soderzhaniya parnikovyh gazov v atmosfere so sputnikov // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2022. T. 8. № 1. P. 122–14.
- Uspenskij A. B., Timofeev Yu. M., Kozlov D. A., Chernyj I. V. Razvitiye metodov i sredstv distancionnogo temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya zemnoj atmosfery // Meteorologiya i gidrologiya. 2021. № 12. S. 33–44.
- Fiedler Lars, Stuart Newman, and Stephan Bakan. Correction of detector nonlinearity in Fourier transform spectroscopy with a low-temperature blackbody // Applied Optics. Vol. 44. No. 25, September 2005. P. 5332–5340.
- Hudgins D. M., Sandford S. A., Allamandola L. J., & Tielens A. G. G. M. Mid- and Far-Infrared Spectroscopy of Ices: Optical Constants and Integrated Absorbances // Astrophysical Journal Supplement, 1993, 86, 713.
- Roche S., Strong K., Wunch D., Mendonca J., Sweeney C., Baier B., Biraud S. C., Laughner J. L., Toon G. C., and Connor B. J. Retrieval of atmospheric CO₂ vertical profiles from ground-based near-infrared spectra // Atmos. Meas. Tech., 2021, 14, 3087–3118.
- Taylor et al. An 11-year record of XCO₂ estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm. URL <https://doi.org/10.5194/essd-14-325-2022>.
- Taylor T. E., O'Dell C. W., Baker D., Bruegge C., Chang A., Chapsky L., Chatterjee A., Cheng C., Chevallier F., Crisp D., Dang L., Drouin B., Eldering A., Feng L., Fisher B., Fu D., Gunson M., Haemmerle V., Keller G. R., Kiel M., Kuai L., Kurosu T., Lambert A., Laughner J., Lee R., Liu J., Mandrake L., Marchetti Y., McGarragh G., Merrelli A., Nelson R. R., Osterman G., Oyafuso F., Palmer P. I., Payne V. H., Rosenberg R., Somkuti P., Spiers G., To C., Weir B., Wennberg P. O., Yu S., and Zong J. Evaluating the consistency between OCO-2 and OCO-3 XCO₂ estimates derived from the NASA ACOS version 10 retrieval algorithm, Atmos. Meas. Tech., 16, 3173–3209, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3173-2023>, 2023.
- Wunch Debra, Toon Geoffrey C., Blavier Jean-François L., Washenfelder Rebecca A., Notholt Justus, Connor Brian J., Griffith David W. T., Sherlock Vanessa, Wennberg Paul O. The Total Carbon Column Observing Network // Phil. Trans. R. Soc. A 2011 369, 2087–2112. [Электронный ресурс] URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2010.0240>. DOI: 10.1098/rsta.2010.0240.
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A. IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // GSICS Quarterly. 2018. V. 12. No. 1. P. 4–6.