

УДК 551.521.2

ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ИК-ЗОНДИРОВЩИКА ИКФС-2

© 2024 г. Ю. М. Тимофеев^a, Г. М. Неробелов^{a,b,c,*}, Д. А. Козлов^d, И. С. Черкашин^d,
П. М. Неробелов^{a,e}, А. Н. Рублев^f, А. Б. Успенский^f, Ю. В. Киселева^f

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
199034, Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, Россия

^bСПб ФИЦ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,
187110, ул. Корпусная 18, Санкт-Петербург, Россия

^cРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
195196, Малоохтинский проспект 98, Санкт-Петербург, Россия

^dАО ГНЦ “Центр Келдыша”, 125438, Онежская ул., д. 8, Москва, Россия

^eСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия

^fФГБУ НИЦ «Планета» (Европейский центр), 123242, Большой Предтеченский пер., д. 7, Москва, Россия

*e-mail: akulishe95@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Современные изменения климата Земли обусловлены нарушениями её радиационного баланса (РБ). В работе проанализированы изменения одной из компонент РБ – среднегодовых и среднемесячных глобальных и широтных значений уходящего теплового излучения или собственного излучения Земли (СИЗ) в спектральной области 660–1300 см⁻¹ за период 2015–2022 гг. по измерениям ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2, расположенного на борту спутника “Метеор-М” № 2. В работе показано, что СИЗ на глобальном масштабе в спектральной области 660–1300 см⁻¹ в среднем уменьшается за период 2015–2022 гг. Так, среднее глобальное интегральное излучение в этом же диапазоне длин волн уменьшилось на ~0.5 Вт м⁻² за 2015–2022 гг. Наиболее выраженное уменьшение СИЗ наблюдается в тропиках, а наименее выраженное – в полярных широтах. Кроме того, в тропиках наблюдается отрицательный тренд интегрального СИЗ (до 0.95–1.3±0.1 Вт м⁻² за 8 лет) с относительно высоким коэффициентом детерминации (0.46–0.57), тогда как в полярных и средних широтах выраженного тренда не наблюдается.

Ключевые слова: радиационный баланс, изменение климата Земли, ИКФС-2, собственное излучение Земли

DOI: 10.31857/S0002351524030045 EDN: JHZZFR

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы изучения современных изменений климата Земли, факторов, которые его определяют, а также экономических, политических и экологических последствий разного рода, являются очень актуальными в наше время [Катцев и др., 2014; Акентьева и др., 2017; Lee et al., 2023]. Исследования радиационного баланса (РБ), определяющего климат Земли, ведутся уже многие десятилетия [Будыко, 1969]. При этом используются различные измерения, теоретические и численные исследования.

Радиационный баланс R системы (например, планеты Земля) определяется разностью между количеством солнечной радиации, поглощенной планетой, и количеством радиации, излучаемой ей обратно в космос. Выражение для R можно записать в следующем виде [Тимофеев, Васильев, 2003]:

$$R = Q_{\infty}(1 - A) - F_{\infty}, \quad (1)$$

где Q_{∞} – средний поток прямой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, A – альбедо поверхности Земли, F_{∞} – средний поток уходящей длинноволновой радиации Земли.

С 2000 г. программа CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) обеспечивает глобальные наблюдения за РБ и его компонентами на верхней границе атмосферы, в самой атмосфере и на поверхности, а также за сопутствующими облачными, аэрозольными и метеорологическими характеристиками в различных временных и пространственных масштабах [Wielicki et al., 1996; Loeb et al., 2016]. Для этого используются специальные приборы, алгоритмы и программы валидации для обеспечения высокого качества данных, характеризующих РБ [Shunlin et al., 2019].

Для оценки РБ в рамках программы CERES используются измерения аппаратуры космических аппаратов на приполярных солнечно-синхронных орбитах. Всего запущено шесть приборов CERES на четырех космических аппаратах (<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/ceres>). К настоящему времени функционируют три из них на спутнике Terra, S-NPP (Suomi National Polar-Orbiting Partnership) и NOAA-20. Приборы измеряют интегральные потоки отраженного излучения Солнца и собственного излучения Земли (СИЗ) в диапазонах 0.3–5.0, 0.3–100 и 8–12 мкм [9]. Для исследований одной из компонент РБ – СИЗ во всей области ИК спектра – также привлекаются измерения спутниковой аппаратуры высокого спектрального разрешения [Harries et al., 2001; Brindley et al., 2003; Anderson et al., 2004; Phulpin et al., 2007; Brindley et al., 2016; Тимофеев и др., 2018].

Анализ многолетних рядов измерений спектров СИЗ с помощью спутниковых гиперспектральных (высокого спектрального разрешения) ИК-зондировщиков AIRS, IASI, CrIS описан в работах [Zhang et al., 2017; Wang et al., 2019; Wang et al., 2021; Whitburn et al., 2022]. В работах [Brindley et al., 2015; Whitburn et al., 2021] проанализированы измерения спектров СИЗ ИК-зондировщиком IASI для нескольких периодов, приведены оценки временных трендов спектров и обсуждены обуславливающие их факторы. Например, согласно [Whitburn et al., 2021], СИЗ в среднем за период 2008–2017 гг. уменьшается в полосах поглощения CO_2 и CH_4 , что, как считают авторы, связано с увеличением содержания этих парниковых газов в атмосфере. В работе также анализируется влияние на СИЗ процессов ENSO (или El Niño/Southern Oscillation) и PDO (или Pacific Decadal Oscillation), приводящих к изменению температуры поверхности океана.

В настоящем исследовании анализируются изменения спектров СИЗ по данным измерений инфракрасным Фурье-спектрометром ИКФС-2 на борту спутника “Метеор-М” № 2 в период 2015–2022 гг. Анализ основан на использовании только данных измерений интенсивностей СИЗ без привлечения какой либо дополнительной априорной информации, численных методик обработки данных (например, выделения безоблачных ситуаций, переход от интенсивностей к потоком и т.д.), которые могут заметно влиять на результаты анализа.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

2.1. Спутниковый ИК-зондировщик ИКФС-2

В июле 2014 г. был запущен российский метеорологический спутник “Метеор-М” № 2, на борту которого размещена целевая аппаратура для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли. Один из приборов – ИК Фурье-спектрометр ИКФС-2 – предназначен для получения информации об атмосфере и поверхности для численных прогнозов погоды и изучения современных изменений климата Земли [Успенский и др., 2021; Успенский и др., 2022]. Основные технические характеристики ИКФС-2 приведены в работах [Завелевич и др., 2008; Головин и др., 2013; Timofeyev et al., 2019].

Прибор ИКФС-2, в отличие от аппаратуры CERES, измерял потоки СИЗ в узких телесных углах (горизонтальное разрешение прибора ~30 км). Измерения проводились в ИК области спектра ($660\text{--}2000\text{ см}^{-1}$) с разрешением $\sim 0.5\text{ см}^{-1}$ в течение 2014–2022 гг. В данной работе анализируются пространственно-временные вариации спектров СИЗ в диапазоне $660\text{--}1300\text{ см}^{-1}$, для которого погрешности измерений минимальны ($0.1\text{--}0.2\text{ мВт/м}^2\text{ см}^{-1}\text{ ср}$). В этой спектральной области находятся полоса поглощения CO_2 15 мкм ($660\text{--}750\text{ см}^{-1}$), часть окна прозрачности 8–12 мкм ($800\text{--}950\text{ см}^{-1}$), полоса озона 9.6 мкм ($100\text{--}1100\text{ см}^{-1}$), а также спектральные линии и полосы поглощения водяного пара и других атмосферных газов (например, CH_4 и N_2O – $1250\text{--}1300\text{ см}^{-1}$). Данная спектральная область содержит от ~47 до 73% полного интегрального теплового излучения планеты в зависимости от средней температуры атмосферы (т.е. от сезонов и регионов).

Для указанной спектральной области были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые

спектры за период 2015–2022 гг. по всему земному шару и для шести широтных зон (от -90° до 90° с шагом 30°). За 2014 г. доступно всего 5 месяцев, поэтому в работе данные за этот год не рассматриваются. Таким образом, получено 96 среднемесячных и 8 среднегодовых спектров в виде средних по всему земному шару и для каждой выделенной широтной зоны. Спектры, осредненные за 2015 г., приняты за референсные, с которыми сравнивались остальные.

2.2. Интегральные значения СИЗ и яркостная температура

Высокое качество и стабильность абсолютной калибровки измеренных с помощью ИКФС-2 спектров подтверждены результатами сопоставлений с измерениями откалиброванных спутниковых приборов, в частности, SEVIRI/Meteosat, IASI/Metop, см. [Успенский и др., 2022; Timofeyev et al., 2019]. Это позволило проанализировать в работе, наряду с осредненными спектрами интенсивностей, интегральные значения СИЗ в спектральной области $660\text{--}1300\text{ см}^{-1}$.

Также в исследовании рассмотрены яркостные температуры (ЯТ) излучения в Кельвинах, рассчитанные на основе измеренных спектров с помощью функции Планка. Анализ ЯТ позволяет оценить вклад определенных атмосферных слоев и исследовать физические причины изменений СИЗ. Так, в окне прозрачности $8\text{--}12\text{ мкм}$ СИЗ формируется в значительной степени поверхностью планеты или облаками. Вклад тех или иных слоев атмосферы в распределение интенсивности излучения в полосах поглощения атмосферных газов зависит от их оптической плотности. Например, СИЗ в центре полосы поглощения CO_2 15 мкм формируется в стратосфере, а СИЗ в ее крыльях — в тропосфере.

2.3. Регрессионный анализ измеренных спектров

Хотя период измерений прибора ИКФС-2 относительно мал (около 8 лет), представляет интерес оценка временных трендов СИЗ в терминах среднемесячных значений. Для этого воспользуемся аппроксимационной моделью спектров, построенной с помощью множественной линейной регрессии (МЛР). Пример использования подобной модели можно найти в статье [Bernet et al., 2019]. Общий вид уравнения МЛР с учетом сезонных вариаций представлен в виде следующего выражения (2)

$$I_{MLR} = a + b * t + \sum_n^N c_n * \sin \frac{2\pi}{T_n} * t + d_n \sum_n^N \cos \frac{2\pi}{T_n} * t \quad (2)$$

где $I_n = 12, 6, 4, 3$ в зависимости от n ; t — месяц. Благодаря изменению параметра T_n гармоническая функция представляет изменение в виде волны с длиной 12, 6, 4 и 3 месяцев; a, b, c_n и d_n — коэффициенты множественной линейной регрессии. Данная функция хорошо описывает сезонную вариацию средних интегральных интенсивностей — как глобальных, так и в широтных зонах. Анализ показывает, что основной вклад вносит 12-месячное изменение гармоник.

Таким образом, исключение части с гармониками из среднемесячных значений интегрального СИЗ на основе измерений ИКФС-2 позволит уменьшить влияние сезонного изменения СИЗ, связанного с обращением Земли вокруг Солнца.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Вариации среднегодовых глобальных спектров уходящего излучения Земли

На рис. 1 приведены спектры разностей среднегодовых глобальных СИЗ за период 2016–2022 гг. относительно 2015 г. (ГГГГ — 2015 г.) в спектральной области $660\text{--}1300\text{ см}^{-1}$. Максимальные разности наблюдаются в 2016 г., что обусловлено максимальным значением СИЗ в этот год. Положительные разности в течение 2016–2019 гг. означают, что значения среднегодового глобального СИЗ в эти годы больше, чем в 2015 г. При этом разности в период 2016–2019 гг. уменьшаются, что указывает на постепенное уменьшение значений СИЗ. Начиная с 2020 г. разности отрицательны. Это указывает на то, что значения СИЗ с 2020 г. меньше значений в период 2015 г.

Общие вариации СИЗ за весь исследуемый период максимальны в окне прозрачности $800\text{--}950\text{ см}^{-1}$ и достигают $\sim 1.0\text{ Вт/м}^2\text{ см}^{-1}$ ср. В центральных частях полос поглощения CO_2 15 мкм ($670\text{--}700\text{ см}^{-1}$) и озона 9.6 мкм ($970\text{--}1070\text{ см}^{-1}$) вариации СИЗ заметно меньше. Это обусловлено формированием СИЗ в этих спектральных областях в стратосфере и низким влиянием на него меняющихся тропосферных облаков.

Для более наглядного представления временного изменения глобального среднегодового СИЗ, на рис. 2 представлено СИЗ в виде интегрированных значений в исследуемой спектральной области.

Как следует из рис. 2, за период 2016–2021 гг. среднегодовое глобальное СИЗ уменьшилось

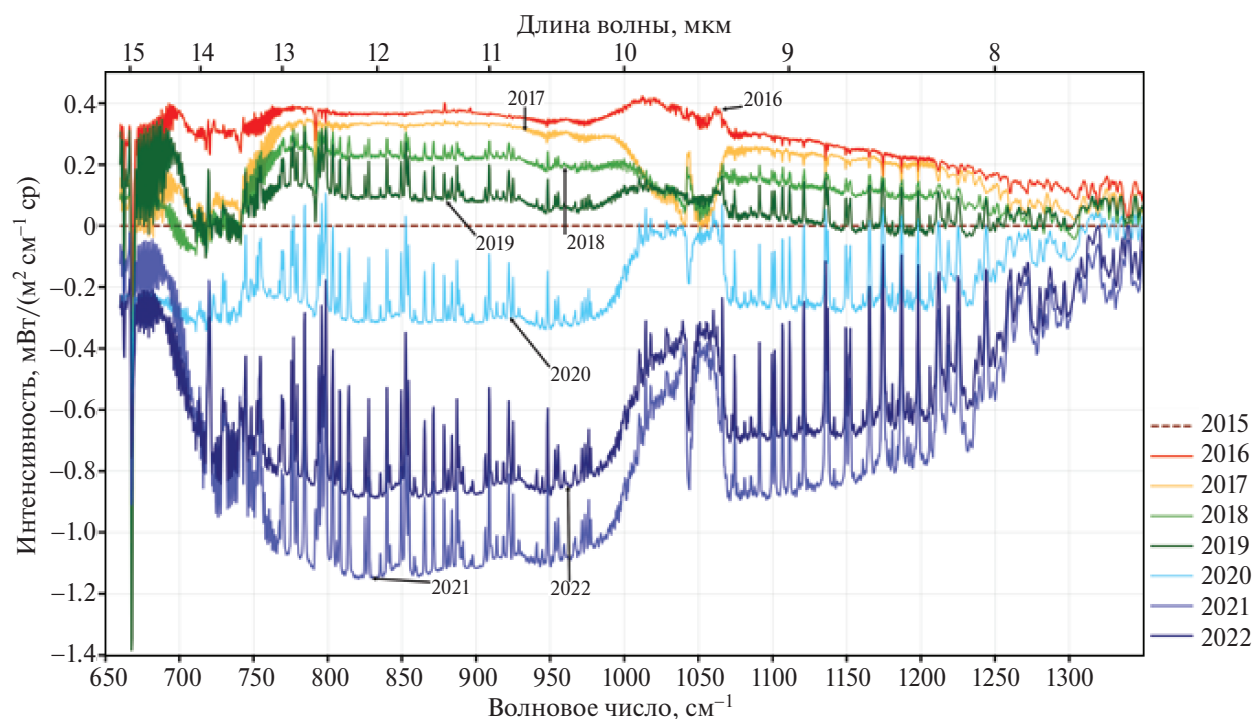


Рис. 1. Спектры разностей среднегодового глобального СИЗ в диапазоне 660–1300 см^{-1} за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. по данным измерений ИКФС-2.

почти на 0.5 Вт/м² ср. с последующим незначительным увеличением в 2022 г. Этот процесс уменьшения СИЗ может являться одной из причин положительного разбаланса РБ, что также отмечено в ряде публикаций (например, в [Susskind et al., 2012; Dewitte et al., 2017; Dewitte et al., 2018; Loeb et al., 2021; Dübal et al., 2021]). Под положительным разбалансом понимается положительная разность между приходящим к Земле коротковолновым и уходящим длинноволновым излучением (Р в выражении 1).

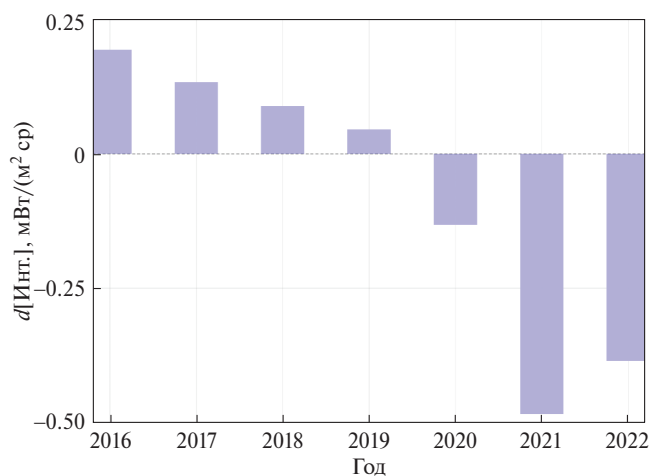


Рис. 2. Временное изменение среднегодового глобального интегрального СИЗ в спектральной области 660–1300 см^{-1} за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. по данным измерений ИКФС-2.

На рис. 3 приводятся среднегодовые глобальные спектры ЯТ за период 2016–2022 гг. относительно 2015 г. Максимальные ЯТ наблюдаются для 2016 г. В период 2017–2021 гг. наблюдается постепенное уменьшение яркостной температуры. Однако в 2022 г. средний глобальный спектр ЯТ увеличился по сравнению с 2021 г. Общее уменьшение средних ЯТ в окне прозрачности (850–950 см^{-1}) за весь период измерений достигает ~1К. Значительно меньшие изменения ЯТ наблюдаются в центральной части полосы поглощения CO_2 15 $\mu\text{м}$ (650–700 см^{-1}). Это обусловлено тем, что СИЗ на длинах волн центра полосы поглощения CO_2 формируется в стратосфере. Увеличение содержания CO_2 в атмосфере в течение исследуемого периода и повышение высот формирования СИЗ на определенных длинах волн объясняет изменение СИЗ за счет положительного вертикального градиента температуры в стратосфере. Снижение ЯТ в окне прозрачности (800–950 см^{-1}) можно объяснить тем же подъемом излучающих слоев, но уже в тропосфере и отрицательным вертикальным градиентом температуры в тропосфере, а также увеличением количества тропосферных облаков и их сильным влиянием на СИЗ (в среднем по всему земному шару) [Ceppiand, Nowack, 2021].

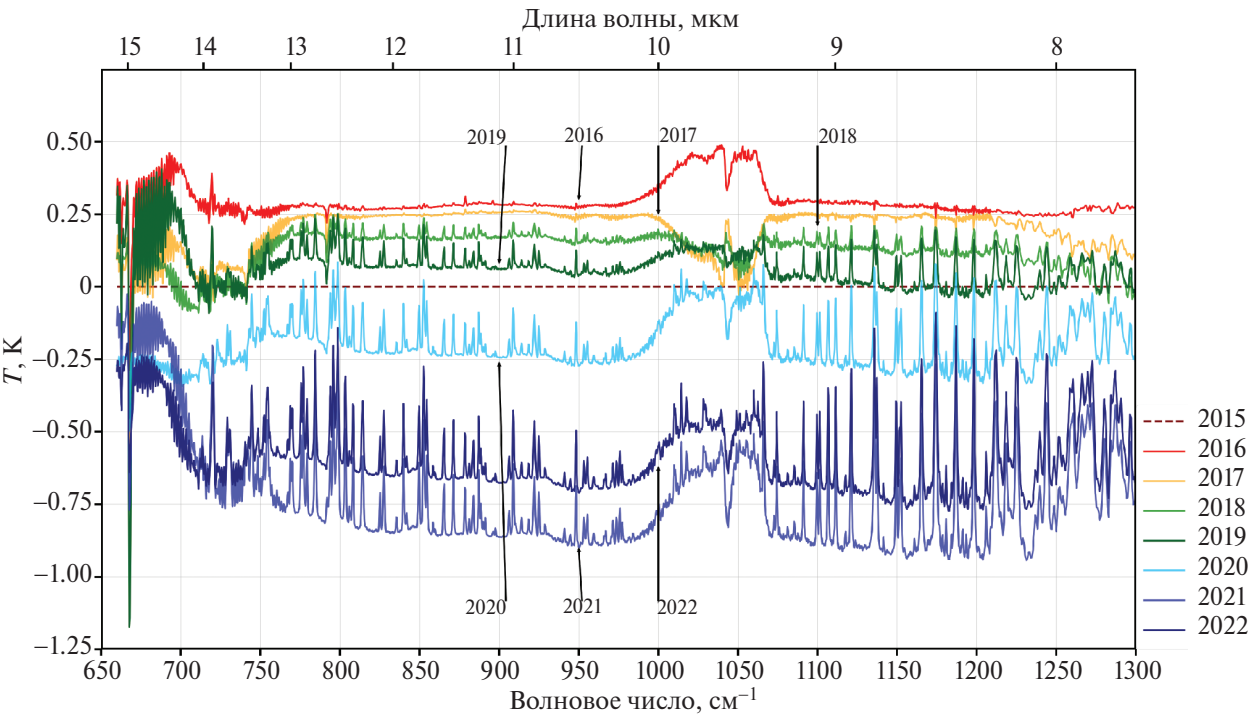


Рис. 3. Временное изменение спектра средних глобальных ЯТ Земли в спектральной области 660–1300 см⁻¹ за 2016–2022 гг. относительно 2015 г.

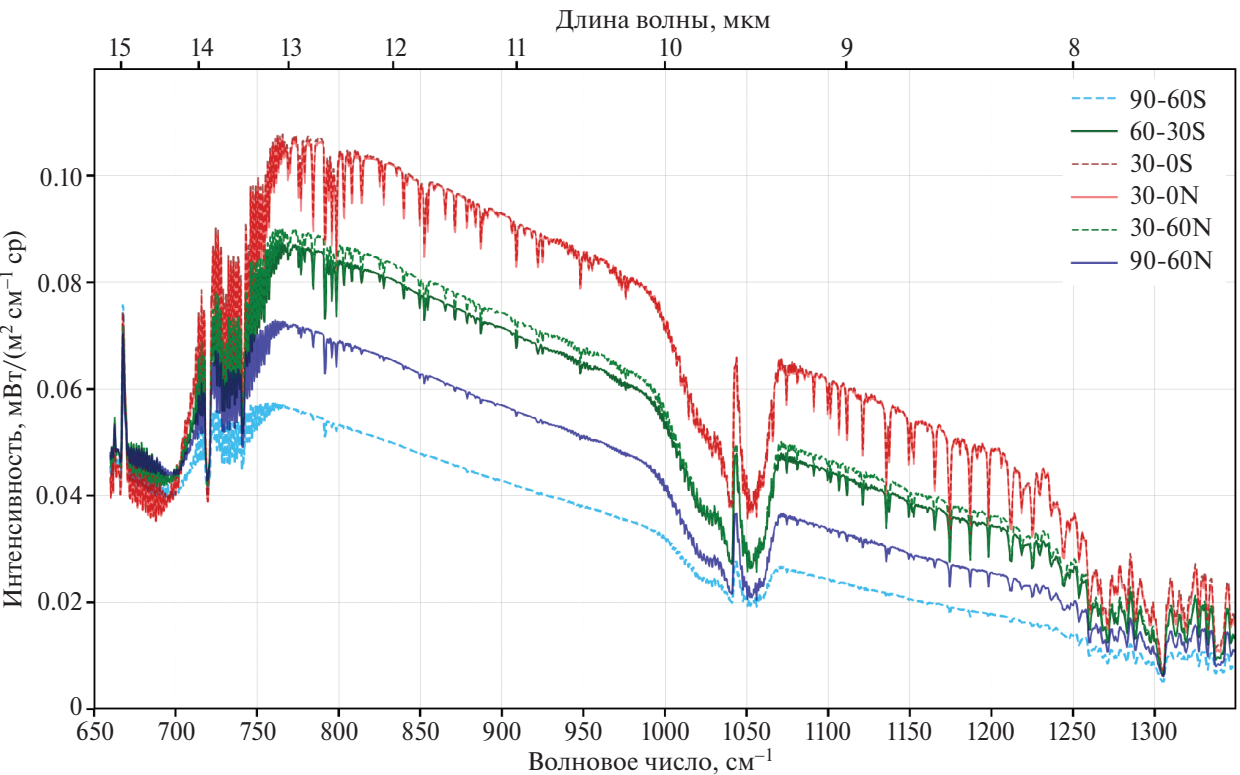


Рис. 4. Средние за 2015–2022 гг. спектры СИЗ в диапазоне 660–1300 см⁻¹ для шести широтных зон на основе измерений ИКФС-2.

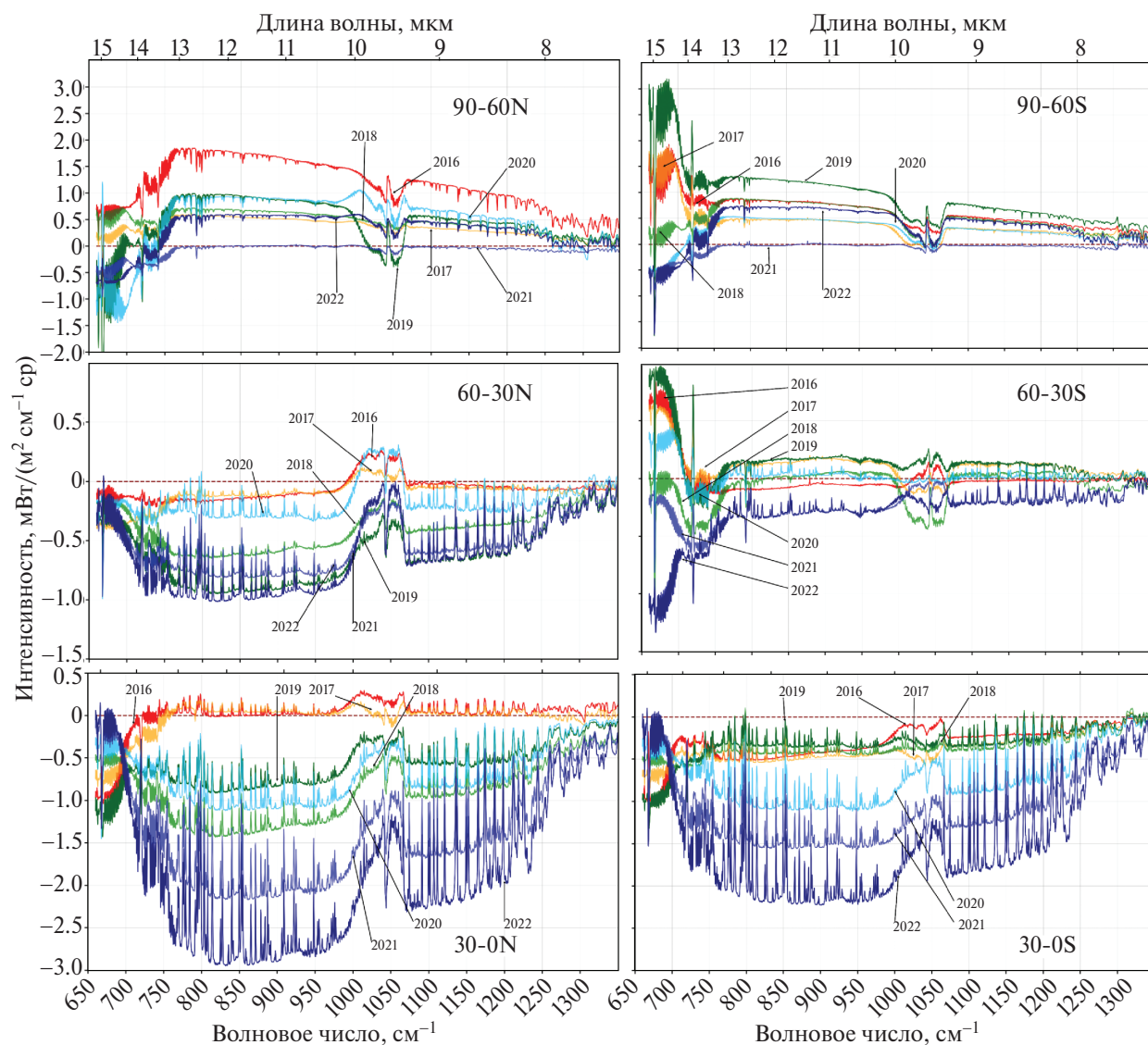


Рис. 5. Спектры разностей среднегодового СИЗ за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. в диапазоне 660–1300 см^{-1} в северном (слева) и южном (справа) полушариях для шести широтных зон (90° с.ш.–90° ю.ш. с шагом в 30°).

Подобное же уменьшения СИЗ и ЯТ в окне прозрачности было зарегистрировано при анализе измерений прибора IASI [Susskind et al., 2012].

3.2. Пространственная изменчивость среднего СИЗ

На рис. 4 приведены средние за 2015–2022 гг. спектры СИЗ для шести широтных зон (90° с.ш.–90° ю.ш. с шагом 30°) по данным измерений ИКФС-2. Рисунок демонстрирует значительные пространственные вариации среднего за 8 лет спектра СИЗ, прежде всего в окне прозрачности 8–12 $\mu\text{м}$. Вариации достигают 50% и более. Значительные вариации СИЗ в окне прозрачности обусловлены широтными изменениями температуры поверхности и нижней тропосферы, а также состоянием облачности в тропосфере. С другой

стороны, широтные изменения относительно малы в полосе поглощения CO_2 15 $\mu\text{м}$ в интервале 660–720 см^{-1} . Это обусловлено не только относительной температурной стабильностью стратосферы, но и как отмечалось выше, отсутствием влияния тропосферных облаков.

На рис. 5 представлены спектры разности среднего СИЗ для шести широтных зон за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. на основе измерений ИКФС-2 для северного и южного полушарий. Приведенные данные демонстрируют сильно различающееся межгодовое изменение СИЗ по пространству. Это частично обусловлено широтными вариациями самих средних спектров СИЗ.

В полярном регионе обоих полушарий (60°–90°) разности СИЗ относительно 2015 г. преиму-

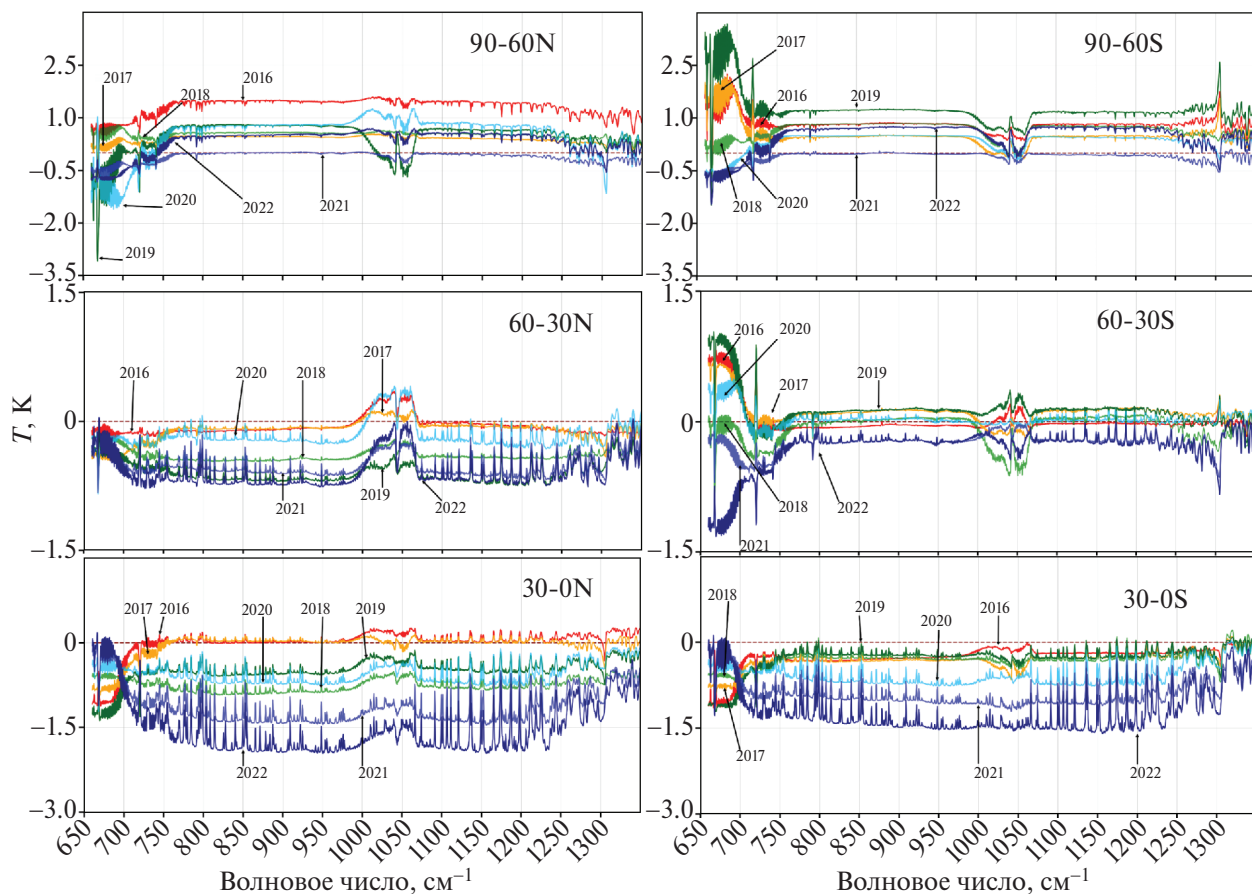


Рис. 6. Спектры разностей средних ЯТ за 2016–2022 гг. по сравнению с 2015 г. в диапазоне 660–1300 см^{-1} в северном (слева) и южном (справа) полушариях Земли для шести широтных зон (90° с.ш.– 90° ю.ш. с шагом в 30°).

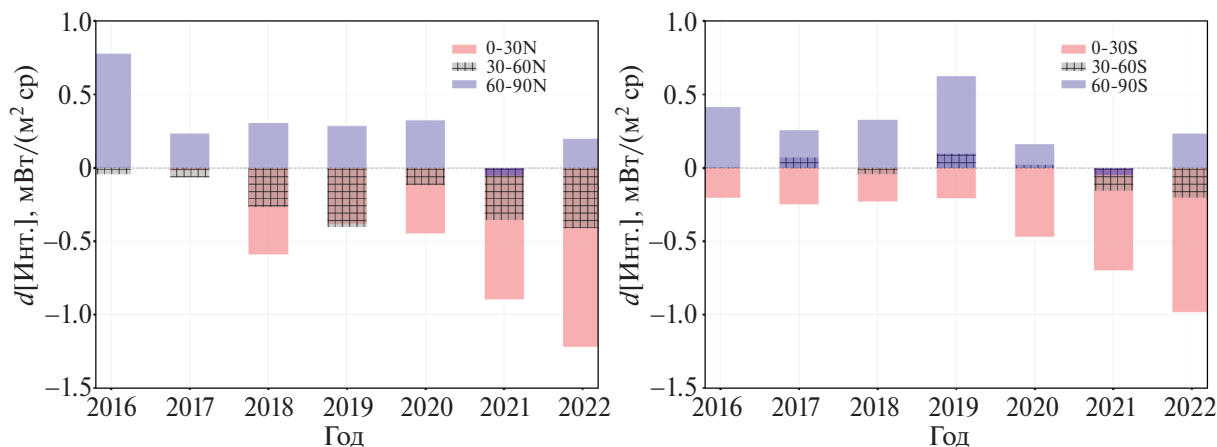


Рис. 7. Временные изменения среднегодовых интегральных СИЗ в спектральной области 660–1300 см^{-1} за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. в северном (а) и южном (б) полушариях по данным ИКФС-2.

щественно положительны во все годы на всем выделенном спектральном диапазоне. В северном полушарии в полярной области в 2016 г. наблюдаются максимальные разности с последующим уменьшением. СИЗ в 2021 г. примерно равно СИЗ в 2015 г. В южном полушарии в полярной области максимальное среднегодовое излучение наблюдается в 2019 г., а излучение в 2021 г. также

близко к излучению в 2015 г. По анализу изменения межгодовых спектров СИЗ в полярных областях обоих полушарий трудно судить о значимом уменьшении СИЗ с 2015 по 2022 гг.

В средних широтах северного полушария (30° – 60° с.ш.) почти во все годы наблюдаются отрицательные разности. Это означает, что СИЗ в период 2016–2022 гг. меньше, чем в 2015 г. При-

чем с годами излучение уменьшается. В южном полушарии (30° – 60° ю.ш.) не наблюдается выраженного постепенного уменьшения СИЗ с 2015 до 2022 гг. Так, излучение в 2021 г. выше, чем в 2016. Кроме того, в средних широтах южного полушария межгодовое изменение спектров СИЗ наименьшее, спектры ближе всего к значениям 2015 г.

В тропиках обоих полушарий (0° – 30°) наблюдаются наибольшие вариации СИЗ (до ~ 3 мВт м $^{-2}$ см $^{-1}$ ср). Разности преимущественно отрицательные, что говорит о меньших значениях СИЗ в период с 2016 по 2022 гг. по сравнению с 2015 г. В этих областях наблюдается выраженное постепенное уменьшение СИЗ с 2019 до 2022 гг.

Приведем спектры разностей разностей средних ЯТ за 2016–2022 гг. относительно 2015 г. для шести широтных зон (рис. 6).

Из графиков видно, что в северном полушарии изменений ЯТ заметно больше, чем в южном полушарии. Особенно большие различия между полушариями наблюдаются в тропиках и средних широтах.

В северном и южном полушариях в полярных широтах (60° – 90°) значения ЯТ в период 2016–2022 гг. не имеют выраженной тенденции к уменьшению или увеличению. Однако, они выше, чем в 2015 г. (кроме 2021 г.). Максимум яркостных температур наблюдается в 2016 г. За все годы измерений ИКФС-2 в среднем уменьшение значений ЯТ достигает ~ 1.5 К. В 2021 г. значения ЯТ примерно совпадают со значениями в 2015 г. В полярной области южного полушария наблюдаются большие вариации значений ЯТ в полосе поглощения CO_2 15 мкм (~ 660 – 720 см $^{-1}$). Объяснение такого поведения значений ЯТ требует привлечение дополнительных данных и анализа.

В средних широтах (30° – 60°) изменения значений ЯТ с годами существенно меньше в обоих полушариях по сравнению с полярными районами. Особенно изменения малы в южном полушарии. Яркостные температуры почти во все года периода 2015–2022 гг. ниже, чем в 2015 г. При этом с годами значения ЯТ в средних широтах преимущественно уменьшается. Например, для ЯТ на длинах волн 900 см $^{-1}$ падение составляет ~ 0.75 К. Изменения ЯТ заметно больше в северном полушарии по сравнению с южным.

Ситуация в тропиках северного полушария (0 – 30° с.ш.) близка к средним широтам. Наблюдается более выраженное уменьшение значений ЯТ

с 2015 до 2022 гг., которое достигает ~ 1.5 – 2.0 К. В тропиках южного полушария (30 – 0° ю.ш.) наблюдается такая же ситуация, как и в северном – выраженное уменьшение яркостной температуры с 2015 по 2022 гг. Однако, величины разностей яркостных температур меньше, чем в тропиках северного полушария и составляют ~ 1.5 К.

В целом, в обоих полушариях в средних и низких широтах наблюдается уменьшение средней ЯТ с 2015 по 2022 гг. В северных широтах среднегодовые значения ЯТ не имеют монотонного изменения. При этом в южном полушарии уменьшение яркостной температуры в абсолютных величинах меньше, чем в северном примерно на ~ 0.5 К.

Для иллюстрации среднего временного хода СИЗ на рис. 7 приведены значения интегрального излучения для шести широтных зон (в спектральной области 660 – 1300 см $^{-1}$). В северном полушарии (рис. 7а) в тропиках наблюдается почти монотонное уменьшение СИЗ с 2016 до 2022 гг. (за исключением 2019–2020 гг.). В средних широтах и полярной зоне северного полушария уменьшение интегрального СИЗ менее выражено.

В южном полушарии (рис. 7б) наблюдается схожая ситуация, но при меньших амплитудах разностей СИЗ относительно 2015 г. В тропиках присутствует почти постоянное уменьшение СИЗ с 2016 по 2022 гг. В средних широтах и полярной областях СИЗ уменьшается не так выражено. В средних широтах интегральные значения СИЗ близки к излучению в 2015 г., тогда как в полярных максимум излучения наблюдается в 2019 г.

В тропиках и средних широтах наблюдается в среднем уменьшение СИЗ. В полярных широтах изменение СИЗ не выражено. В табл. 1 приведены значения абсолютного и относительного уменьшения интегральных значений СИЗ диапазона 660 – 1300 см $^{-1}$ за период 2015–2022 гг. Относительные значения приводятся в % к среднему интегральному СИЗ для конкретной широтной зоны. Из таблицы видно, что наибольшее уменьшение наблюдается в районах тропиков (1 – 1.4 мВт м $^{-2}$ см $^{-1}$ ср).

Таблица 1. Абсолютные и относительные уменьшения интегральных значений СИЗ в диапазоне 660 – 1300 см $^{-1}$ за 2015–2022 гг. для шести широтных зон Земли по данным измерений ИКФС-2

Полушарие\Зона	90–60°	60–30°	30–0°
Северное мВт м $^{-2}$ см $^{-1}$ ср (%)	0.5 (1.3)	0.2 (0.9)	1.4 (3.2)
Южное мВт м $^{-2}$ см $^{-1}$ ср (%)	0.06 (0.3)	0.2 (0.7)	1.0 (2.3)

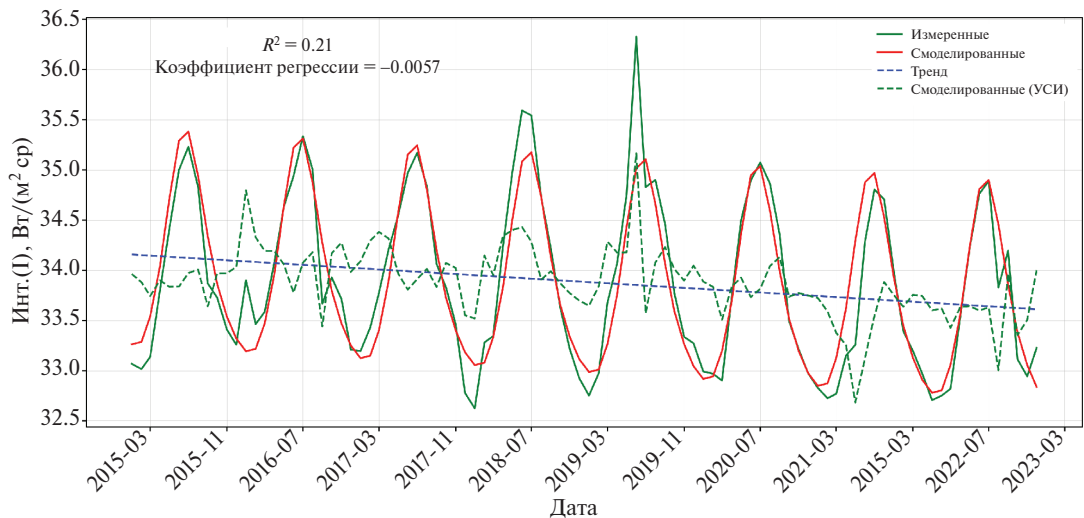


Рис. 8. Временные ряды глобального среднемесячного интегрального СИЗ на основе данных ИКФС-2 и модели МЛР за 2015–2022 гг.

3.4. Оценки трендов средних значений СИЗ

На рис. 8 приводятся временные ряды средне-
месячного интегрального глобального СИЗ в спек-
тральной области 660–1300 см⁻¹ по данным измере-
ний ИКФС-2 (зеленая кривая) и модели МЛР (крас-
ная кривая). В том числе на рис. 8 нанесена кривая
СИЗ с уменьшенным сезонным ходом (зеленая
пунктирная кривая) благодаря вычитанию членов
МЛР с гармоническими функциями из измеренных
значений СИЗ. Для данной кривой построен ли-
нейный тренд (синяя пунктирная прямая).

Регрессионная модель хорошо описывает се-
зонное изменение интегральных среднемесячных
значений СИЗ. Систематическая погрешность
модели составляет ~0% со стандартным откло-
нением 0.9%. Коэффициент корреляции между
измеренной и рассчитанным интегральным гло-
бальным СИЗ составляет 0.93. Максимумы ин-
тегральных значений СИЗ приходятся на период
с весны до осени, а минимум в период с осени до

весны. Полная амплитуда сезонных вариаций со-
ставляет ~2 Вт/м².

Коэффициент детерминации (R^2) линейного
тренда интегральных значений СИЗ с уменьшен-
ным влиянием сезонного изменения составляет
0.21, а коэффициент регрессии (slope) – $0.0057 \pm$
 ± 0.0011 Вт м⁻² ср⁻¹. За весь период измерений
ИКФС-2 (96 месяцев, с 2015–2022 гг.) инте-
гральные значения СИЗ уменьшились на $0.55 \pm$
 ± 0.11 Вт м⁻² ср. Отметим, что несмотря на низкое
значение R^2 (0.21) погрешность тренда относи-
тельно небольшая и составляет ~20%. Это может
быть связано с тем, что тренд и его погрешность
оцениваются для ряда среднемесячных значений,
осредненных глобально, т.е. на основе десятков
миллионов реализаций измерений ИКФС-2 в год.

Результаты оценок трендов интегральных зна-
чений СИЗ в шести широтных зонах двух полу-
шарий Земли по данным измерений ИКФС-2
приведены в табл. 2. Оценки трендов по измере-

Таблица 2. Характеристики изменения интегральных значений СИЗ в спектральной области 660–1300 см⁻¹ за период 2015–2022 гг. на глобальном масштабе и для шести широтных зон по данным спутниковых измерений ИКФС-2 и моде-
ли МЛР.

Широтная зона	R^2	Коэффициент регрессии $\pm$ погрешность, Вт м ⁻² ср	Изменение СИЗ за период 2015–2022 гг. $\pm$ погрешность, Вт м ⁻² ср
90°–60° с.ш.	0.02	-0.0025 ± 0.0018	-0.24 ± 0.17
60°–30° с.ш.	0.22	-0.0047 ± 0.0009	-0.45 ± 0.09
30°–0° с.ш.	0.57	-0.0140 ± 0.0012	-1.34 ± 0.12
0°–30° ю.ш.	0.46	-0.0099 ± 0.0011	-0.95 ± 0.11
30°–60° ю.ш.	0.09	-0.0022 ± 0.0007	-0.21 ± 0.07
60°–90° ю.ш.	0.002	-0.0006 ± 0.0015	-0.06 ± 0.14
Глобальный	0.21	-0.0057 ± 0.0011	-0.55 ± 0.11

ниям приведены также в работах [Whitburn et al., 2021; Raghuraman et al., 2021; Forster et al., 2021]. Оценки трендов, полученные в данном исследовании, качественно согласуются с данными из указанных работ. Количественные различия связаны с разными периодами исследований.

Анализ трендов для шести широтных зон показал, что в полярных и средних широтах северного и южного полушария тренды интегральных значений СИЗ малы (менее $0.005 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$) при низкой достоверности (R^2 не более 0.22). Можно сделать вывод, что в этих зонах интегральное СИЗ за 2015–2022 гг. (8 лет) почти не изменилось. Однако в экваториальных широтах обоих полушарий Земли тренды СИЗ относительно высоки (более $0.01 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$) при коэффициентах детерминации 0.46 и 0.57 для южного и северного полушария, соответственно. Для экваториальной зоны за период 2015–2022 гг. средние интегральные значения СИЗ уменьшились на $1.3 \pm 0.1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$ в северном и на $0.95 \pm 0.1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$ в южном полушариях.

Кроме того, проведено исследование влияния особенностей атмосферной циркуляции — квазидвухлетнее колебание (КДК) и Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК) на временные вариации СИЗ. В модель МЛР (2) были добавлены параметры, характеризующие указанные явления, полученные с данных сайтов <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> (КДК) и <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/southern-oscillation-indices-signal-noise-and-tahitidarwin-slp-soi> (ЭНЮК) в виде среднемесячных. Согласно исследованию, влияние временного изменения данных параметров, характеризующих крупномасштабные особенности состояния атмосферы, не привели к существенному улучшению или ухудшению аппроксимации СИЗ с помощью модели МЛР (изображения не приводятся). Возможно, это связано с малостью временного периода. Наибольшее, но все равно незначительное, влияние наблюдается для зоны тропиков (увеличение КК с 0.57 до 0.6). Это может быть связано с тем, что явления КДК и ЭНЮК происходят в области тропиков.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе проанализированы изменения собственного излучения Земли в период 2015–2022 гг. по данным измерений высокого спектрального разрешения с помощью российского спутникового

прибора ИКФС-2. Для этого были рассчитаны средние спектры собственного излучения Земли (СИЗ) в спектральной области $600\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$ для всей поверхности Земли и шести широтных зон (от -90° до 90° с шагом 30°). Проведенный анализ показал:

1. Глобальные значения СИЗ в спектральной области $660\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$ в среднем уменьшаются за период 2015–2022 гг. Общие вариации СИЗ за весь исследуемый период максимальны в окне прозрачности $800\text{--}950 \text{ см}^{-1}$ и достигают $\sim 1.5 \text{ Вт м}^{-2} \text{ см}^{-1} \text{ ср}$. В полосах поглощения CO_2 15 мкм и озона 9.6 мкм вариации СИЗ заметно меньше. Это связано с формированием излучения на этих длинах волн в стратосфере (особенно в области центра полосы поглощения 15 мкм) и малости влияния тропосферных облаков.

2. Глобальное среднегодовое интегральное СИЗ уменьшалось в течение 2015–2021 гг. на $\sim 0.5 \text{ Вт м}^{-2}$, что может быть одной из причин наблюдающегося положительного радиационного баланса Земли.

3. Анализ глобальной средней яркостной температуры (ЯТ) указывает на ее постепенное уменьшение в период 2017–2021 гг., однако в 2022 г. наблюдается рост по сравнению с оценками за 2021 г. Уменьшение средней ЯТ за весь период измерений достигает $\sim 1 \text{ К}$ в окне прозрачности ($850\text{--}950 \text{ см}^{-1}$). Значительно меньшее изменение ЯТ ($0.2\text{--}0.5 \text{ К}$) наблюдается в центральной части полосы поглощения CO_2 15 мкм ($\sim 650\text{--}700 \text{ см}^{-1}$), что обусловлено формированием СИЗ в центре полосы CO_2 в стратосфере.

4. Выявлены заметные различия в поведении СИЗ за рассмотренный период в зависимости от широтной зоны. В полярных широтах обоих полушарий изменения СИЗ за период 2015–2022 гг. немонотонные. По анализу изменения спектров СИЗ в полярных областях обоих полушарий за весь период трудно судить о значимом уменьшении СИЗ с 2015 по 2022 гг.

В средних широтах северного полушария СИЗ уменьшается в период 2015–2022 гг. В южном полушарии не наблюдается выраженного уменьшения СИЗ с 2015 до 2022 гг. Также в средних широтах южного полушария изменение спектров СИЗ за весь период наименьшее.

В тропиках обоих полушарий наблюдаются наибольшие абсолютные вариации СИЗ (до $\sim 3 \text{ мВт м}^{-2} \text{ см}^{-1} \text{ ср}$). Разности преимущественно отрицательные, что говорит о меньших значе-

ниях СИЗ в период с 2016 по 2022 гг. по сравнению с 2015 г. В этих областях наблюдается выраженное постепенное уменьшение СИЗ с 2019 по 2022 гг., причем в южном полушарии они заметно меньше, чем в северном ($\sim 0.5 \text{ Вт м}^{-2} \text{ см}^{-1} \text{ ср}$).

5. Тренды среднемесячного интегрального СИЗ в спектральной области $660\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$ в полярных и средних широтах обоих полушарий малы и составляют менее $0.005 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$ при низкой достоверности (R^2 не более 0.22). Вероятно, в полярных областях СИЗ за 8 лет почти не изменилось. Однако в экваториальных широтах обоих полушарий Земли тренды СИЗ относительно высоки (более $0.01 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$) при коэффициентах детерминации 0.46 и 0.57 для южного и северного полушария, соответственно. За период 2015–2022 гг. в этой области планеты СИЗ уменьшилось на $1.3 \pm 0.1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$ в северном и на $0.95 \pm 0.1 \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}$ в южном полушарии.

6. Согласно оценкам с помощью модели множественной линейной регрессии, влияние таких особенностей атмосферной циркуляции, как квазидвухлетнее колебание (КДК) и Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), на изменение СИЗ за 2015–2022 гг. оказалось незначительным.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Основные работы по анализу временных вариаций спектров собственного излучения Земли выполнены при поддержке СПбГУ, шифр проекта 116234986.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агентьева Е. М., Александров Е. И., Алексеев Г. В., Анисимов О. А., Балонишников Ж. А., Булыгина О. Н., Георгиевский В. Ю., Докукин М. Д., Ефимов С. В., Иванов Н. Е., Калов Х. М., Катцов В. М., Киселев А. А., Клепиков А. В., Ключева М. В., Кобышева Н. В., Оганесян В. В., Павлова В. Н., Павлова Т. В., Постнов А. А., Стадник В. В., Солдатенко С. А., Хлебникова Е. И., Шалыгин А. Л., Школьник И. М. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
- Будыко М. И. Изменение климата. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 38 с.
- Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Никулин А. Г., Козлов Д. А., Монахов Д. О., Козлов И. А., Архипов С. А., Целиков В. А., Романовский А. С. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
- 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 // Труды Всероссийской конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М., ИКИ РАН. 10–14 ноября 2008 г. Сб. научных статей, изд. “Азбука-2000”, 2009. Т. 1. № 6. С. 259–266.
- Катцов В. М., Семенов С. М. (научные руководители работ по подготовке доклада). Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Ижевск: Типография ИП Пермякова С. А., 2014. 1009 с.
- Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Козлов Д. А., Завелевич Ф. С., Головин Ю. М., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Сопоставление спектров уходящего теплового ИК излучения разных лет // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 65–72.
- 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-зондирования ИКФС-2 // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 11. С. 5–18.
- 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. Т. 12. С. 33–44.
- Anderson J. G., Dykema, R. M. Goody, H. Hu, D. B. Kirk-Davidoff. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2004. V. 85. P. 367–383.
- Bernet L., von Clarmann T., Godin-Beekmann S., Ancellet G., Maillard Barras E., Stübi R., Steinbrecht W., Kämpfer N., Hocke K. Ground-based ozone profiles over central Europe: Incorporating anomalous observations into the analysis of stratospheric ozone trends // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 4289–4309.
- Brindley H. E., Bantges R. J. The Spectral Signature of Recent Climate Change // Curr Clim Change Rep. 2016. V. 2. P. 112–126.
- Brindley H., Bantges R., Russell J., Murray J., Dancel C., Belotti C., Harries J. Spectral signatures of earth’s climate variability over 5 years from IASI // J. Clim. 2015. V. 28. P. 1649–1660.
- Brindley H. E., Harries J. E. Observations of the infrared outgoing spectrum of the Earth from space: The effects of temporal and spatial sampling // J. Climate. 2003. V. 16 (22). P. 3820–3833.
- Ceppiand P., Nowack P. Observational evidence that cloud feedback amplifies global warming // Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. 2021. 118 (30).
- Dewitte S. and Clerbaux N. Decadal Changes of Earth’s Outgoing Longwave Radiation // Remote Sensing. 2018. V. 10 (10). P. 1–7.
- Dewitte, S., Clerbaux, N. Measurement of the Earth Radiation Budget at the top of atmosphere – A review // Remote Sens. 2017. V. 9(11), P. 1–13.
- Dübal, H.-R., Vahrenholt, F. Radiative Energy Flux Variation from 2001–2020 // Atmosphere. 2021. V. 12 (10). P. 1–19.
- Forster P., Storelmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.-L., Frame D., Lunt D. J., Mauritsen T., Palmer M. D., Watanabe M., Wild M., Zhang H. The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge

- University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. P. 923–1054.
- Harries J. E., Brindley H. E., Sagoo P. J., Bantges R. J. Increases in greenhouse forcing from the Earth's outgoing longwave spectra in 1970 and 1997 // *Nature*. 2001. V. 410. P. 355–357.
- Lee H., J. Romero (eds.). IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. P. 36 (in press).
- Loeb N. G., Johnson G. C., Thorsen T. J., Lyman J. M., Rose F. G., Kato S. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. P. 1–8.
- Loeb N. G., Manalo-Smith N., Su W., Thomas M. S., Thomas Su. CERES Top-of-Atmosphere Earth Radiation Budget Climate Data Record: Accounting for in-Orbit Changes in Instrument Calibration // *Remote Sens*. 2016. V. 8. P. 1–14.
- Phulpin T., Blumstein D., Prel F., Tournier B., Prunet P., Schlüssel P. Applications of IASI on MetOp-A: first results and illustration of potential use for meteorology, climate monitoring and atmospheric chemistry. *Proceedings of The International Society for Optical Engineering*, San Diego, California, United States. September 2007. P. 1–12.
- Raghuraman S. P., Paynter D., Ramaswamy V. Anthropogenic forcing and response yield observed positive trend in Earth's energy imbalance // *Nat Commun*, 2021. V. 12. P. 1–10.
- Shunlin L., Dongdong W., Tao H., Yueyun Y. Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review // *International Journal of Digital Earth*. 2019. № 7. P. 737–780.
- Susskind J., Molnar G., Iredell L., Loeb N. G. Interannual variability of outgoing longwave radiation as observed by AIRS and CERES // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. 1–18.
- Timofeyev Yu. M., Uspensky A. B., Zavelevich F. S., Polyakov A. V., Virolainen Y. A., Rublev A. N., Kukharsky A. V., Kiseleva J. V., Kozlov D. A., Kozlov I. A., Nikulin A. G., Pyatkin V. P., Rusin E. V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on "Meteor-M" No. 2 – Four years in orbit // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. V. 238. P. 1–19.
- Wang L., Chen Y. Inter-comparing S-NPP and NOAA-20 CrIS toward measurement consistency and climate data records // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens*. 2019. V. 12. P. 2024–2031.
- Wang T., Zhou L., Tan C., Divakarla M., Pryor K., Warner J., Wei Z., Goldberg M., Nalli N. R. Validation of Near-Real-Time NOAA-20 CrIS Outgoing Longwave Radiation with Multi-Satellite Datasets on Broad Timescales // *Remote Sens*. 2021. V. 13 (19). P. 1–14.
- Whitburn S., Clarisse L., Bouillon M., Safieddine S., George M., Dewitte S., De Longueville H., Coheur P.-F., Clerbaux C. Trends in spectrally resolved outgoing longwave radiation from 10 years of satellite measurements // *Climate and Atmospheric Science*. 2021. V. 4. P. 1–8.
- Whitburn S., Clarisse L., Crapeau M., August T., Hultberg T., Coheur P. F., Clerbaux C. A CO₂-independent cloud mask from Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) radiances for climate applications // *Atmos. Meas. Tech*. 2022. V. 15. P. 6653–6668.
- Wielicki B., Barkstrom B. R., Harrison E. F., Lee R. B., III, Smith G. L., Cooper J. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. P. 853–868.
- Zhang K., Goldberg M. D., Sun F., Zhou L., Wolf W. W., Tan C., Liu Q. Estimation of near-real-time outgoing longwave radiation from Cross-Track Infrared Sounder (CrIS) radiance measurements // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2017. V. 34. P. 643–655.

SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF OUTGOING THERMAL RADIATION OF THE EARTH BY SPACE-BASED IR SPECTROMETER IKFS-2

Yu. M. Timofeyev¹, G. M. Nerobellov^{1,2,3,*}, D. A. Kozlov⁴, I. S. Cherkashin⁴, P. M. Nerobellov^{1,5},
A. N. Rublev⁶, A. B. Uspenskii⁶, Yu. V. Kiseleva⁶

¹St. Petersburg University, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034 Russia

²SPC RAS – Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, Korpusnaya str., 18, St. Petersburg, 187110 Russia

³Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskiy prosp., 98, St. Petersburg, 195196 Russia

⁴JSC "Keldysh Research Center", Onejskaya str., 8, Moscow, 125438 Russia

⁵Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Politechnicheskaya str., 29, St. Petersburg, 195251 Russia

⁶FSBI SRC «Planeta» (European branch), Bolshoi Oredtechenskii per., 7, Moscow, 123242 Russia

*e-mail: akulishe95@mail.ru

Current Earth climate changes are caused by the violation of the planet's radiation balance (RB). In this study the changes of the one of RB's components – yearly and monthly averaged global and regional outgoing thermal radiation of Earth or the Earth own radiation (EOR) in a spectral range 660–1300 cm⁻¹ for 2015–2022 by IR Fourier-spectrometer IKFS-2 onboard the "Meteor-M" No2 satellite – is analyzed. It is shown that EOR on a global scale in a range 660–1300 cm⁻¹ on average decreased during the period of 2015–2022. Mean integral radiation in the same wave-length range decreased by ~0.5 W m⁻² during 2015–2022. The most pronounced decrease of EOR was found in tropics, when the least pronounced – on polar latitudes. Besides, a negative trend of the integral EOR was found in tropics (up to 0.95–1.3 ± 0.1 W m⁻² for the 8 years) with relatively high coefficient of determination (0.46–0.57). At the same time, there is no pronounced trend of EOR on the polar and middle latitudes.

Keywords: Radiation balance, Earth's climate change, IKFS-2, Earth's thermal radiation