

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОРРЕЛЯЦИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ ТИКСИ

© 2022 г. Н. В. Родионова*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Фрязино, Московская обл., Россия*

**E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2022 г.

В работе определена корреляция AIRS/AQUA спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы с наземными измерениями на стационаре ГГО им. А.И. Воейкова в Тикси в 2011–2020 гг. Корреляция спутниковых измерений с наземными меняется в зависимости от сезона. Весной и летом корреляция превышает осеннюю и значительно зимнюю. Для зимнего периода (декабрь, январь, февраль) снижение корреляции связано с возможными инверсиями температуры воздуха (Юрганов и др., 2016; Анисимов, Кокорев, 2015). При температурном контрасте (ТК) меньше 10°C (разница температуры воздуха на поверхности и на уровне 600 гПа (4 км)) преимущественно использовать спутниковые данные, усредненные на уровнях 400–500 гПа. Это дает увеличение коэффициента корреляции Спирмена (ККС) между наземными и спутниковыми измерениями с 0.44 (1000 гПа) до 0.63 (400–500 гПа). Однако, полученное регрессионное соотношение с коэффициентом детерминации 0.44 делает проблематичным использование его для прогноза наземных данных по спутниковым измерениям.

Ключевые слова: наземные измерения, спутниковые измерения, концентрация метана в атмосфере, коэффициент корреляции Спирмена

DOI: 10.31857/S0205961422040054

ВВЕДЕНИЕ

Метан (CH₄) – один из парниковых газов. По сравнению с другими парниковыми газами метана в атмосфере содержится меньше, но по степени парниковой активности он более, чем в 20 раз превосходит данный показатель для углекислого газа (IPCC, 1995). Источники метана естественные (болота и влажная почва, пресноводные водоемы, дикие животные, природные пожары, термиты, геологические источники, метангидраты, таяние вечной мерзлоты) и антропогенные (сельское хозяйство, ископаемое топливо, сжигание биомассы). Наряду с атмосферой метан содержится в земле в виде природного газа. Еще одним источником метана на земле являются газогидраты, которые могут существовать в условиях либо высокого давления (в океане), либо очень холодного климата (на суше в регионах с вечной мерзлотой). Газогидраты на суше могут разрушаться с выделением CH₄ при потеплении климата, в океане при уменьшении его уровня (Елисеев, 2018). В Арктической зоне температура воздуха растет в полтора-два раза быстрее, чем в среднем по Земле, что стимулирует активность многих естественных источников метана, оказы-

вает воздействие на вечную мерзлоту, высвобождая в огромных количествах метан и другие малые газовые компоненты (Стародубцев, 2018).

Важнейшим стоком метана в атмосфере, составляющим почти 90% от полной интенсивности стока, является его разрушение при реакции с гидроксил-радикалом OH с образованием углекислого газа и паров воды (Cicerone, Oremland, 1988). В зимние месяцы, когда процессы стока метана прекращаются, метан начинает накапливаться в атмосфере, а летом включаются процессы стока метана (Белан, Креков, 2012).

Наземные измерения метана вблизи поверхности немногочисленны. В Арктике регулярные измерения метана в России проводятся в двух пунктах: Тикси и Териберке. Данные этих наблюдений собраны и систематизированы исследовательской группой NOAA, результаты представлены на интернет портале <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>. В качестве спутниковых измерений в работе использовались данные дистанционного зондирования американского спутника AQUA с помощью спектрометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder).

Цель работы - определить корреляцию наземных измерений значений концентрации метана в



Рис. 1. Спутниковое изображение района расположения поселка Тикси.

приземном слое атмосферы на стационаре Тикси, расположенном в арктической зоне, и спутниковых измерений инфракрасным спектрометром AIRS, установленном на спутнике EOS AQUA.

НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Станция фонового мониторинга “Тикси” находится на побережье моря Лаптевых, координаты станции 71.586166° N, 128.91882° E (рис. 1, красная звездочка). На станции Тикси работы по наблюдению за метаном ведутся с 2011 г. Пробы CH_4 на станции отбираются круглогодично раз в неделю вакуумированными флягами. Для измере-

ния концентраций газовых компонент на ст. Тикси используется газоанализатор Picarro G2301.

Данные по наземным измерениям концентрации метана в приземном слое атмосферы для стационара в Тикси находятся в свободном доступе на сайте WDCGG (World Data Centre Greenhouse Gases) <https://gaw.kishou.go.jp/>. В настоящей работе использованы измерения концентрации метана в приземном слое атмосферы, полученные на стационаре Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) в Тикси (Ivakhov, Paramonova, 2021).

На рис. 2, а показаны графики вариаций среднемесячной концентрации метана по наземным измерениям на стационаре ГГО Тикси для 2011–2020 гг. Отмечаем минимум концентрации метана в июле (кроме 2020 г.) и максимум в сентябре–октябре. На рис. 2, б приведен график межгодовых вариаций концентрации CH_4 по наземным измерениям на стационаре Тикси со стабильным ростом значений и линией тренда с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.97$. К сожалению, данных для 2016 г. было недостаточно (есть данные только для первых трех месяцев), а для 2017 г. отсутствовали данные за январь, февраль. В результате измерения за эти годы не вошли в график межгодовых вариаций.

В зимнее время происходит накопление метана в атмосфере, в летнее – сток, т.е. есть обратная корреляция с температурой воздуха. На рис. 3 приведен график вариаций концентрации метана по регулярным (раз в неделю) наземным измерениям на стационаре Тикси для 2013 г. и график значений температуры воздуха по архивным данным для аэропорта Тикси (сайт gr5.ru) на момент взятия проб метана. Очевидна отрицательная корреляция этих данных. В табл. 1 приведены значения ККС между температурой воздуха и на-

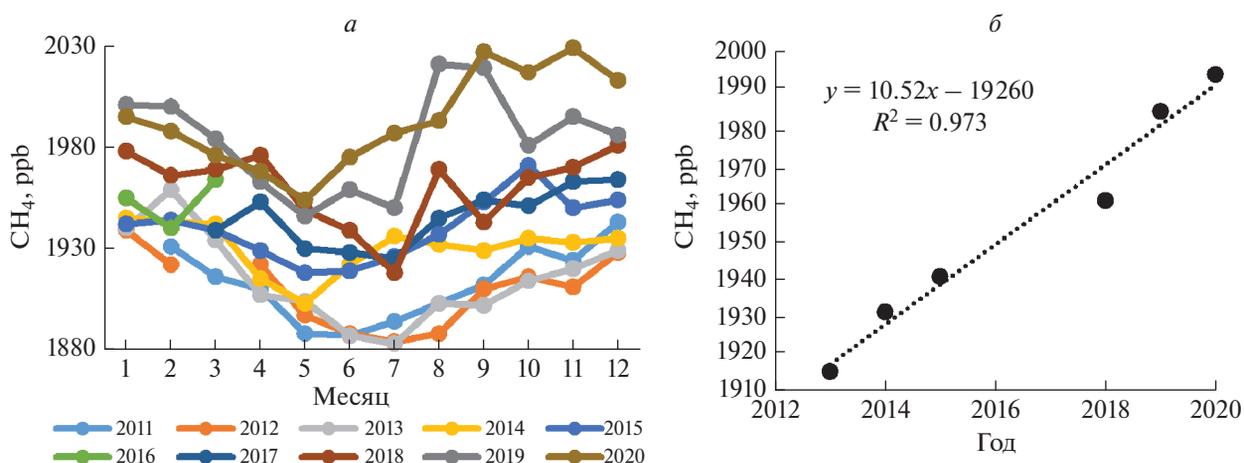


Рис. 2. Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана в приземном слое атмосферы по наземным измерениям на станции фонового мониторинга ГГО Тикси.

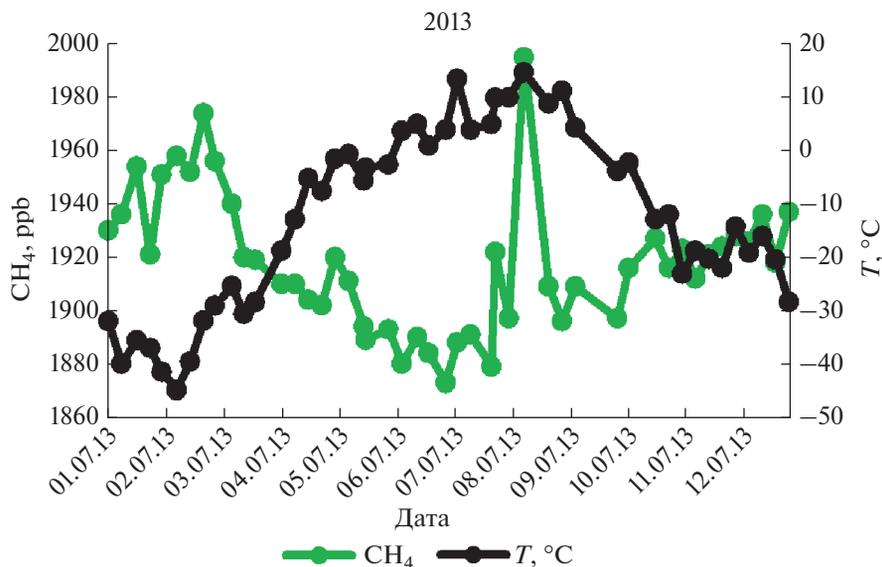


Рис. 3. Графики вариаций концентрации метана по регулярным наземным измерениям на стационаре в Тикси для 2013 г. и значений температуры воздуха.

земными измерениями концентрации метана в приземном слое атмосферы на стационаре в Тикси для периода 2011–2018 гг., где ρ_s — коэффициент корреляции Спирмена, p — значение, N — число измерений.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА

С 2002 г. начались измерения спектров инфракрасной (тепловой) радиации, излучаемой земной поверхностью, на американском спутнике AQUA с помощью спектрометра AIRS. Содержание метана в тропосфере оценивается по ослаблению излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения этого газа. Данные о содержании метана в атмосфере находятся в свободном доступе в системе анализа и визуализации данных Giovanni, доступные по ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

На рис. 4 приведены графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций концентрации метана в приземной атмосфере в районе Тикси, по среднемесячным данным AIRS, усреднение по территории $71^{\circ}.5833$ – $71^{\circ}.6382$ N, $128^{\circ}.86$ – $128^{\circ}.9355$ E, (продукт AIRS3STM v.7.0), барическая высота 1000 гПа, пространственное разрешение $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, на период 2011–2018 гг. Приведены также (рис. 4, б) стандартные отклонения от средних значений по ежедневным данным AIRS. Отметим, что рост значений CH_4 в осеннее время сопровождается ростом стандартного отклонения, особенно заметного для 2021 г. Существенным отличием сезонного хода концентраций метана по наземным измерениям (рис. 2, а) от спутниковых (рис. 4, а)

является значительное уменьшение значений концентрации метана в зимний сезон по спутниковым данным. О возможной причине будет сказано ниже.

На рис. 5 показаны среднемесячные карты распределения метана для области 71° – 72° N, 128° – 131° E, включающей Тикси, по данным AIRS для 2021 г. (зеленой звездочкой на карте отмечено место расположения п. Тикси).

КОРРЕЛЯЦИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Определим корреляцию наземных измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы на стационаре в Тикси со спутниковыми ежедневными измерениями AIRS (продукт AIRS3STD v7.0), уровень 1000 гПа, пространственное разрешение 1° по широте и долготе. Корреляция определяется с помощью программы Attestat, находящейся в свободном доступе, и используемой как надстройка в Excel. В табл. 2 приведены значения ко-

Таблица 1. Коэффициент корреляции Спирмена между наземными измерениями концентрации метана в приземном слое атмосферы и температурой воздуха

	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
ρ_s	–0.52	–0.66	–0.69	–0.2	–0.21	–0.32	–0.26
p	$1.5e-4$	$2e-6$	0	0.07	0.06	0.02	0.04
N	44	39	47	51	51	37	46

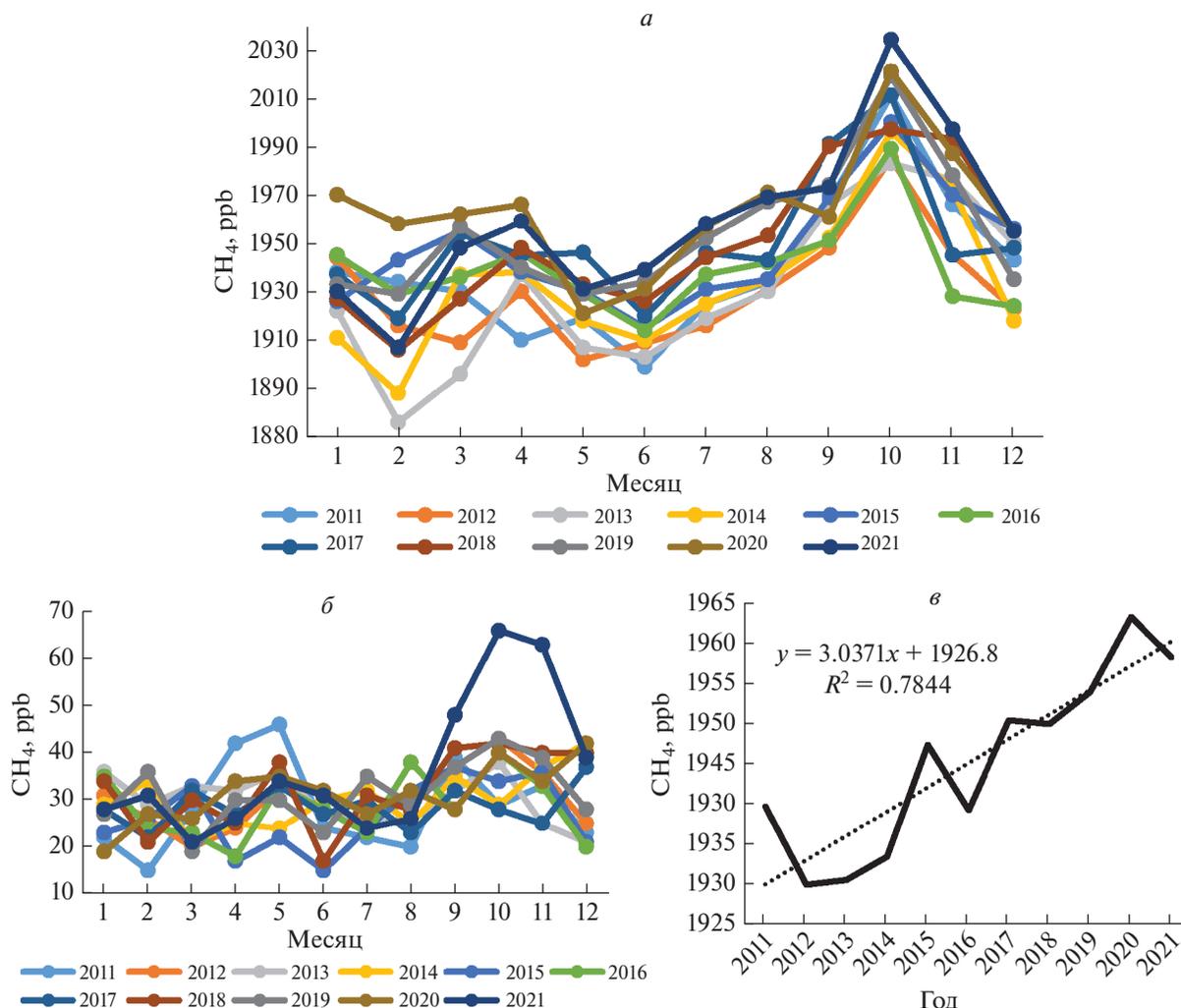


Рис. 4. Сезонные вариации (а), стандартные отклонения (б) и межгодовые (в) вариации концентрации метана в атмосфере уровня 1000 гПа в районе Тикси по данным AIRS.

эфициента корреляции Спирмена (ККС) между значениями концентрации метана по наземным и спутниковым данным. Отмечаем наличие положительной корреляции для 2011, 2012, 2015 и 2018 гг., и отсутствие корреляции для 2013, 2014, 2017 гг. Для 2014 г. (отсутствие корреляции) и 2015 года (положительная корреляция) на рис. 6 показаны графики вариаций концентрации CH₄ для наземных и спутниковых данных.

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми значениями концентрации метана в приземном слое атмосферы

	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
ρ_s	0.48	0.33	-0.19	-0.03	0.42	0.12	0.27
p	2e-3	0.03	0.13	0.43	2e-3	0.25	0.05
N	33	33	36	47	43	32	37

Приборы AIRS, использующие уходящее излучение Земли в средней ИК области около 7.8 мкм, имеют пониженную чувствительность к нижней тропосфере. Для надежного определения концентраций атмосферных газов ниже высоты 5 км необходим достаточно большой положительный температурный контраст (ТК) между температурами подстилающей поверхности и пограничного слоя с одной стороны и температурами вышележащих слоев воздуха – с другой (Юрганов и др., 2016). Можно предположить, что для ТК <10°C измеренная со спутника концентрация метана понижена (Юрганов и др., 2016). Основная причина снижения спутниковых значений концентрации метана в зимний сезон в том, что спутник не видит поверхность и значения концентрации метана определяет не у поверхности, а в более высоких слоях (Юрганов и др., 2016). Это происходит, если разность температур на поверхности

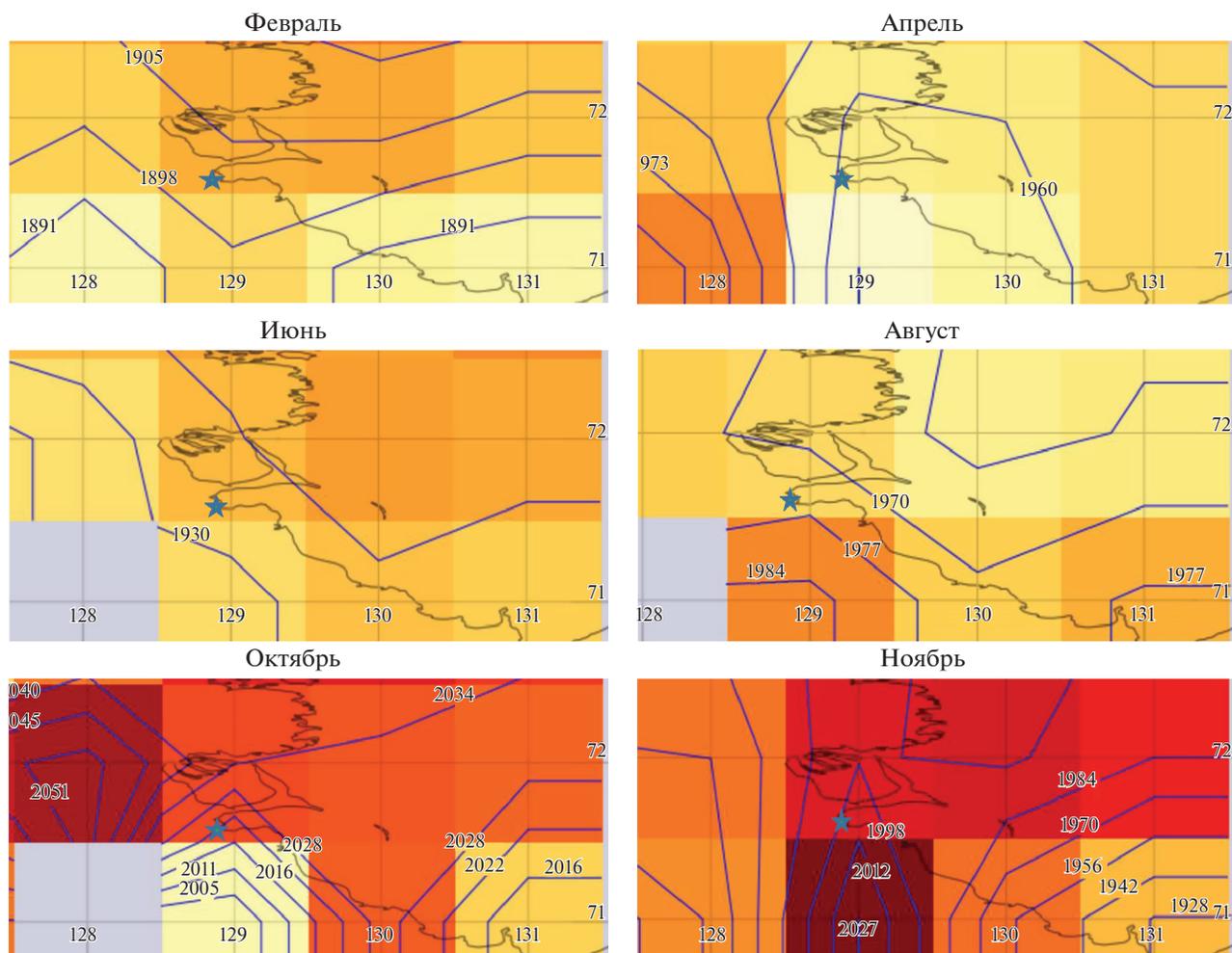


Рис. 5. Среднемесячные карты распределения метана по данным AIRS для 2021 г.

(уровень 1000 гПа) и на высоте порядка 4 км (600 гПа) меньше 10°C , т.е. температурный контраст (ТК) меньше 10°C . На рис. 7 показано значение ТК для Тикси на период 2011–2021 гг. Значения температуры для разных слоев атмосферы получены по месячным данным спутника AIRS с пространственным разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (продукт AIRS3STM v7.0). Для января, февраля значения ТК практически для всех лет меньше 10°C .

На основании того, что наибольшие отклонения значений спутника от наземных из-за температурной инверсии в атмосфере происходят в зимние месяцы, найдем корреляцию наземных и спутниковых данных (1000 гПа) для 4-х сезонов: зима – 1, 2, 12 мес.; весна – 3, 4, 5 мес.; лето – 6, 7, 8 мес.; осень – 9, 10, 11 мес. На рис. 8 приведены графики значений концентрации метана в приземном слое атмосферы (1000 гПа) по наземным и спутниковым данным по сезонам: зима, весна, лето, осень. Отметим, что для зимнего сезона спутниковые значения занижены относительно наземных. Весной и летом наземные и спутнико-

вые значения концентрации метана находятся практически на одном уровне. Для осени спутниковые значения превосходят наземные, за исключением 2019 и 2020 гг.

Как было отмечено выше, проблема с выбором барических уровней для оценки концентраций метана в приповерхностном слое атмосферы по спутниковым данным состоит в том, что спутник не ‘видит’ слои атмосферы, прилегающие к поверхности из-за наличия выше более теплых слоев. Так, в работе (Анисимов, Кокорев, 2015) авторы для анализа использовали спутниковые данные, усредненные по третьему и четвертому барическим уровням AIRS- (850–700 гПа), что соответствует примерно высоте от 1.5 до 3 км. В работе (Стародубцев, 2018) использовался барический уровень 400 гПа, выбор которого был обусловлен рекомендациями, представленными в работе (Xiong et al., 2008), где уровень 400–500 гПа (~6–5 км) предлагался как наиболее эффективный для оценки концентрации метана в арктической зоне.

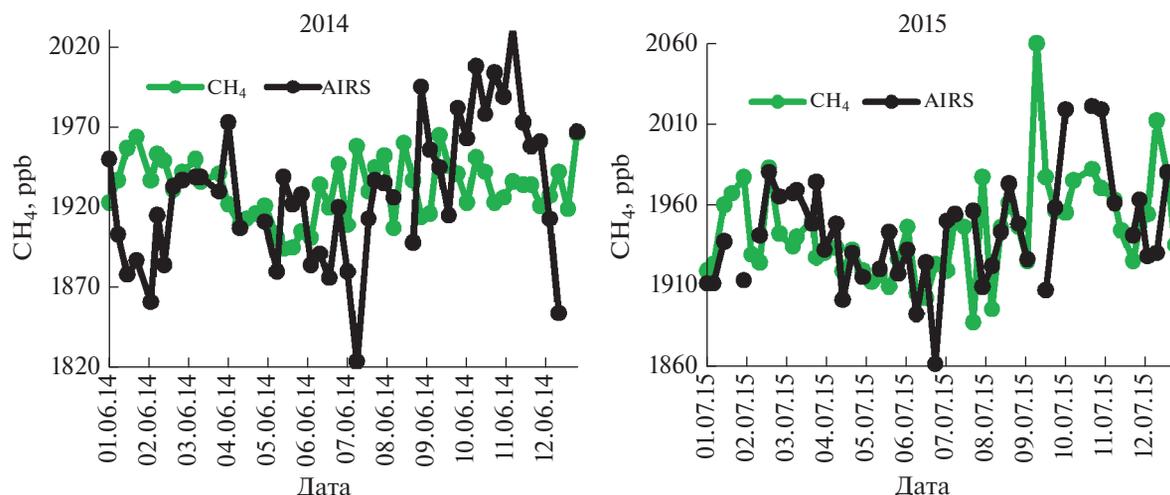


Рис. 6. Вариации концентрации CH_4 в приземной атмосфере по наземным и спутниковым измерениям для Тикси в 2014 и 2015 гг.

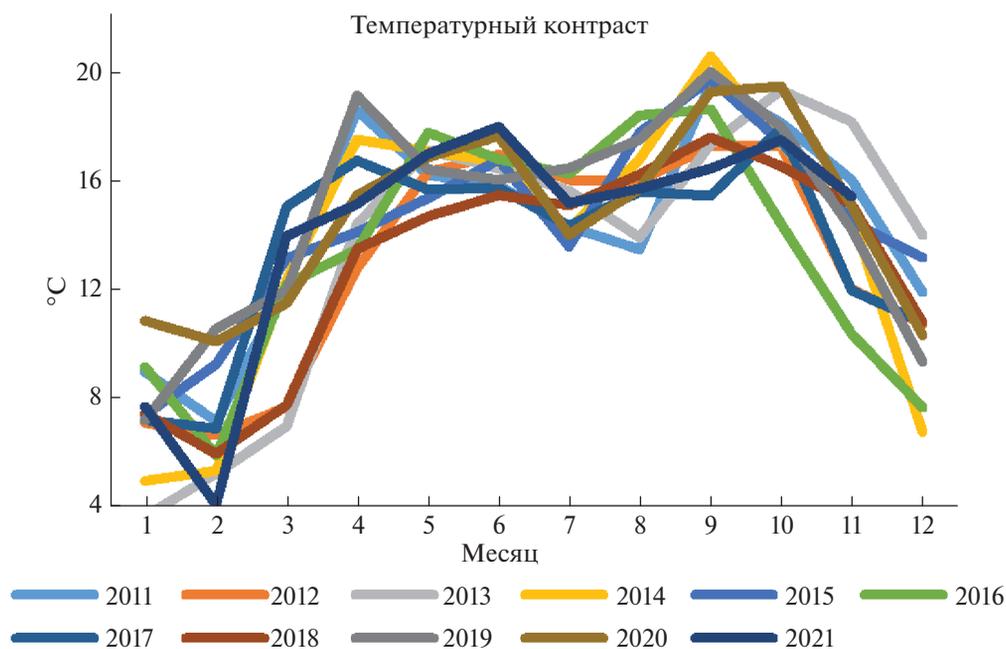


Рис. 7. Графики значений температурного контраста для Тикси на период 2011–2021 гг.

Чтобы выяснить, какой барический уровень лучше использовать для измерения концентрации метана, найдем корреляцию наземных данных со спутниковыми для трех барических уровней: 1 – 1000 гПа, 2 – усредненный по уровням 700 и 850 гПа и 3 – усредненный по уровням 400 и 500 гПа. В табл. 3 приведены полученные значения ККС для 4-х сезонов 2011–2020 гг. Для зимнего сезона значения ККС наименьшие в сравнении с остальными сезонами и составляют $\rho_s = 0.38$ (1000 гПа), $\rho_s = 0.43$ (700–850 гПа), $\rho_s = 0.49$ (400–500 гПа). Для весеннего сезона ККС меня-

ется от 0.59 (1000 гПа), 0.74 (400–500) до 0.76 (700–850 гПа). Здесь преимущественным для измерения является барический уровень 700–850 гПа. Для летнего сезона значение ККС наибольшее для измерений на уровне 1000 гПа и составляет 0.71. Для осеннего периода предпочтением является измерение значений концентрации метана на барическом уровне 400–500 гПа, для которого ККС составляет 0.74 в сравнении с 0.42 для уровня 1000 гПа. Вывод по всем четырем сезонам таков: есть существенное преимущество по корреляции между значениями наземных и спутниковых

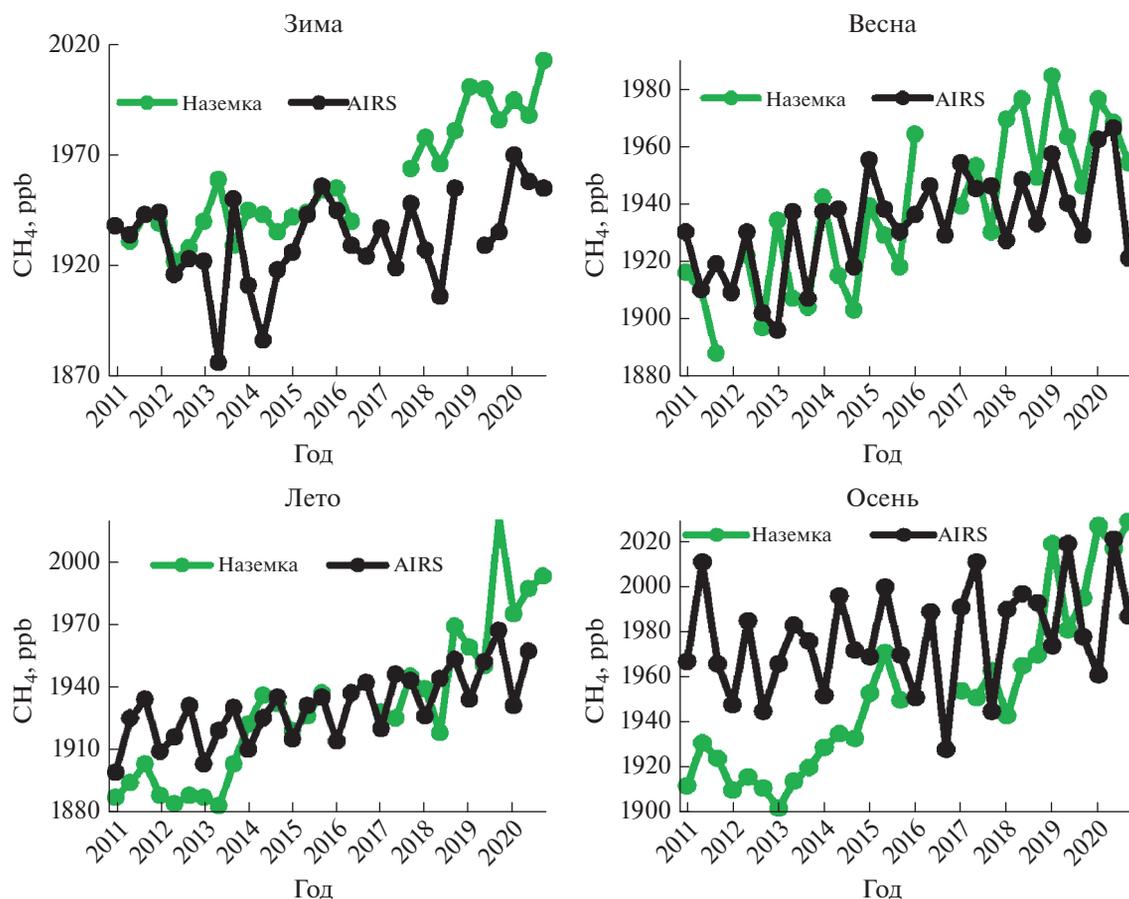


Рис. 8. Вариации концентрации CH_4 в приземном слое атмосферы в районе Тикси по наземным и спутниковым данным AIRS барического уровня 1000 гПа для 4-х сезонов 2011–2020 гг.

измерений при измерении последних на барических уровнях 700–850 гПа или 400–500 гПа вместо барического уровня 1000 гПа.

При определении ККС между наземными данными и спутниковыми измерениями на разных барических высотах для выборки из измерений для четырех сезонов с 2011 по 2020 гг. ($N \sim 105$), показано, что ККС для уровня 1000 гПа равен $\rho_s = 0.44$ ($p = 1e-7$), для уровня 700–850 гПа $\rho_s = 0.557$ ($p = 0$) и для уровня 400–500 гПа $\rho_s = 0.63$ ($p = 0$). Определилось преимущество использования для спутниковых измерений барического уровня 400–500 гПа из-за более высокой корреляции между наземными и спутниковыми измерениями.

На рис. 9, а приведен график регрессионного соотношения между наземными данными на стационаре Тикси и спутниковыми AIRS измерениями концентрации метана на барическом уровне 400–500 гПа за 2011–2020 гг. с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.44$. Сравнение значений концентрации метана по полученной регрессии с наземными данными на стационаре Тикси для 2020 г. выявили значения невязки 6–59 ppb (рис. 9, б),

причем значения невязки наименьшие для весеннего сезона.

Следует отметить, что регрессионная модель получена для Тикси и имеет локальную область применения, ограниченную территориями со сходными с Тикси климатическими условиями.

На корреляцию между наземными и спутниковыми данными влияет еще и то, что наземные измерения проводятся локально на небольшой территории, а пространственное разрешение спутниковых измерений AIRS/AQUA составляет $1^\circ \times 1^\circ$. Кроме того, Тикси находится на побережье моря Лаптевых, и спутник при данном пространственном разрешении видит не только континентальную часть, но и захватывает морскую поверхность, что также влияет на корреляцию наземных и спутниковых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определена корреляция AIRS/AQUA спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы с наземными измерениями на стационаре ГГО им. А.И. Воейкова в

Таблица 3. Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в атмосфере в районе Тикси при разных барических уровнях AIRS измерений

	1000 гПа			
	зима	весна	лето	осень
ρ_s	0.38	0.59	0.71	0.42
p	0.03	5e-4	2e-5	0.015
N	26	27	26	27
	700–850 гПа			
ρ_s	0.43	0.76	0.66	0.53
p	0.02	3e-6	2e-5	3e-3
N	26	26	27	26
	400–500 гПа			
ρ_s	0.49	0.74	0.62	0.74
p	5e-3	2e-5	2e-5	4e-6
N	26	24	26	27

Тикси в 2011–2020 гг. Выявлена отрицательная корреляция наземных данных концентрации метана в приземной атмосфере с температурой воздуха, что связано с периодами эмиссии и стока метана в атмосфере. Корреляция спутниковых AIRS измерений концентрации метана с наземными меняется в зависимости от сезона. Весной и летом корреляция превышает осеннюю и особенно зимнюю. Для зимнего периода (декабрь, январь, февраль) снижение корреляции связано с возможными инверсиями температуры воздуха (Юрганов и др., 2016). При температурном контрасте ТК меньше 10°C при сравнении спутниковых данных с наземными рекомендуется рассматривать значения спутника не на уровне 1000 гПа, а использовать усредненное значение на уровнях

400–500 гПа. При определении ККС между наземными данными и спутниковыми измерениями на разных барических уровнях для выборки из измерений для четырех сезонов с 2011 по 2020 гг. ($N \sim 105$), показано, что ККС для уровня 1000 гПа равен $\rho_s = 0.44$, для уровня 700–850 гПа $\rho_s = 0.557$ и для уровня 400–500 гПа $\rho_s = 0.63$. Регрессионное соотношение для уровня 400–500 гПа имеет значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.44$. Использование полученной регрессии для прогноза проблематично. Значение невязки составляет 6–59 ppb при сравнении ожидаемых по регрессии значений наземных концентраций метана по спутниковым измерениям на барических уровнях 400–500 гПа с измеренными на стационаре Тикси. Значения невязки наименьшие для весеннего сезона.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме 0030-2019-0008 “Космос”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 1–14.
- Белан Б.Д., Креков Г.М. Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. 1. Метан // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 361–373.
- Елисеев А.В. Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70.

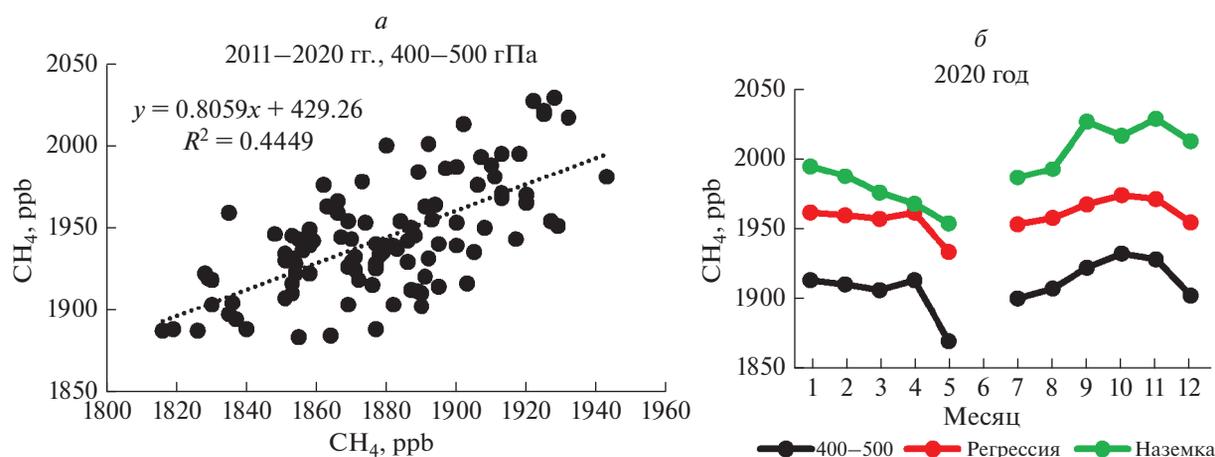


Рис. 9. Регрессионное соотношение между наземными измерениями и спутниковыми на барическом уровне 400–500 гПа для п. Тикси.

Стародубцев В.С. Исследование вариаций концентрации метана и углекислого газа в Арктической зоне // Вестник СВФУ. 2018. № 3(65). С. 80–88.

Юрганов Л.Н., Лейфер А., Майр К. Лунд. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119.

Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. V. 2. № 4. P. 299–327.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21–23.

Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH₄ at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH₄_TER_surface-flask_MGO_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320.

(Reference date*: 2022/01/05).

https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999

Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // J. Geophysical Research. 2008. V. 113.

Correlation of Ground-Based and Satellite Measurements of Methane Concentration in the Surface Layer of The Atmosphere in the Tiksi Region

N. V. Rodionova

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow Region, Russia

The correlation of AIRS/AQUA satellite measurements of methane concentration in the surface layer of the atmosphere with ground-based measurements at the A.I. Voeikov MGO station in Tiksi in 2011–2020 was determined. The correlation of satellite measurements with ground measurements depends on the season. In summer, the correlation is greatest, and it is the least in winter. For the winter period (December, January, February), the decrease in correlation is associated with possible inversions of air temperature (Yurganov et al., 2016; Anisimov, Kokorev, 2015). When the temperature contrast (TC) is less than 10°C (temperature difference between the surface and altitude of 4 km (600 hPa)), it is recommended to use satellite data averaged at the levels of 400–500 hPa. This gives an increase in the Spearman correlation coefficient between ground and satellite measurements from 0.44 (1000 hPa) to 0.63 (400–500 hPa). However, the obtained regression ratio with a determination coefficient of 0.44 makes it problematic to use it for predicting ground-based data from satellite measurements in areas similar in climatic conditions to Tiksi.

Keywords: remote sensing, ground measurements, satellite measurements, methane concentration in the atmosphere, Spearman correlation coefficient

REFERENCES

Anisimov O.A., Kokorev V.A. Sravnitel'nyj analiz nazemnyh, morskih i sputnikovyh izmerenij metana v nizhnej atmosfere rossijskoj chasti Arktiki v usloviyah izmeneniya klimata [Comparative analysis of terrestrial, marine and satellite measurements of methane in the lower atmosphere of the Russian Arctic under climate change] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2015. № 2. P. 1–14. (In Russian).

Belan B.D., Krekov G.M. Vliyanie antropogennogo faktora na sodержanie parnikovyh gazov v troposfere. 1. Metan [The influence of anthropogenic factors on the content of greenhouse gases in the troposphere. 1. Methane] // Optika atmosfery i okeana. 2012. V. 25. № 4. P. 361–373. (In Russian).

Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. V. 2. № 4. P. 299–327.

Eliseev A.V. Global'nyj cikl metana: obzor [Global methane cycle: an overview] // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2018. V. 1. P. 52–70. (In Russian).

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21–23.

Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH₄ at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH₄_TER_surface-flask_MGO_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320.

https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999 (Reference date*: 2022/01/05).

Starodubcev V.S. Issledovanie variacij koncentracii metana i uglekislogo gaza v Arkticheskoj zone [Investigation of variations in the concentration of methane and carbon dioxide in the Arctic zone] // Vestnik SVFU. 2018. № 3(65). P. 80–88. (In Russian).

Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // J. Geophysical Research. 2008. V. 113.

Yurganov L.N., Lejfer A., Majr K. Lund. Sezonnaya i mezgodovaya izmenchivost' atmosfernogo metana nad morjami Severnogo Ledovitogo okeana po sputnikovym dannym [Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over the seas of the Arctic Ocean according to satellite data] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 2. P. 107–119. (In Russian).