

## **Корреляция наземных и спутниковых значений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси**

Н.В. Родионова

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
141190, г. Фрязино, МО, пл. Введенского, 1.  
E-mail: [rnv1948123@yandex.ru](mailto:rnv1948123@yandex.ru)*

*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 ниже зимнюю. Для зимнего периода (декабрь, январь, февраль) снижение корреляции связано с возможными инверсиями температуры воздуха [1, 2]. При температурном контрасте (ТК) меньше 10° С (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).  
Ключевые слова: дистанционное зондирование, метан, наземные и спутниковые измерения, коэффициент корреляции Спирмена*

## **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.*

*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 in winter it is the least. For the winter period (December, January, February), the decrease in correlation is associated with possible inversions of air temperature [1, 2]. When the temperature contrast (TC) is less than 10 ° C (the difference in air temperature on the surface and at the level of 600 hPa (4 km)), satellite data averaged at the levels of 400-500 hPa should be mainly used. This gives an increase in the Spearman correlation coefficient (SCC) between ground and satellite measurements from 0.44 (1000 hPa) to 0.63 (400-500 hPa).  
Keywords: methane, remote sensing, ground and satellite measurements, spearman correlation coefficient*

### **Введение**

Метан (CH<sub>4</sub>) – 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 [3]. 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 на 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  $\text{CH}_4$  при потеплении климата, в океане при уменьшении его уровня [4]. В Арктической зоне температура воздуха растет в полтора-два раза быстрее, чем в среднем по Земле, что стимулирует активность многих естественных источников метана, оказывает воздействие на вечную мерзлоту, высвобождая в огромных количествах метан и другие малые газовые компоненты [5].

Важнейшим стоком метана в атмосфере, составляющим почти 90% от полной интенсивности стока, является его разрушение при реакции с гидроксил-радикалом  $\text{OH}$  с образованием углекислого газа и паров воды [6]. В зимние месяцы, когда процессы стока метана прекращаются, метан начинает накапливаться в атмосфере, а летом включаются процессы стока метана [7].

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/>. Помимо наземных 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 приземном слое атмосферы на стационаре Тикси, расположенном в арктической зоне, и спутниковых измерений инфракрасным спектрометром AIRS, установленным на спутнике EOS AQUA.

### **Наземные измерения**

Станция фонового мониторинга "Тикси" находится на побережье моря Лаптевых, координаты станции  $71.586166^\circ\text{N}$ ,  $128.91882^\circ\text{E}$ . На станции Тикси работы по наблюдению за метаном ведутся с 2012 г. Пробы  $\text{CH}_4$  на станции отбираются круглогодично раз в неделю вакуумированными флягами. Для измерения 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 и доступны 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 [8].

На рис. 1 (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 года) и максимум в сентябре-октябре. На рис. 1 (б) приведен график межгодовых вариаций концентрации  $\text{CH}_4$  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 года было недостаточно (есть данные только для первых трех месяцев), а для 2017 года отсутствовали данные за январь, февраль. В результате измерения за эти годы не вошли в график межгодовых вариаций.

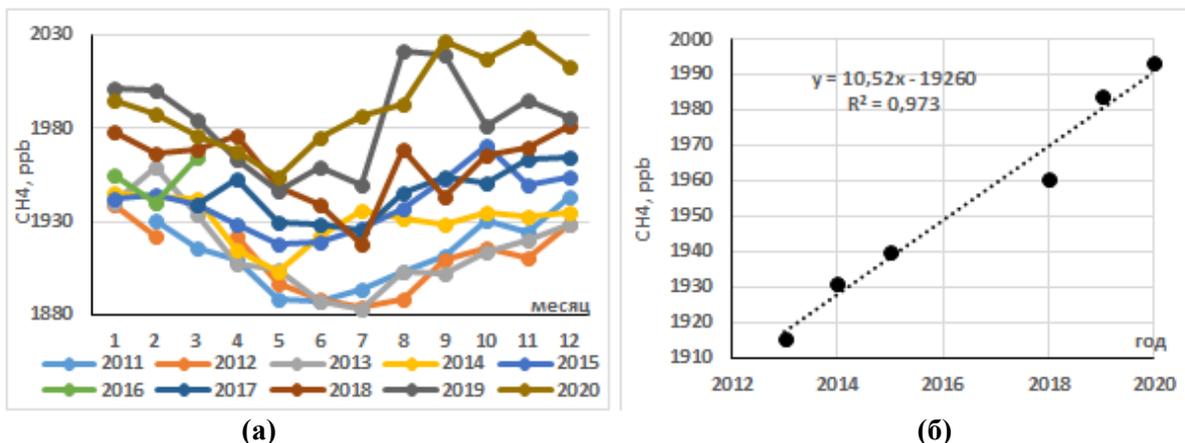


Рис. 1. Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана в приземном слое атмосферы по наземным измерениям на станции фонового мониторинга ГГО Тикси

В зимнее время происходит накопление метана в атмосфере, в летнее – сток, т. е. есть обратная корреляция с температурой воздуха. На рис. 2 приведен график вариаций концентрации метана по регулярным (раз в неделю) наземным измерениям на стационаре Тикси для 2013 года и график значений температуры воздуха по архивным данным для аэропорта Тикси (сайт [gr5.ru](http://gr5.ru)) на момент взятия проб метана. Очевидна отрицательная корреляция этих данных. В таблице 1 приведены значения ККС между температурой воздуха и наземными измерениями концентрации метана в приземном слое атмосферы на стационаре в Тикси для периода 2011-2018 гг., где  $\rho_s$  – коэффициент корреляции Спирмена,  $p$ - значение,  $N$  – число измерений.

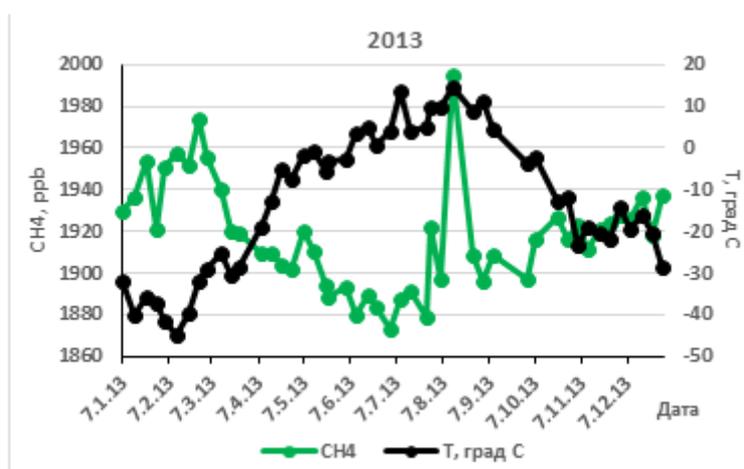


Рис. 2. Графики вариаций концентрации метана по регулярным наземным измерениям на стационаре в Тикси для 2013 года и значений температуры воздуха

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

	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
$\rho_s$	-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

### Спутниковые измерения концентрации метана и корреляция с наземными измерениями

С 2002 года 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. 3 приведены графики сезонных и межгодовых вариаций концентрации метана над территорией в районе Тикси, по среднемесячным данным AIRS, усреднение по территории 71°58'33"-71°58'32" N, 128°51'06"-128°51'05" E, (продукт AIRS3STM v.7.0), барическая высота 1000 гПа, пространственное разрешение 1°x1°, на период 2011-2018 гг. Существенным отличием поведения графиков рис. 1 (а) (наземные измерения) от графиков рис. 3 (а) (спутниковый измерения) является значительное уменьшение значений концентрации метана в зимний сезон по спутниковым данным. О возможной причине будет сказано ниже.

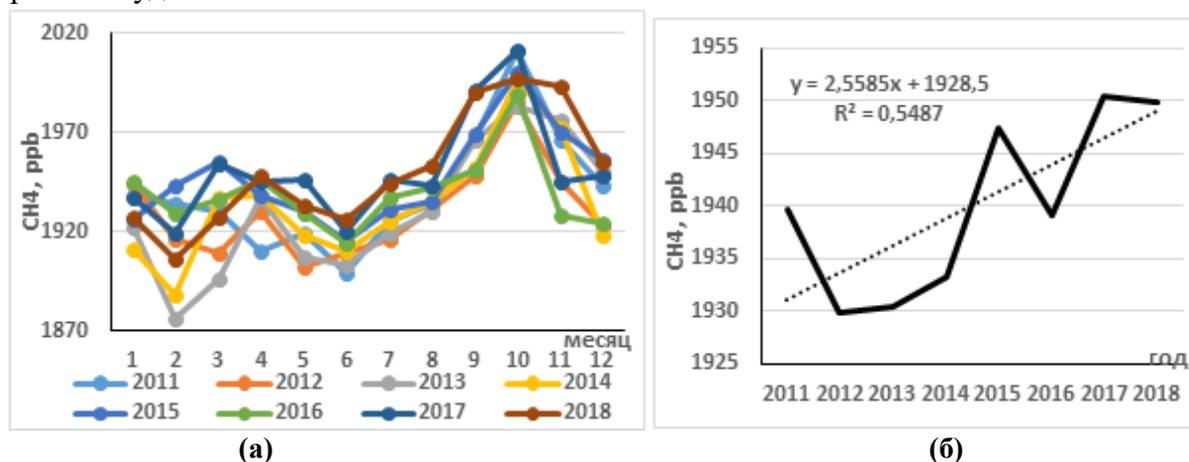


Рис. 3. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации концентрации метана в атмосфере уровня 1000 гПа над территорией в районе Тикси по данным AIRS

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. В таблице 2 приведены значения 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 года (отсутствие корреляции) и 2015 года (положительная корреляция) на рис. 4 приведены графики вариаций концентрации CH<sub>4</sub> 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
$\rho_s$	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

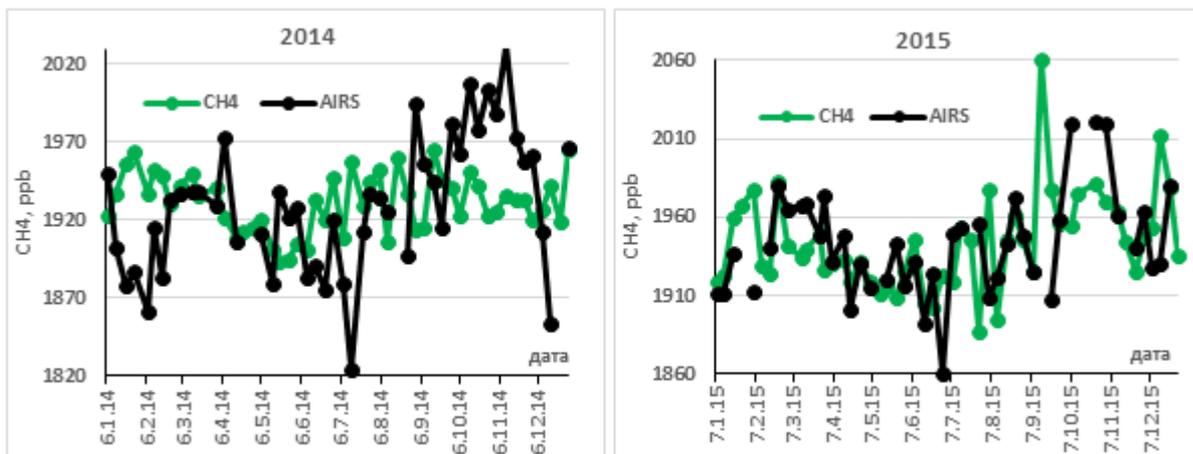


Рис. 4. Вариации концентрации  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы по наземным и спутниковым измерениям для Тикси в 2014 и 2015 гг.

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 [1]. Можно предположить, что для  $\text{ТК} < 10^\circ\text{C}$  измеренная спутником концентрация метана понижена [1]. 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 у более высоких слоев [1]. Это происходит, если разность температур на поверхности (уровень 1000 гПа) и на высоте порядка 4 км (600 гПа) меньше  $10^\circ\text{C}$ , т.е. температурный контраст (ТК) меньше  $10^\circ\text{C}$ . На рисунке 5 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  $10^\circ\text{C}$ .

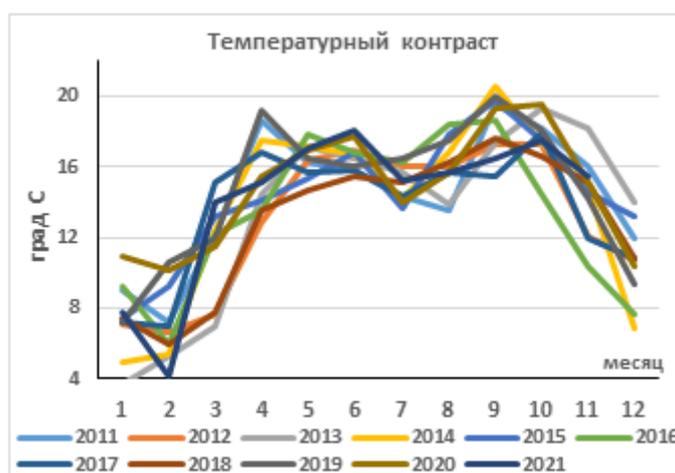


Рис. 5. Графики значений температурного контраста для Тикси на период 2011-2021 гг.

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

месяцы; весна -3, 4, 5 месяцы; лето-6, 7, 8 месяцы; осень – 9, 10, 11 месяцы. На рис. 6 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 спутниковые значения концентрации метана находятся практически на одном уровне. Для осени спутниковые значения превосходят наземные, за исключением 2019 и 2020 гг.

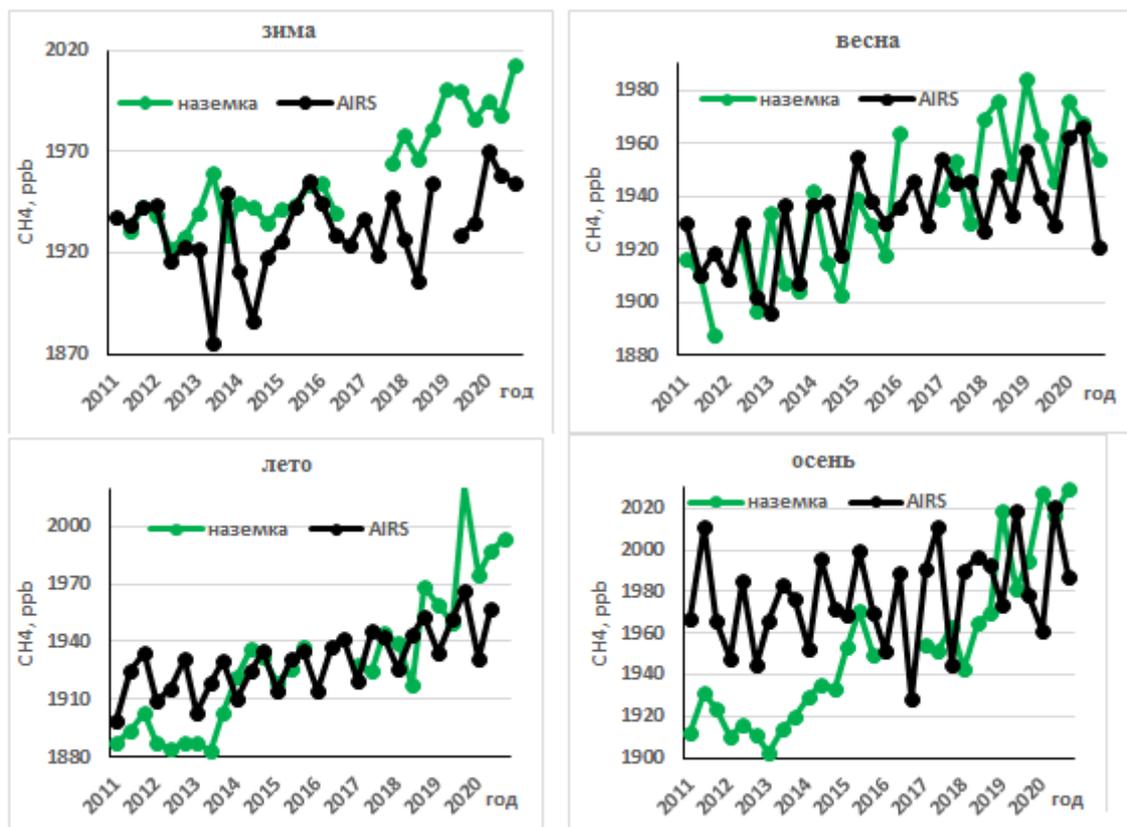


Рис. 6. Вариации концентрации CH<sub>4</sub> в приземном слое атмосферы в районе Тикси по данным спектрометра AIRS для 4-х сезонов 2011-2020 гг

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 [2] 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 [5] использовался барический уровень 400 гПа, выбор которого был обусловлен рекомендациями, представленными в работе [9], где уровень 400-500 гПа (~ 6-5 км) предлагался как наиболее эффективный для оценки концентрации метана в арктической зоне.

Чтобы выяснить, какой барический уровень предпочтительнее 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 таблице 3 приведены полученные значения ККС для 4-х сезонов 2011-2020 гг.: зима, весна, лето, осень. 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 меняется 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 преимущество по корреляции между значениями наземных и спутниковых измерений при измерении последних на барических уровнях 700-850 гПа или 400-500 гПа вместо барического уровня 1000 гПа.

**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
$\rho_s$	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			
	Зима	Весна	Лето	Осень
$\rho_s$	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			
	Зима	Весна	Лето	Осень
$\rho_s$	0.49	0.74	0.62	0.74
p	5e-3	2e-5	2e-5	4e-6
N	26	24	26	27

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~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 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 частично захватывает морскую поверхность, что также влияет на корреляцию наземных и спутниковых данных.

### **Выводы**

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. Определена 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~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  $\rho_s = 0.63$ .

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

### **Литература**

1. 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.
2. 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.
3. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21-23.
4. Елисеев А.В. Глобальный цикл метана: обзор// Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т.1. С. 52-70.
5. Стародубцев В.С. Исследование вариаций концентрации метана и углекислого газа в Арктической зоне// Вестник СВФУ. 2018. №3 (65). С.80-88.
6. Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane// Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. Vol. 2. No. 4. P. 299-327.
7. 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.
8. Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH<sub>4</sub> at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH<sub>4</sub>\_TER\_surface-flask\_MGO\_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320, [https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0046-6003-1002-01-02-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999) (Reference date\*: 2022/01/05).
9. Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L. and Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113.