



Связь спектрозональных данных Sentinel-2 с наземными измерениями концентраций метана и метеопараметрами атмосферы в летний период

Н.В. Попов¹✉, В.А. Малинников¹, А.И. Нахутин²

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

✉ nikitappv02@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Попов Н.В., Малинников В.А., Нахутин А.И. Связь спектрозональных данных Sentinel-2 с наземными измерениями концентраций метана и метеопараметрами атмосферы в летний период // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 30–44. DOI:10.30533/GiA-2025-028.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА метан, спутники, Sentinel-2, парниковые газы, мониторинг, системы наблюдений, Тикси, летний сезон в Арктике

АННОТАЦИЯ Статья является продолжением предыдущих исследований по изучению связи приземной концентрации метана с метеопараметрами и данными об уровне серого тона в 12 спектральных каналах Sentinel-2 MSI в районе станции Тикси. Проведен аналогичный анализ по выборке суточных наблюдений и материалов космической съемки в летние месяцы с 2016 по 2022 год. Показано, что регрессионные модели, разработанные по выборке за зимний период в предыдущем исследовании, не применимы к прогнозу приземной концентрации метана в летние месяцы: коэффициент детерминации всех моделей составил менее 0,5; при использовании нелинейной модели были получены отрицательные значения приземной концентрации метана. Методом регрессионного анализа выявлены соотношения каналов Sentinel-2 MSI, или индексы, учет которых вместе с параметром скорости ветра в единой статистической модели приводит к наибольшему увеличению коэффициента детерминации модели для оценки приземной концентрации метана в летний период по материалам космической съемки и данным метеопараметров. Разработаны две регрессионные модели оценки приземной концентрации метана, учитывающие соотношения 2, 4, 7, 8, 9, 10 и 11-го каналов Sentinel-2 MSI и данные о скорости ветра. В результате сопоставления спектральных характеристик указанных каналов MSI с линиями

поглощения газовых составляющих атмосферы обнаружено, что модели, разработанные для летнего периода, описывают те же явления, что учитываются в моделях для зимнего периода: изменение концентрации метана в атмосфере и сток метана из-за его реакции с гидроксил-радикалом ОН.

1 Введение

В настоящее время активно развиваются спутниковые методы оценки концентраций парниковых газов [1, 2]. Первый космический аппарат, выполнявший подобные задачи, был введен в эксплуатацию еще в 1997 году — это IMG (*англ.* The Interferometric Monitor for Greenhouse Gases). Затем данную миссию продолжили спутники SCHIAMACHY, GOSAT Японского космического агентства Жаха и TROPOMI Европейского космического агентства [3, 4]. В настоящее время действует и планируется к запуску еще несколько спутников, которые измеряют как углекислый газ, так и метан. Зачастую данные спутников, измеряющих концентрации парниковых газов, калибруют по данным наземных измерений, например сети станций TCCON [5, 6] или других станций, в том числе международной системы «Глобальная служба атмосферы» (*англ.* Global Atmosphere Watch) [7].

В настоящей работе основное внимание уделено метану (CH_4). В последнее время наибольшее развитие получили методы восстановления концентраций метана с помощью инверсии и использования моделей транспорта излучения в атмосфере, которые применяются совместно с реальными измерениями спутников. Однако недостатком данных методов является необходимость проведения сложных математических расчетов по моделям транспорта излучения в атмосфере и использования большого количества данных из открытых источников [3, 8–9]. В исследованиях, которые легли в основу данной работы, было сделано допущение, что возможно разработать более простые регрессионные модели оценки приземной концентрации метана по данным значений метеопараметров приземной атмосферы и регистрируемого спутником излучения [10]. Ранее был проведен анализ статистической взаимосвязи приземных концентраций метана, метеопараметров на арктической станции Тикси и уровня серого тона в 12 каналах Sentinel-2 MSI в зимний период. Обнаружено, что существует сильная линейная и нелинейная зависимость между данными Sentinel-2 MSI, метеопараметрами и приземной концентрацией метана: значение коэффициента детерминации R^2 для двух случаев оказалось больше 0,6, а стандартная ошибка меньше 15 ppb, что меньше 1 % от средней концентрации метана в зимний период в Тикси. Результатом исследования стали две регрессионные модели — линейная (1) и нелинейная (2) (все данные об уровне серого в каналах MSI представляют собой безразмерный коэффициент отражения на уровне верхней границы атмосферы [TOA reflectance]):

$$\begin{aligned}
 1 \quad & C_{\text{CH}_4} = 2561,026 + 0,0265X1 - 0,00216X2 - 0,5926X3 - 5,9381X4, \\
 2 \quad & C_{\text{CH}_4} = 1956,784 + 0,121\left(\frac{x5}{x3}\right) - 3,75 \times 10^{-13}(x5 \times x2 \times x3 \times x4) - \\
 & - 1,06 \times 10^{-7}(x5 \times x3) - 1,36 \times 10^{-4}(x2 \times x4^2),
 \end{aligned}$$

где C_{CH_4} — приземная концентрация метана, ppb;
 $X1$ и $X2$ — уровень серого, осредненный по территории радиусом 12 пикселей, или 354 м вокруг точки измерений приземной концентрации метана на космическом изображении, полученный в 12-м и 5-м каналах Sentinel-2 MSI соответственно, безразмерный;
 $X3$ и $X4$ — атмосферное давление и парциальное давление пара соответственно, гПа;

X5 — произведение уровня серого, осредненного по территории радиусом 354 м вокруг точки измерения приземной концентрации метана на космическом изображении, полученного в 11-м и 12-м каналах Sentinel-2 MSI, безразмерный.

В предыдущем исследовании был сделан вывод о необходимости разработки регрессионной модели в летний период. Таким образом, целью настоящей статьи, являющейся продолжением предыдущих исследований, стала разработка регрессионной модели зависимости данных Sentinel-2 MSI и метеопараметров от приземной концентрации CH_4 в районе Тикси в летний период.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- сбор базы данных выборки приземных измерений и материалов космической съемки, их обработка и подготовка к статистическому анализу;
- апробация регрессионной модели, разработанной для зимнего периода по данным выборки для летнего периода;
- анализ каналов сенсора, измерения в которых наиболее коррелируют с измерениями приземной концентрации метана в летний период;
- регрессионный анализ и анализ качества разработанных регрессионных моделей.

2 Материалы и методы

Для достижения поставленной цели использовался массив данных станции Тикси за летние месяцы с 2016 по 2022 год¹. За указанный период также были отобраны снимки со спутников Sentinel 2A/B в 12 каналах без атмосферной коррекции с целью исключения искажения результатов.

Массив данных Тикси содержит информацию об осредненных за час, день и месяц значениях концентрации метана и метеопараметров. Приземная концентрация метана на станции измеряется с помощью лазерного анализатора концентраций парниковых газов Picarro G2301, забор воздуха из окружающей среды к газоанализатору осуществляется насосом Metal-Bellows MB-158E по 13-метровой тefлоновой трубе (рис. 1) [11]. На станции измеряются следующие метеопараметры: направление и скорость ветра, атмосферное давление, относительная влажность и температура приземного воздуха. Для проведения анализа отбирался массив данных среднесуточных значений метеопараметров и концентраций метана.

Рис. 1  Фотографии станции Тикси (автор снимков — Андрей Валерьевич Рябов)

Fig. 1 Photos of Tiksi station (photos by Andrei V. Ryabov)

Станция снаружи / Station outside



Внутренняя измерительная аппаратура / Inside measurement infrastructure



1 Laurila T., Dlugokecky E., Ivakhov V., et al. Atmospheric CH_4 at Tiksi by Finnish Meteorological Institute. 2022. Version 2022-07-08-2150. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.50849/WDCGG_0025-2002-1002-01-01-9999 (дата обращения: 09.12.2024).

Подготовка массивов метеоданных, приземных концентраций метана и данных спутника выполнялась методом, аналогичным использованному в предыдущем исследовании, с одним исключением: в предлагаемой работе не проводилась очистка массива приземных концентраций метана от всплесков в связи с тем, что в летний период их наличие может быть обусловлено как антропогенными, так и естественными выбросами, в то время как в зимний период естественные источники метана на поверхности практически неактивны [10].

Апробация регрессионной модели для зимнего периода (далее — зимняя модель) по суточным наблюдениям летнего периода проводилась двумя способами:

- 1) методом расчета по коэффициентам в формулах (1) и (2);
- 2) перерасчетом коэффициентов зимних моделей по суточным наблюдениям летнего периода.

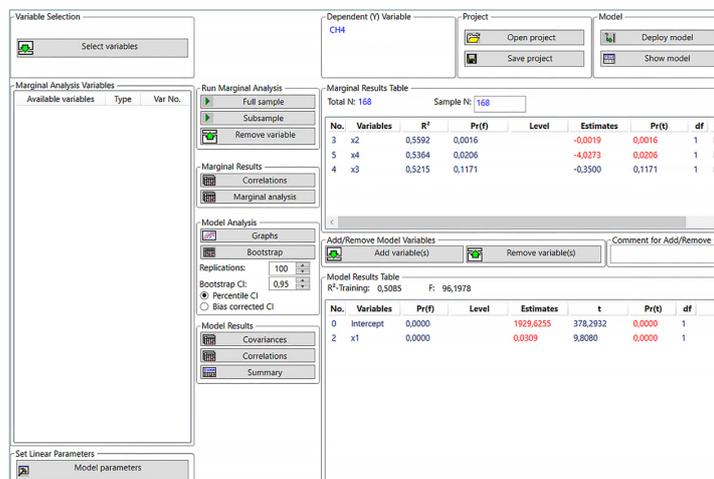
После апробации проводился анализ статистики регрессионных моделей: нормированного R^2 , F -статистики и стандартной ошибки².

Был осуществлен корреляционный анализ данных: между данными об уровне серого в каналах Sentinel-2 MSI и приземной концентрацией метана в летний период построены коэффициенты корреляции Пирсона. Проводился поиск факторов, наиболее коррелирующих с приземной концентрацией метана.

Регрессионный анализ проходил по следующему алгоритму:

1. Рассчитывались индексы, или комбинации между осредненными значениями уровня серого 12 каналов Sentinel-2 MSI, соответствующие отношениям $(K - K) / (K + K)$; $(K - K) / K$; $(K + K) / K$; $K / (K + K)$; K / K (где K — данные одного из каналов MSI). Всего было построено более 5000 индексов.
2. Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (далее — R) между приземной концентрацией метана и каждым индексом. По наибольшему значению модуля R проводился отбор первого индекса.
3. Рассчитывались R между первым индексом и остальными, и проводился отбор массива индексов, соответствующих условию: модуль значения R между проверяемым индексом и первым не превышает 0,49.
4. В отобранном массиве проводился поиск второго индекса, добавление которого в регрессионную модель вместе с первым вносит наибольший вклад в увеличение R^2 среди остальных индексов массива.
5. После подбора пары индексов инструментом «Пошаговое построение модели» в статистической программе TIBCO Statistica v13.0.5.17 (рис. 2) подбирался метеопараметр, добавление которого в модель из пары индексов приводит к наибольшему увеличению R^2 . На выходе из шага 4 получалась наилучшая нелинейная регрессионная модель, в которой все факторы имеют первый порядок.

Рис. 2  Пример работы инструмента «Пошаговое построение модели» в Statistica 13
Fig. 2 Example of “Stepwise linear regression instrument” work in Statistica 13



2 Грекусис Дж. Методы и практика пространственного анализа / пер. с англ. А.Н. Киселева. М.: ДМК Пресс, 2021. 540 с.

6. Проводился анализ качества подобранной модели из двух индексов и одного метеопараметра по методологии, использованной в предыдущем исследовании [10].
7. При наличии признаков нелинейной зависимости проводилось увеличение порядка метеопараметра и осуществлялся повторный анализ качества модели. На выходе из шага 6 получалась наилучшая нелинейная регрессионная модель с метеопараметром, возведенным в четвертую степень.
8. После получения итоговой модели проводился анализ выбросных точек по разнице стандартных остатков суточных наблюдений между двумя моделями: в случае если в первой модели было обнаружено наблюдение со стандартным остатком, по модулю больше или равным 1,9, а во второй модели с большим R^2 его значение увеличилось, то оно удалялось из выборки с допущением, что данное наблюдение не подвержено той же тенденции, что и остальной набор данных. Удаление проводилось в две итерации, после каждой из которых очищалась выборка и пересчитывалась статистика моделей.

Вышеупомянутая методика регрессионного анализа отличается от примененной в предыдущем исследовании для зимнего периода, поскольку в холодный сезон изолируются естественные источники метана на поверхности, отсутствует изменение подстилающей поверхности, ограничен по высоте слой перемешивания и существует сильная корреляция между метаном и уровнем серого в 12-м канале Sentinel-2 MSI [10]. Летом из-за влияния изменений подстилающей поверхности, активизации естественных поверхностных источников метана и увеличения слоя перемешивания построение индексов необходимо с целью выявления зависимостей, более точно объясняющих изменение приземной концентрации метана, чем данные об уровне серого в отдельно взятых каналах Sentinel-2 MSI.

3 Результаты

Из архивных среднесуточных данных метеостанции Тикси и спутниковых изображений была собрана выборка из 74 наблюдений различных метеопараметров и уровня серого тона космических изображений. Результаты апробации зимней модели по данным выборки за летний период приведены в табл. 1.

Таблица 1 
 Результаты апробации зимней модели по данным летнего периода разными методами

Table 1
 Results of approbation of model for winter period on summer data using different methods

Модель	Метод	R^2	F (значимость F)	Стандартная ошибка
Линейная	1	0,0408	0,71	46,72
	2	0,34	$8,5(3,7 \times 10^{-6})$	24
Нелинейная	1	Получены отрицательные значения концентрации метана		
	2	0,36	$11,1(5,55 \times 10^{-7})$	30

Из табл. 1 видно, что параметры, характеризующие взаимосвязь приземной концентрации метана, спектрзональных данных Sentinel-2 MSI и метеопараметров в зимний период, плохо объясняют аналогичную взаимосвязь в летний период, что также подтверждается другими исследованиями [12].

В табл. 2 приведены парные коэффициенты корреляции Пирсона между данными сенсора и приземной концентрацией метана.

На этапе регрессионного анализа были обнаружены 2 наблюдения, отклоняющиеся от линии регрессии на два стандартных отклонения (рис. 3).

После первой итерации были удалены 2 наблюдения, полученные 28.08.2018 и 27.08.2020 (на рис. 3 порядковые номера 29 и 69 соответственно). Во время второй итерации не было обнаружено выбросов, удовлетворяющих критериям.

	Ежедневная концентрация CH ₄	Значения уровня серого в каналах спутника, осредненные по территории вокруг точки измерения приземной концентрации метана											
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й
Ежедневная концентрация CH ₄	1,000												
Значения уровня серого в каналах спутника, осредненные по территории вокруг точки измерения приземной концентрации метана	1-й	0,235	1,000										
	2-й	0,194	0,995	1,000									
	3-й	0,174	0,980	0,993	1,000								
	4-й	0,075	0,962	0,981	0,988	1,000							
	5-й	-0,225	-0,300	-0,275	-0,238	-0,191	1,000						
	6-й	0,265	0,837	0,852	0,888	0,839	-0,162	1,000					
	7-й	0,313	0,785	0,795	0,833	0,770	-0,174	0,991	1,000				
	8-й	0,316	0,771	0,778	0,814	0,753	-0,147	0,981	0,992	1,000			
	9-й	0,208	0,666	0,664	0,678	0,651	0,023	0,762	0,752	0,817	1,000		
	10-й	0,433	0,718	0,699	0,706	0,636	-0,205	0,724	0,742	0,775	0,808	1,000	
	11-й	0,309	0,395	0,354	0,343	0,275	-0,175	0,399	0,460	0,502	0,576	0,790	1,000
	12-й	0,279	0,585	0,555	0,546	0,498	-0,143	0,535	0,564	0,613	0,743	0,899	0,950

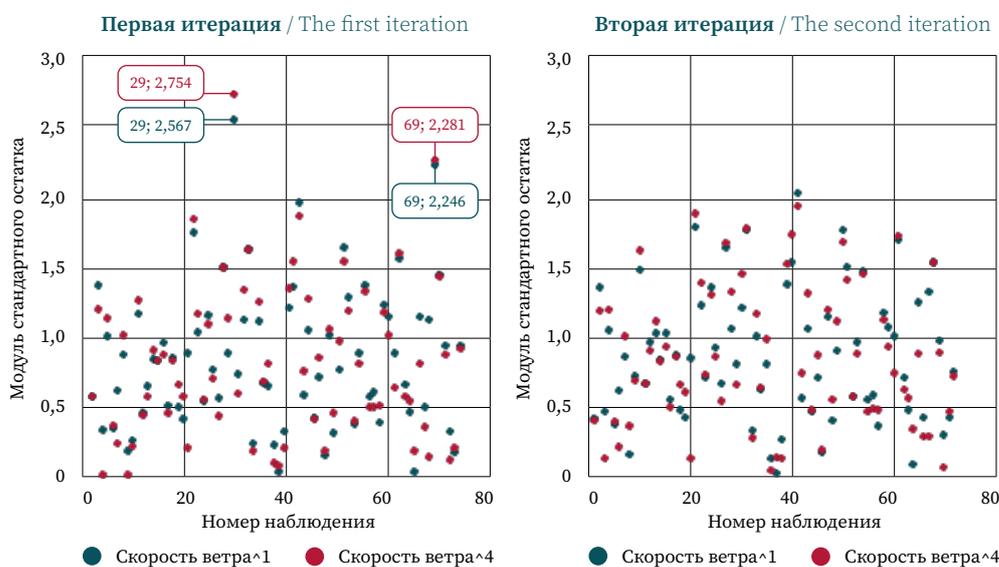
Таблица 2 ↕

Коэффициенты корреляции Пирсона между данными спутника и приземной концентрацией метана

Table 2
Pearson correlation coefficients between satellite data and ground-level methane concentration

Рис. 3 ▶
Результаты анализа стандартных остатков моделей с параметрами скорости ветра в 1-й и в 4-й степени

Fig. 3
Standard residuals of 1st and 4th degree models outliers analysis in first and second iteration



После очистки экспериментальных данных для статистического анализа была подготовлена выборка из 72 суточных наблюдений. Для расчета модели, как и в предыдущем исследовании, отбирались средние значения уровня серого в каналах спутника в радиусе 6, 12 и 18 пикселей, или 168, 354 и 504 м соответственно [10].

Было проведено исследование на статистическую взаимосвязь всех возможных комбинаций, или индексов, из 12 каналов Sentinel-2 MSI и приземной концентрации метана, в результате были выявлены два индекса, приведенные в формулах (3) и (4). Добавление параметра скорости ветра в регрессионную модель привело к наибольшему увеличению значения нормированного R^2 по сравнению с другими метеопараметрами. В итоге были разработаны две нелинейные модели: одна – с параметром скорости ветра в первом порядке, другая – с параметром скорости ветра в четвертом порядке (далее – модели первого и четвертого порядка соответственно).

Рассчитанные нелинейные регрессионные модели первого и четвертого порядка описываются следующими выражениями (все данные об уровне серого в каналах MSI представляют собой безразмерный коэффициент отражения на уровне верхней границы атмосферы [TOA reflectance]):

$$3 \rightarrow C_{CH_4} = 2190,613 - 295,467X1 - 5,619X2 + 136,285X3,$$

$$4 \rightarrow C_{CH_4} = 2182,83 - 302,67X1 - 0,01X2^4 + 127,74X3,$$

где $X1$ – отношение средних уровней серого тона 4, 2 и 10-го каналов в радиусе 12 пикселей вокруг точки измерения метана на космическом изображении: 4-й канал / (2-й канал + 10-й канал), безразмерный;

$X2$ – скорость ветра, м/с;

$X3$ – отношение средних уровней серого 8, 9, 7 и 11-го каналов в радиусе 12 пикселей вокруг точки измерения метана на космическом изображении: (8-й канал – 9-й канал) / (7-й канал + 11-й канал), безразмерный.

Характеристики параметров и качества рассчитанных нелинейных регрессионных моделей приведены в табл. 3 и 4.

На рис. 4–6 приведены квантиль-квантильные графики вероятностей, графики стандартных остатков и сопоставления приземных и модельных значений концентрации метана (все графики сделаны в программе TIBCO Statistica v13.0.5.17).

Таблица 3 
Характеристики параметров регрессионных моделей

Table 3
Characteristics of regression models parameters

Параметр	β -коэффициент	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение
Модель первого порядка				
Нулевой член		26,578	82,423	$7,13 \times 10^{-70}$
$X1$	-0,771	30,687	-9,628	$2,51 \times 10^{-14}$
$X2$	-0,219	1,961	-2,865	$5,54 \times 10^{-3}$
$X3$	0,182	60,524	2,252	$2,76 \times 10^{-2}$
Модель четвертого порядка				
Нулевой член		24,46	89,25	$3,34 \times 10^{-72}$
$X1$	-0,79	29,16	-10,38	$1,17 \times 10^{-15}$
$X2^4$	-0,284	0,003	-3,90	$2,25 \times 10^{-4}$
$X3$	0,17	57,91	2,21	$3,08 \times 10^{-2}$

Таблица 4 
Характеристики качества регрессионных моделей

Table 4
Characteristics of regression models quality

Параметр	Модель	
	первого порядка	четвертого порядка
Множественный R	0,786	0,806
R^2	0,617	0,649
Нормированный R^2	0,6	0,634
Стандартная ошибка	23,98	22,948
Критерий Фишера (F)	36,56	41,98
Критическое (F)	$3,47 \times 10^{-14}$	$1,81 \times 10^{-15}$

Рис. 4 

Квантиль-квантильные графики вероятностей моделей первого и четвертого порядка

Fig. 4

Normal plot of residuals of 1st and 4th degree models

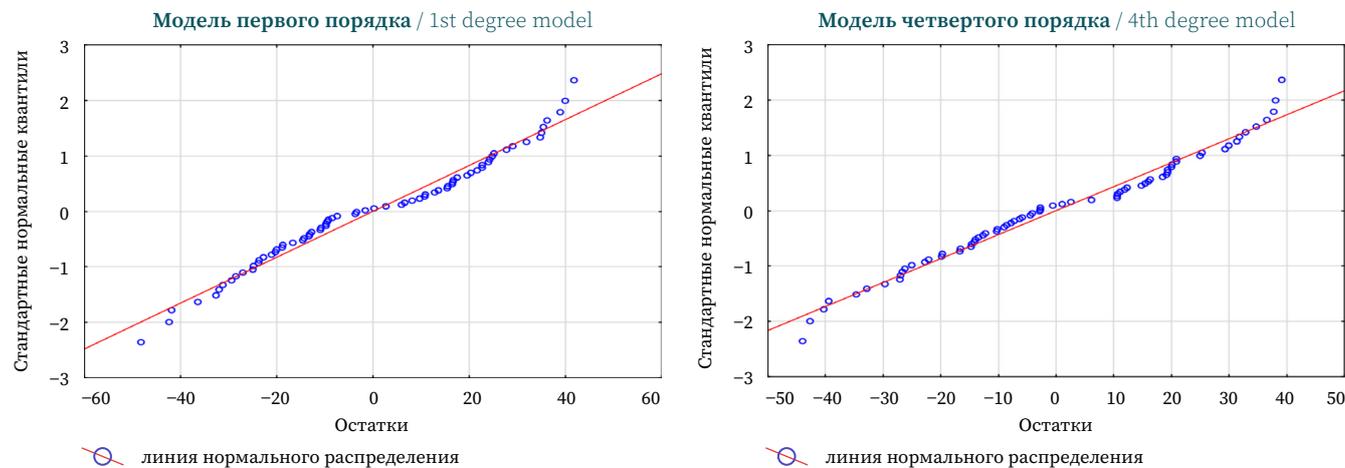


Рис. 5 

Графики рассеяния стандартных остатков моделей первого и четвертого порядка

Fig. 5

Scatter plot of standard residuals of 1st and 4th degree models

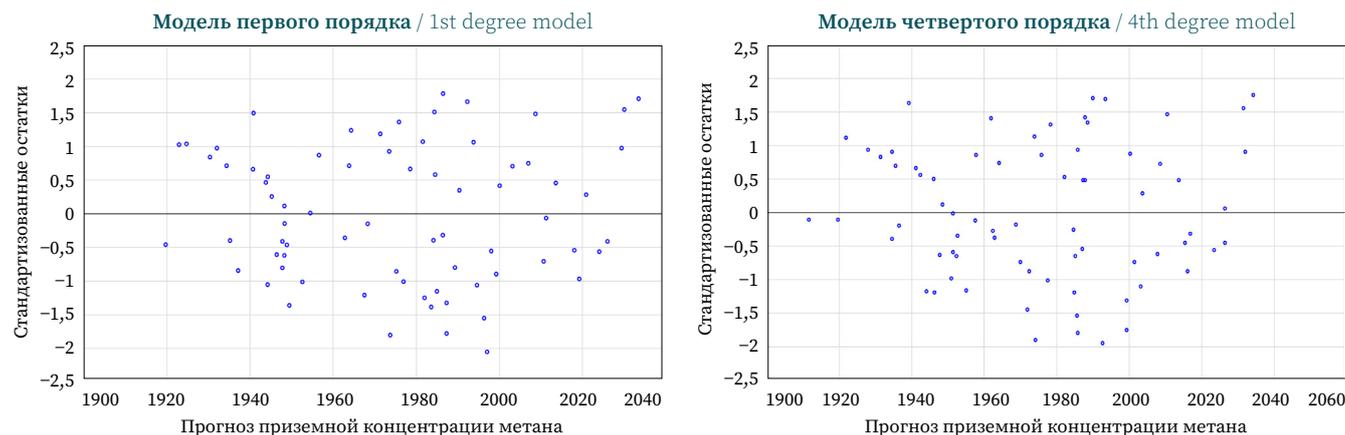
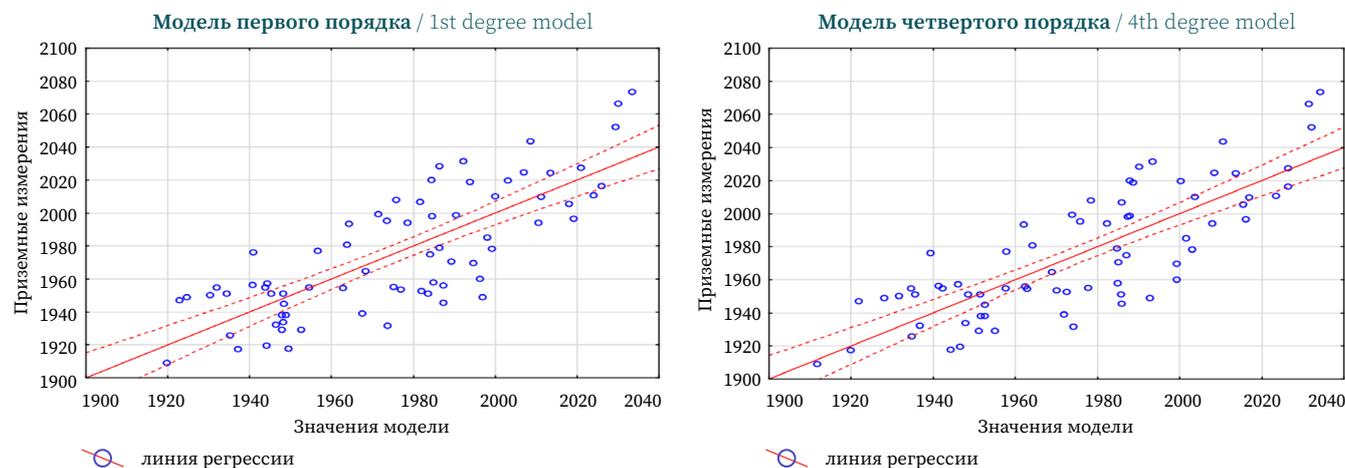


Рис. 6 

Графики сопоставления приземных измерений концентрации CH_4 и значений моделей первого и четвертого порядка

Fig. 6

Scatter plots between ground-level CH_4 measurements and values of 1st and 4th degree models, consequently



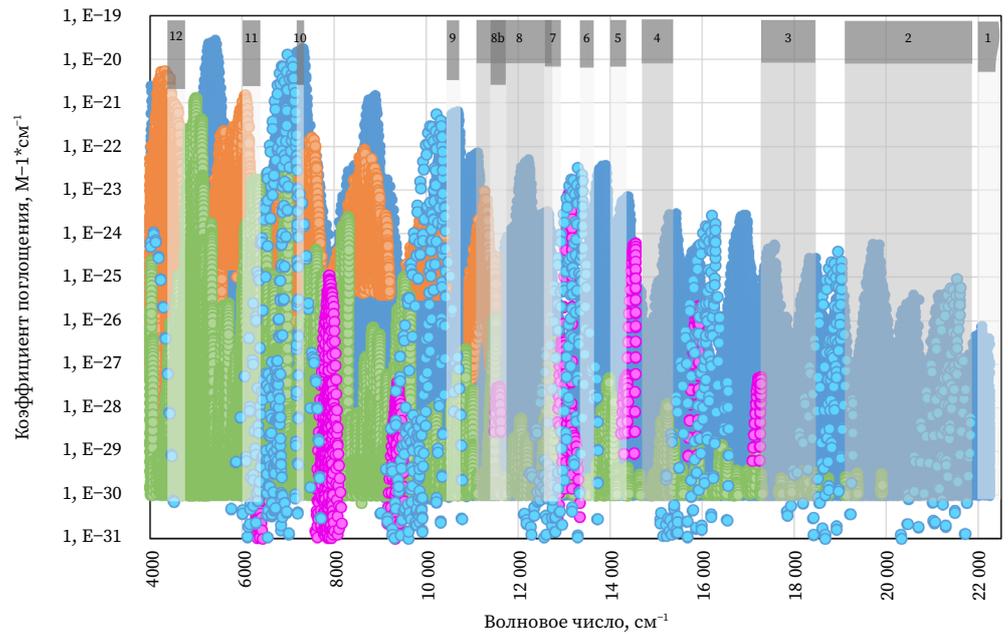
4 Обсуждение

Рис. 7  Соответствие спектральных характеристик каналов Sentinel-2 MSI и атмосферных газов [13]

Fig. 7 Matching of spectral characteristics of Sentinel-2 channels and atmospheric components [13]

Условные обозначения

- H₂O
- CH₄
- CO₂
- O₂
- OH



Для объяснения полученных результатов был составлен график, показывающий соответствие спектральных характеристик атмосферных газов и каналов Sentinel-2 MSI (рис. 7)³ [13].

Согласно данным в табл. 2, в наибольшей степени с приземной концентрацией метана коррелируют данные коротковолнового инфракрасного диапазона, начиная от 5-го канала. На рис. 7 видно, что в коротковолновом и ближнем инфракрасном диапазонах (до 14 500 см⁻¹) коэффициенты поглощения излучения различными газовыми составляющими атмосферы больше, чем в видимом. В диапазоне 5-го канала также находится слабая линия поглощения кислорода. В предыдущих исследованиях наибольший коэффициент корреляции наблюдался между данными о приземной концентрации метана и уровнем серого в 11-м и 12-м каналах, однако для летнего периода, согласно табл. 2, схожая тенденция не наблюдается [10].

В результате очистки из выборки летнего периода были исключены 2 наблюдения. Таким образом, сокращение количества наблюдений составило не более 3 % от изначального объема выборки.

Из рис. 7, формул (3) и (4) видно, что скорость ветра напрямую определяет снос масс метана в приземном слое атмосферы, а подобранные индексы могут описывать процессы, влияющие на концентрацию метана в приземной слое атмосферы. Можно представить параметры X1 и X3 формул (3) и (4) в виде выражений (5) и (6), где каждый канал — это сумма средних для его диапазона коэффициентов поглощения различных газовых составляющих, приведенных на рис. 7.

Тогда индекс 4 / (2 + 10) можно выразить следующей формулой:

5 

$$\frac{8 \times 10^{-27} H_2O + 1 \times 10^{-29} CO_2 + 4 \times 10^{-30} OH}{1 \times 10^{-22} H_2O + 4 \times 10^{-28} CO_2 + 2 \times 10^{-24} OH + 2 \times 10^{-24} CH_4},$$

а индекс (8 – 9) / (7 + 11) — как

6 

$$\frac{-3 \times 10^{-24} H_2O - 5 \times 10^{-30} CO_2 - 5 \times 10^{-26} OH + 2 \times 10^{-25} CH_4}{1 \times 10^{-27} H_2O + 1 \times 10^{-25} CO_2 + 1 \times 10^{-25} OH + 6 \times 10^{-24} CH_4 + 7 \times 10^{-28} O_2}.$$

Из формулы (5) следует, что и в числителе, и в знаменателе дроби присутствуют коэффициенты поглощения H₂O, CO₂ и OH, однако в знаменателе есть

³ Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (дата обращения: 03.02.2025).

коэффициент поглощения излучения метаном. Таким образом, в данном индексе варьирование концентраций пара и гидроксил-радикала не будет приводить к значимому изменению индекса, в то время как увеличение или уменьшение концентрации CH_4 будет обратно пропорционально влиять на значение индекса X_1 .

Из формулы (6) следует, что и в числителе, и в знаменателе есть одинаковые газовые составляющие, но с одним отличием: в знаменателе также присутствует коэффициент поглощения излучения кислородом. Следует отметить, что кислород при его фотохимических превращениях вместе с водяным паром в атмосфере приводит к образованию гидроксил-радикала OH — главного элемента, вызывающего сток метана из атмосферы.

Можно предположить, что разработанные для летнего сезона модели описывают примерно те же явления, что и модели, ранее разработанные для зимнего сезона, в которых также учитывается концентрация O_2 благодаря наличию линии его поглощения в диапазоне 5-го канала и оценивается изменение концентрации CH_4 благодаря включению в модель данных 11-го и 12-го каналов [10].

Бета-коэффициенты модели первого порядка по модулю незначительно отличаются от коэффициентов модели четвертого порядка: и в том и в другом случае бета-коэффициент переменной X_1 в три раза превышает остальные. Это может быть обусловлено тем, что увеличение концентрации CH_4 напрямую влияет на уменьшение значения фактора X_1 .

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что при увеличении параметра скорости ветра от первого порядка к четвертому нормированный R^2 увеличивается с 0,6 до 0,63. F -статистика также увеличивается, и стандартная ошибка модели уменьшается с 24 до 23 ppb. Из этого следует, что модель первого порядка незначительно хуже отображает связи между переменными и приземной концентрацией метана, чем модель четвертого порядка.

При рассмотрении рис. 3–5 видно, что в модели первого порядка остатки более схожи с нормальным распределением, в сравнении с моделью четвертого порядка, что может быть обусловлено неустойчивостью модели при увеличении порядка метеопараметра.

Чтобы определить релевантность разработанных моделей для прогноза концентраций метана в летний период, необходимо провести апробацию данных моделей на контрольной выборке суточных наблюдений, не использованных для построения регрессии, например по данным других станций мониторинга приземной концентрации метана.

5 Выводы

Разработаны две нелинейные регрессионные статистические модели оценки приземной концентрации метана по данным Sentinel-2 MSI и скорости ветра в летний период (учитывающие отношения между 2, 4, 7, 8, 9, 10 и 11-м каналами спутника и скоростью ветра). Разработанные модели статистически значимы и позволяют оценить приземную концентрацию метана с погрешностью ± 23 ppb.

Результаты апробации ранее разработанных моделей на данных летней выборки показали, что модели, созданные для одного сезона, не применимы к данным другого сезона из-за различий в состоянии поверхности и атмосферных процессов: значения R^2 составили менее 0,5, а при использовании нелинейной модели были получены отрицательные значения приземной концентрации метана.

Разработанные статистические модели учитывают явления и процессы, характерные для летнего периода в окрестностях станции Тикси, однако параметры регрессионных моделей, подобранные для двух сезонов, описывают одни и те же явления, связанные с изменением концентрации метана и его стоком из атмосферы благодаря реакции с гидроксил-радикалом OH .

БЛАГОДАРНОСТИ Работа была выполнена в рамках государственного задания № FSFE-2023-0005 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Зеленова М.С., Гинзбург В.А., Максимова О.В. и др. Обзор действующих и планируемых систем спутникового мониторинга парниковых газов и возможности их применения для решения прикладных климатических задач // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2022. Т. 33, № 1-2. С. 108–130. DOI:10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.
 2. Успенский А.Б. Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 122–144. DOI:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.
 3. Jiang Y., Zhang L., Zhang X., et al. Methane Retrieval Algorithms Based on Satellite: A Review // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 4. P. 449. DOI:10.3390/atmos15040449.
 4. Jacob D.J., Varon D.J., Cusworth D.H., et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. Vol. 22. No. 14. P. 9617–9646. DOI:10.5194/acp-22-9617-2022.
 5. Koshelev D. First ground based FTIR-TCCON measurements of CO₂ in a European megacity: comparison with a rural site and validation of satellite measurements: dissertation. Paris, 2018. 129 p.
 6. Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А. и др. Анализ содержания CO₂ вблизи российских городов по спутниковым измерениям ОСО-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 7. С. 538–543. DOI:10.15372/AOO20200706.
 7. Schultz M., Akimoto H., Bottenheim J., et al. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network // Elementa: Science of the Anthropocene. 2015. Vol. 3. P. 000067. DOI:10.12952/journal.elementa.000067.
 8. Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., et al. Evaluation of the methane full-physics retrieval applied to TROPOMI ocean sun glint measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2022. Vol. 15. No. 22. P. 6585–6603. DOI:10.5194/amt-15-6585-2022.
 9. Cooper J., Dubey L., Hawkes A. Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting // Environmental Science: Atmospheres. 2022. Vol. 2. P. 9–23. DOI:10.1039/D1EA00046B.
 10. Попов Н.В., Малинников В.А. Разработка статистических моделей оценки концентрации метана в приземном слое атмосферы по материалам космической съемки в зимний период // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 3. С. 77–85. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-3-77-85.
 11. Кочеткова Е.Д. Наблюдения за концентрацией парниковых газов в ГМО Тикси // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 г. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 506–510.
 12. Родионова Н.В. Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси // Исследование Земли из космоса. 2022. № 4. С. 3–11. DOI:10.31857/S0205961422040054.
 13. Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2022. Vol. 277. P. 107949. DOI:10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

АВТОРЫ **Попов Никита Владиславович**
 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
 (МИИГАиК), Москва, Россия
 кафедра космического мониторинга и экологии, факультет картографии
 0000-0000-2935-4390

Малинников Василий Александрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра космического мониторинга и экологии, факультет картографии

д-р техн. наук, профессор

 0000-0002-8663-755X

Нахутин Александр Ильич

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Москва, Россия

отдел мониторинга выбросов парниковых газов в энергетике и промышленности

канд. физ.-мат. наук

Поступила 06.02.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations in summer

Nikita V. Popov¹✉, Vasiliy A. Malinnikov¹, Alexandr I. Nakhutin²

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

✉ nikitappv02@gmail.com

CITATION Popov NV, Malinnikov VA, Nakhutin AI. Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations in summer. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 30–44. DOI:10.30533/GiA-2025-028.

KEYWORDS methane, satellite, Sentinel-2, greenhouse gases, monitoring, observations, concentrations, Tiksi, Arctic summer season

ABSTRACT This work is a continuation of previous studies on the relation between surface methane concentration with meteorological parameters and data on gray tone in 12 spectral bands of Sentinel-2 in the vicinity of Tiksi station. Almost similar analysis was carried out using a sample of daily observations and satellite imagery in summer months for the period from 2016 until 2022 year. It is shown that the regression models, calculated using sample of data for winter period are not applicable to predict surface methane concentration in summer months: determination coefficient for all models was less than 0,5, application of nonlinear models resulted in negative methane concentration. Regression analysis revealed a relation of Sentinel-2 spectral bands, or indices which inclusion together with wind speed in single statistical model caused the highest increase of determination coefficient. Two regression models were developed to evaluate surface methane concentration, which include relations between 2, 4, 7, 8, 9, 10 and 11 Sentinel-2 MSI bands and data on wind speed. After comparison of given MSI spectral bands with absorption lines of atmospheric gas components, it was found, that developed models for summer period are describing same effects as models for winter period: methane concentrations variability in atmosphere and sink of methane due to its reaction with hydroxyl radical OH.

ACKNOWLEDGEMENTS The work was performed within the framework of the state assignment No. FSFE-2023-0005 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

- REFERENCES**
- Zelenova MS, Ginzburg VA, Maksimova OV, et al. Obzor dejstvujushhijh i planiruemyh sistem sputnikovogo monitoringa parnikovyh gazov i vozmozhnosti ih primeneniya dlja reshenija prikladnyh klimaticheskikh zadach [Review of operating and planned satellite greenhouse gas monitoring systems and possibilities for their application in solving applied climate problems]. *Eco monitoring and ecosystems modelling*. 2022;33(1-2): 108–130. (In Russian). DOI:10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.
 - Uspenskij AB. Izmereniya raspredeleniya sodержaniya parnikovyh gazov v atmosfere so sputnikov [Satellite-based measurements of greenhouse gases in atmosphere]. *Fundamental and applied climatology*. 2022;8(1): 122–144. (In Russian). DOI:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.
 - Jiang Y, Zhang L, Zhang X, et al. Methane Retrieval Algorithms Based on Satellite: A Review. *Atmosphere*. 2024;15(4): 449. DOI:10.3390/atmos15040449.
 - Jacob DJ, Varon DJ, Cusworth DH, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22(14): 9617–9646. DOI:10.5194/acp-22-9617-2022.
 - Koshelev D. First ground based FTIR-TCCON measurements of CO₂ in a European megacity: comparison with a rural site and validation of satellite measurements [dissertation]. Paris; 2018. 129 p.
 - Nikitenko AA, Timofeev JuM, Berezin IA, et al. Analiz sodержaniya CO₂ vblizi rossijskikh gorodov po sputnikovym izmerenijam OCO-2 [Analysis of CO₂ content near Russian cities using satellite measurements of OCO-2]. *Atmosphere and Ocean Optics*. 2020;33(7): 538–543. (In Russian). DOI:10.15372/AOO20200706.
 - Schultz M, Akimoto H, Bottenheim J, et al. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2015;3: 000067. DOI:10.12952/journal.elementa.000067.
 - Lorente A, Borsdorff T, Martinez-Velarte MC, et al. Evaluation of the methane full-physics retrieval applied to TROPOMI ocean sun glint measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022;15(22): 6585–6603. DOI:10.5194/amt-15-6585-2022.
 - Cooper J, Dubey L, Hawkes A. Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting. *Environmental Science: Atmospheres*. 2022;2: 9–23. DOI:10.1039/D1EA00046B.
 - Popov NV, Malinnikov VA. Razrabotka statisticheskikh modelej otsenki kontsentratsii metana v prizemnom sloe atmosfery po materialam kosmicheskoy s"emki v zimnij period [Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations]. *Vestnik SSUGT*. 2025;30(3): 77–85. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-3-77-85.
 - Kochetkova ED. CO₂ greenhouse gas concentration observations at hydrometeorological observatory (HMO) Tiksi. *Proceedings of the All-Russia research-to-practic conference "Hydrometeorology and atmospheric physics: achievements and development trends", St. Petersburg, March 21–23, 2023*. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Education Institution; 2023: 506–510. (In Russian).
 - Rodionova NV. Korrelyatsiya nazemnykh i sputnikovyx izmerenij kontsentratsii metana v prizemnom sloe atmosfery v rajone Tiksi [Correlation of ground and satellite-based estimates of methane concentration in ground level of atmosphere]. *Earth Research from Space*. 2022;4: 3–11. (In Russian). DOI:10.31857/S0205961422040054.
 - Gordon IE, Rothman LS, Hargreaves RJ, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022;277: 107949. DOI:10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

AUTHORS **Nikita V. Popov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography
 0000-0000-2935-4390

Vasiliy A. Malinnikov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography
Dr. of Sci. (Engineering), Professor
 0000-0002-8663-755X

Alexandr I. Nakhutin

Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia
Department of Monitoring Greenhouse Gas Emissions in Industry and Energetics
PhD in Physics and Mathematics

Submitted: February 06, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.