УДК 528.71:551.510.5 DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-77-85

Разработка статистических моделей оценки концентрации метана в приземном слое атмосферы по материалам космической съемки в зимний период

Н. В. Попов¹[∞], В. А. Малинников²

¹ Институт глобального климата и экологии имени академика Юрия Антониевича Израэля, г. Москва, Российская Федерация ² Московский государственный университет геодезии и картографии,

г. Москва, Российская Федерация

e-mail: nikitappv02@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется связь спектрозональных данных Sentinel 2 MSI с концентрацией метана в приземном слое атмосферы и значениями метеопараметров атмосферы, измеренных на наземной станции Тикси за период с 2016 по 2022 г. Показано наличие корреляции приземной концентрации метана и метеопараметров со значением уровня серого тона зональных космических изображений станции Тикси для зимнего периода. Построены регрессионные соотношения, связывающие значения уровня серого тона зональных космических изображений с приземной концентрацией метана. Рассмотрено влияние сезонного фактора на корреляцию спутниковых данных и приземных измерений концентрации метана.

Ключевые слова: Sentinel 2, метан, коэффициент корреляции Пирсона, спутники, парниковые газы, мониторинг, системы наблюдений, концентрации, метеостанция Тикси

Для цитирования:

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

Введение

Согласно выполненным исследованиям, оценки выбросов парниковых газов, полученные по данным спутников, могут быть в 1,5 раза больше расчетных значений выбросов [1].

Метан (СН4) является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере Земли [2]. Существующие методики оценки выбросов СН4 в атмосфере по данным мультиспектральных сенсоров и физического моделирования переноса излучения в атмосфере требуют использования сложных физических моделей, основанных на интерпретации большого количества наземных данных [3]. Исследования [4–6] показали, что для определения концентрации СН4 в атмосферном воздухе возможно использовать данные сенсора MSI, установленного на борту Sentinel-2. Авторы упомянутых исследований используют трудоемкий метод соотнесения данных физического моделирования переноса излучения в атмосфере с данными сенсора. В то же время существует возможность разработки статистических моделей, учитывающих зависимость данных спутникового сенсора и метеопараметров от концентрации метана, которые могли бы упросить вычислительный процесс и дополнить результаты физических моделей.

Было обнаружено, что существует положительная корреляция между данными космической съемки и приземной концентрацией СН4, которая имеет сильную сезонную зависимость [7]. Можно сделать предположение, что данные MSI по-разному зависят от приземной концентрации метана в зависимости от зимнего или летнего периода. В ходе работ по мониторингу атмосферного метана, проводившихся как на станциях, так и со спутников, был сделан вывод, что в зимние месяцы наблюдение экстремально высоких концентраций метана за короткие периоды времени может быть обусловлено привнесением антропогенных эмиссий [8]. Также для арктических территорий характерен минимум значений приземной концентрации СН4 в мае-июне, а максимум – в августе-сентябре. Это связано с тем, что на протяжении зимних месяцев неактивны естественные источники метана, а также значительно снижается слой перемешивания в атмосфере, и происходят температурные инверсии [7–11].

В статье проводилось исследование зависимости данных MSI и метеопараметров от приземной концентрации метана в зимний период, так как наличие атмосферного блокирования и снежного покрова обуславливает слабое перемешивание газов в атмосфере и высокую отражающую способность поверхности без ее значительных вариаций.

Учитывая вышесказанное, целью статьи стала разработка статистической модели оценки приземной концентрации метана по данным сенсора MSI для зимнего периода.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи: сбор базы данных выборки суточных наблюдений приземной концентрации CH4 и метеопараметров, их обработка и подготовка к статистическому анализу; корреляционный анализ экспериментальных данных и построение регрессионных моделей.

Методы

В исследовании были использованы данные полярной станции Тикси за период с 2016 г. по 9 апреля 2022 г., полученные с помощью газоанализатора Picarro [12]. Данные Тикси отобраны с целью изучения возможности оценки приземной концентрации метана в Арктике, где имеют место процессы дегазации вечной мерзлоты [1]. Массив данных, полученных со станции Тикси, содержит информацию о значениях концентрации метана, направления и скорости ветра, давления, относительной влажности и температуры. Значения метеопараметров и концентрации метана приводятся в разных временных диапазонах: осредненные за час, день и месяц. Авторами для последующей статистической обработки отбирался массив данных среднесуточных значений. Его обработка выполнялась в несколько этапов: удаление пропусков и ошибочных значений, выделяемых как числа –999 или –99 в массиве в зависимости от параметров; перерасчет парциального давления водяного пара и поиск и удаление кратковременных всплесков концентрации СН4, нехарактерных для зимнего сезона в Тикси. Расчет парциального давления водяного пара производился по формуле [13]

$$e'_{w}(p,t) = \left(\frac{h}{100}\right) \cdot \left(1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0,074 \cdot p^{-1}\right) \cdot \left(6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \times t}{243,12 + t}}\right),\tag{1}$$

где $e'_w(p,t)$ и р – парциальное давление водяного пара и атмосферное давление соответственно, гПа; t – температура, °C; h – относительная влажность, %.

Удаление всплесков концентрации метана производилось по среднечасовым значениям всего временного ряда приземной концентрации СН4 по двум критериям: отклонение средних за час значений от среднемесячных более чем на 3 стандартных отклонения; отклонение средних за час значений от уровня межгодового тренда более чем на 5% [14]. За указанный период на территорию Тикси были отобраны снимки со спутников Sentinel 2A/B в 12 зональных каналах без атмосферной коррекции с целью исключения возможного искажения исходных данных. Обработка спутниковых снимков заключалась в исключении материалов, полученных в облачные дни из анализа, а также в извлечении значений уровней серого в точке измерения приземной концентрации метана, и средних значений уровня серого по территории радиусом 6, 12 и 18 пикселей вокруг точки приземных измерений с целью исключения влияния отблесков и шума.

После подбора данных космической съемки и метеостанции они подвергались анализу на экстремальные значения, которые определялись по диаграммам «с усами». Суточные наблюдения, значения уровня серого или скорости ветра которых выпадали за пределы интерквантильного размаха, удалялись из выборки.

Выявление параметров, наиболее коррелирующих с концентрацией метана, проводилось в несколько шагов: строились таблицы парных коэффициентов корреляции и графиков рассеяния между данными об уровне серого в 12 каналах Sentinel 2 MSI и данными о приземной концентрации CH4; по полученным таблицам отбирались наиболее коррелирующие с CH4 измерения в зональных каналах сенсора, которые использовались в регрессионном анализе вместе со всеми метеопараметрами.

Регрессионный анализ проводился с помощью инструмента «Пошаговое построение модели» в статистической программе Tibco Statistica 13.0.5.17.

1. В инструмент программы импортировалась подготовленная выборка наблюдений концентрации метана и объясняющих факторов.

2. Подбиралось выражение, наилучшим образом описывающее линейную взаимосвязь между приземной концентрацией СН4, уровнем серого и метеопараметрами. Критерии качества, или приемлемости рассчитанной модели, были следующие: коэффициент достоверности аппроксимации, нормированный на количество факторов в модели, или норм. R² больше 0,5; наибольшее соотношение норм. R² к R²; не превышение всеми факторами модели р-значения 0,05 при 95-процентном доверительном интервале и наименьшее возможное значение стандартной ошибки при учете ранее упомянутых критериев [15]. В модели также анализировались бета-коэффициенты [15].

3. Для рассчитанной модели проводился анализ графиков К-К остатков и стандартных остатков. По значительным отклонениям на графике К-К остатков от прямой линии делалось предположение о нелинейности взаимосвязи и проводился соответствующий регрессионный анализ. 4. Для проведения нелинейного регрессионного анализа использовался инструмент «метод отклика поверхности» ранее упомянутой программы: в данном инструменте существует возможность включать в модель нелинейные факторы второго, третьего и четвертого порядков, а также все их возможные комбинации. На основе ранее подобранных факторов линейной модели с помощью вышеописанного инструмента был составлен перечень всех их нелинейных вариантов и комбинаций.

5. Полученные комбинации использовались для повтора шагов 1 и 2. На выходе после шага 5 получалась наилучшая нелинейная регрессионная модель.

6. Проводился анализ выбросов в двух регрессионных моделях по условию: если для наблюдения «у» в линейной модели стандартный остаток по модулю близок к 1,9, а в нелинейной его значение стало больше, то наблюдение удалялось из выборки с допущением, что оно не подвержено той же тенденции, что и остальной набор данных. Очистка от наблюдений проводилась в две итерации: после каждой итерации проводился перерасчет моделей и их стандартных остатков.

7. Проводился перерасчет коэффициентов полученных регрессионных моделей по очищенной выборке, что приводило к улучшению их качества.

Результаты

Из архивных ежедневных данных метеостанции Тикси и спутниковых изображений была собрана выборка из 103 суточных наблюдений метеопараметров, приземной концентрации метана и уровня серого космических изображений. Исходными факторами выборки, которые использовались в дальнейшем анализе, являлись: уровень серого в 12 каналах Sentinel 2 MSI в точке приземных измерений на станции и осредненный по территории вокруг нее, направление и скорость ветра, относительная влажность, температура, давление, и парциальное давление пара.

Анализ исходного временного ряда концентраций метана выявил 4 даты с наличием всплесков метана, которые были удалены из выборки. График суточных значений концентраций метана и всплесков приведен на рис. 1. Также из указанной выборки было удалено наблюдение с экстремально высокой среднесуточной скоростью ветра более 13 м/с. Таким образом, после очистки экспериментальных данных для статистического анализа была подготовлена выборка, состоящая из 98 суточных наблюдений.



Рис. 1. График всплесков концентраций метана в Тикси в зимний период

В табл. 1 приведены парные коэффициенты корреляции Пирсона между осредненными данными об уровне серого и приземной концентрацией CH₄ (ESA Standard Document (Sentinel-2 User Handbook) // Explore Copernicus satellite missions - Sentinel Online (официальный сайт миссий Sentinel Европейского Космического Агентства) – URL: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook – Текст: электронный).

Таблица 1

| | СН4 ежеднев- ная | Среднее ка- нал 1 | Среднее ка- нал 2 | Среднее ка- нал 3 | Среднее ка- нал 4 | Среднее ка- нал 5 | Среднее ка- нал 6 |
|----------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Диапазон | | Ультраголубой | | Видимый | | Ближний ИК | |
| Диапазон в нм | | 433–453 | 457,5-522,5 | 542,5–577,5 | 650–680 | 697,5–712,5 | 732,5–747,5 |
| СН4 ежедневная | 1,000 | 0,098 | 0,118 | 0,108 | 0,188 | -0,172 | 0,256 |
| | | Среднее ка- нал 7 | Среднее ка- нал 8 | Среднее ка- нал 9 | Среднее ка- нал 10 | Среднее ка- нал 11 | Среднее ка- нал 12 |
| Диапазон | | Ближний ИК | | Коротковолновой ИК | | | |
| Диапазон в нм | | 773–793 | 855-875 | 935–955 | 1360-1390 | 1565-1655 | 2100-2280 |
| СН ₄ ежедневная | | 0,292 | 0,322 | 0,387 | 0,515 | 0,656 | 0,675 |

Коэффициенты корреляции Пирсона между осредненными данными об уровне серого и приземной концентрацией метана и характеристики каналов MSI

По матрице графиков рассеяния между данными 12 канала MSI и приземной концентрацией метана было удалено одно сильно отстоящее от остальных наблюдение.

В результате выполнения шага 6 регрессионного анализа были удалены 3 наблюдения, приведенные на рис. 2.



Рис. 2. Результаты выполнения шага 6 регрессионного анализа: в выносках через точку с запятой указывается номер наблюдения и его стандартный остаток

Были разработаны две модели: одна – линейная и другая – нелинейная четвертого порядка с учетом комбинаций факторов линейной модели и данных об уровне серого 11-го канала: было сделано допущение, что в линейной модели данные отдельно взятого 12-го канала лучше коррелируют с концентрацией метана, чем 11-го канала, в то время как в нелинейной модели взаимодействие 11-го и 12-го каналов как одного фактора будет иметь гораздо большее влияние на итоговый коэффициент детерминации нелинейной регрессионной модели.

Рассчитанная линейная и нелинейная регрессионные модели описываются формулами соответственно:

$$C_{\rm CH_4} = 2561,026 + 0,0265x1 - 0,00216x2 - 0,5926x3 - 5,9381x4;$$
(2)

$$C_{\rm CH_4} = 1956,784 + 0,121 \left(\frac{x5}{x3}\right) - 3,75 \cdot 10^{-13} \left(x5 \cdot x2 \cdot x3 \cdot x4\right) - 1,06 \cdot 10^{-7} \left(x5 \cdot x3\right) - 1,36 \cdot 10^{-4} \left(x2 \cdot x4^2\right), \quad (3)$$

Таблица 3

где x1 и x2 – уровень серого, осредненный по территории радиусом 12 пикселей вокруг точки измерения CH4 на космическом изображении, полученный в 12-м и 5-м каналах MSI соответственно, б/р (коэффициент отражения); x3 и x4 – атмосферное давление и парциальное давление пара соответственно, гПа; x5 – произведение значений уровня серого, осредненного по территории радиусом 12 пикселей вокруг точки измерения метана на космическом изображении, полученного в 11-м и 12-м каналах Sentinel-2 MSI, б/р (коэффициент отражения).

Характеристики параметров и качества рассчитанных регрессионных моделей приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Характеристика параметров рассчитанных регрессионных моделей

| Пара- метры | Бета- коэф- фици- енты | Стандарт- ная ошибка | t-стати- стика | Р-значе- ние | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|--|--|--|--|
| Линейная модель | | | | | | | | |
| Нулевой член | | 204,9604 | 12,49522 | 2,76.10-21 | | | | |
| <i>x</i> 1 | 0,613 | 0,00342 | 7,739694 | $1,48 \cdot 10^{-11}$ | | | | |
| <i>x</i> 2 | -0,285 | 0,000519 | -4,1619 | 7,27.10-5 | | | | |
| <i>x</i> 3 | -0,202 | 0,201159 | -2,946 | 0,004108 | | | | |
| <i>x</i> 4 | -0,321 | 1,598328 | -3,71522 | 0,000354 | | | | |
| Нелинейная модель | | | | | | | | |
| Нулевой член | | 3,294 | 594,083 | 6,26.10-162 | | | | |
| x5/x3 | 8,393 | 3,02.10-2 | 4,002 | 1,30.10-4 | | | | |
| $x5 \cdot x2 \cdot x3 \cdot \cdot x4$ | -0,296 | 9,28.10-14 | -4,041 | 1,13.10-4 | | | | |
| x5·x3 | -7,630 | 2,91.10-8 | -3,646 | 4,48.10-4 | | | | |
| $x2 \cdot x4^2$ | -0,175 | 5,70.10-5 | -2,389 | 1,90.10-2 | | | | |

Характеристики качества рассчитанных регрессионных моделей

| Параметры/регрессионные модели: | Линейная | Нелинейная |
|---------------------------------|------------|-----------------------|
| Множественный R | 0,803 | 0,835 |
| R-квадрат | 0,644 | 0,698 |
| Нормированный R-квадрат | 0,629 | 0,684 |
| Стандартная ошибка | 16,127 | 14,870 |
| Критерий Фишера (F) | 40,335 | 51,361 |
| Критическое (F) | 3,06.10-19 | $2,42 \cdot 10^{-22}$ |

Графики К-К остатков и рассеяния разработанных моделей приведены на рис. 2 и 4. Анализ графиков стандартных остатков моделей приведен на рис. 3.



Рис. 2. Графики К-К остатков: *а*) линейной модели; *б*) нелинейной



Рис. 3. График стандартных остатков: *a*) линейной модели; *б*) нелинейной



Рис. 4. Графики рассеяния между модельными и приземными значениями концентрации CH₄: *a*) линейной модели; *б*) нелинейной

Обсуждение

Удаление отдельных суточных наблюдений обосновано естественными причинами и производилось с применением статистических методов. В результате очистки и регрессионного анализа выборка уменьшилась с 103 до 94 наблюдений.

Из табл. 1 видно, что в наибольшей степени с приземной концентрацией СН4 коррелируют данные коротковолнового ИК-диапазона. Вышеописанное явление может быть обусловлено тем, что в зимний период в видимом диапазоне не происходит каких-либо явных изменений в связи с наличием снежного покрова, в то время как в коротковолновом ИК-диапазоне на уровень серого влияют изменения метеопараметров и концентраций различных составляющих атмосферы. Наибольший коэффициент корреляции Пирсона наблюдается между приземной концентрацией метана и уровнем серого в 11-м и 12-м каналах.

Из табл. 2 видно, что положительный знак бета-коэффициента среди всех моделей наблюдается только у факторов x1 и x5 формул (2) и (3), в то время как остальные факторы обратно пропорциональны концентрации метана. Это может быть обусловлено тем, что зимой параметр давления и уровень серого в 5-м канале связаны с прозрачностью атмосферы.

Бета-коэффициенты линейной модели варьируют по модулю значительно меньше, чем коэффициенты нелинейной модели (см. табл. 2): в линейной модели бета-коэффициент фактора x1 превышает аналогичные для других более чем в 1,5 раза, но в нелинейной модели бета-коэффициенты для взаимодействия двух факторов x5 и x3 превышают остальные коэффициенты более чем в 30 раз. Данное явление может быть обусловлено тем, что взаимодействие данных 11-го и 12-го каналов вместе с давлением более точно отображает изменение концентрации метана в условиях непрозрачной атмосферы, чем другие факторы, в том числе и линейной модели. Также в нелинейной модели р-значение нулевого члена на порядки меньше, чем в линейной.

Из табл. 3 видно, что при переходе от линейной модели к нелинейной нормированный R² увеличивается с 0,63 до 0,69; F-статистика также увеличивается и стандартная ошибка модели уменьшается с 16 до 15 ppb, из чего следует, что линейная модель хуже отображает связи между метеопараметрами, данными сенсора и приземной концентрацией метана в условиях станции Тикси, чем нелинейная.

Из рис. 2, 3, и 4 видно, что в нелинейной модели остатки меньше отклоняются от линии нормального распределения, чем в линейной, и сплоченность точек на рис. 3 и 4 увеличивается, что также говорит в пользу предыдущего вывода.

Заключение

Разработаны линейная и нелинейная регрессионные статистические модели оценки приземной концентрации метана по материалам космической съемки и метеостанции в зимний период. Разработанные модели учитывают взаимосвязи между: уровнем серого в 11-м, 12-м и 5-м каналах спутника Sentinel-2, парциальным давлением водяного пара и атмосферным давлением. Статистические характеристики разработанных моделей позволяют оценить приземную концентрацию метана с большой достоверностью и погрешностью в 15 ppb.

Из-за того, что процессы, влияющие на концентрацию метана, зимой и летом существенно различаются, нельзя разработать единую модель для всех сезонов [7–10], поэтому предметом дальнейших исследований в данной работе является разработка статистической модели оценки приземной концентрации метана по материалам космической съемки в летний период.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rutherford, J. S., Sherwin, E. D., Ravikumar, A. P., Heath, G. A., Englander, J., Cooley, D., Lyon, D., Omara, M., Langfitt, Q., Brandt, A. R. (2021). Closing the methane gap in US oil and natural gas production emissions inventories // Nature communications. – 2021. – Vol. 12(1) No. 4715. – DOI 10.1038/s41467-021-25017-4.

2. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P, Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014. – 1419 pp.

3. Hu, H., Hasekamp, O., Butz, A., Galli, A., Landgraf, J., Aan de Brugh, J., Borsdorff, T., Scheepmaker, R., and Aben, I.: The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI // Atmospheric Measurement Techniques. – 2016. – Vol. 9, No. 11. – P. 5423–5440. – DOI 10.5194/amt-9-5423-2016. – EDN XTZHFP.

4. Jacob, D. J., Varon, D. J., Cusworth, D. H., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gautam, R., Guanter, L., Kelley, J., McKeever, J., Ott, L. E., Poulter, B., Qu, Z., Thorpe, A. K., Worden, J. R., and Duren, R. M.: 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. – EDN JTGQIX.

5. Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D., and Jacob, D. J.: High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations, // Atmospheric Measurement Techniques. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – P. 2771–2785. – DOI 10.5194/amt-14-2771-2021. – EDN NNJOCO.

6. Zhang, Z., Sherwin, E. D., Varon, D. J., and Brandt, A. R.: Detecting and quantifying methane emissions from oil and gas production: algorithm development with ground-truth calibration based on Sentinel-2 satellite imagery // Atmos. Meas. Tech. – Vol. 15. – Pp. 7155–7169. – DOI 10.5194/amt-15-7155-2022, 2022.

7. Родионова Н. В. Корреляция наземных и спутниковых значений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн : сб. материалов конференции. – 2022. – № 1. – С. 349–356.

8. Арабаджян Д. К., Парамонова Н. Н., Макарова М. В., Поберовский А. В. Анализ временной изменчивости концентраций метана в атмосфере по данным наземных наблюдений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. – 2015. – Т. 2 (60), № 3. – С. 204-215. – EDN UNNPEJ.

9. Семенов С. М., Говор И. Л., Уварова Н. Е. Роль метана в современном изменении климата. – М. : Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, 2018. – 106 с. – ISBN 978-5-9631-0687-7. – EDN TZBKQY.

10. Виноградова А. А., Гинзбург А. С., Губанова Д. П. Изменчивость концентрации метана в приземном воздухе Москвы на разных временных масштабах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 205–217. – DOI 10.31857/S0002351522020110. – EDN TLTOXB.

11. Ивахов В. М., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Зинченко А. В. Анализ данных непрерывных наблюдений атмосферной концентрации метана на арктической станции Тикси с 2010 по 2015 гг. // Труды главной геофизической лаборатории им. А. И. Воейкова. – 2016. – № 582. – С. 261–280.

12. Tuomas Laurila (FMI), Ed Dlugokencky (NOAA), Viktor Ivakhov (MGO), Juha Hatakka (FMI), Atmospheric CH4 at Tiksi by Finnish Meteorological Institute, dataset published as CH4_TIK_surfaceinsitu_FMI_data1 at WDCGG, ver.2022-07-08-2150. – DOI 10.50849/WDCGG_0025-2002-1002-01-01-9999 (reference date: 2024/07/09).

13. World Meteorological Organization Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008 edition updated 2010. Geneva, Switzerland, WMO, 716pp. (WMO No. 8). – 2012. – DOI 10.25607/OBP-1528.

14. Стародубцев В. С., Соловьёв В. С. Особенности вариаций метана на арктическом побережье в летне-осенний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18, № 6. – С. 253–264. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-6-253-264. – EDN ZXSCSJ.

15. Джордж Грекукис. Методы и практика пространственного анализа / пер. с англ. А. Н. Киселева. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 540 с.

Об авторах

Никита Владиславович Попов – научный сотрудник отдела мониторинга выбросов парниковых газов в энергетике и промышленности.

Василий Александрович Малинников – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой космического мониторинга и экологии.

Получено 25.12.2024

© Н. В. Попов, В. А. Малинников, 2025

Development of statistical models for methane concentration evaluation in ground layer of atmosphere on the base of space imagery data in winter period

N. V. Popov¹, V. A. Malinnikov²

¹ Yu. A. Israel Global Climate and Ecology Institute, Moscow, Russian Federation ² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: nikitappv02@gmail.com

Abstract. In the work, the relation between Sentinel-2 MSI multispectral data with surface methane and meteorological observations, made for period on the Tiksi station for period from 2016 until 2022. Correlation between surface methane concertation and meteorological observations with gray level of multispectral Tiksi imagery is shown. For the case of strong correlation, observed between variables in winter period, regression relations between gray level of zonal space imagery and surface methane concentrations were constructed. Seasonal factor influence on correlation coefficient were analyzed.

Keywords: Sentinel 2, methane, Pearson correlation coefficient, satellite, greenhouse gases, monitoring, observations, concentrations, Tiksi

REFERENCE

1. Rutherford, J. S., Sherwin, E. D., Ravikumar, A. P. *et al.* Closing the methane gap in US oil and natural gas production emissions inventories. *Nat Commun* 12, 4715 (2021) DOI 10.1038/s41467-021-25017-4.

2. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P, Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York*, NY, USA; 1419 pp.

3. Hu, H., Hasekamp, O., Butz, A., Galli, A., Landgraf, J., Aan de Brugh, J., Borsdorff, T., Scheepmaker, R., and Aben, I.: The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5423–5440, DOI 10.5194/amt-9-5423-2016. EDN XTZHFP.

4. Jacob, D. J., Varon, D. J., Cusworth, D. H., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gautam, R., Guanter, L., Kelley, J., McKeever, J., Ott, L. E., Poulter, B., Qu, Z., Thorpe, A. K., Worden, J. R., and Duren, R. M. (2022).: Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources

using satellite observations of atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9617–9646, DOI 10.5194/acp-22-9617-2022. EDN JTGQIX.

5. Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D., and Jacob, D. J. (2021). High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 2771–2785, https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021, DOI 10.5194/amt-14-2771-2021. EDN NNJOCO.

6. Zhang, Z., Sherwin, E. D., Varon, D. J., and Brandt, A. R. (2022). Detecting and quantifying methane emissions from oil and gas production: algorithm development with ground-truth calibration based on Sentinel-2 satellite imagery, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 7155–7169, DOI 10.5194/amt-15-7155-2022, 2022.

7. Rodionova N. V. (2022) Correlation of ground and sattelite-based estimates of methane concentration in ground level of atmosphere. In Vserossijskie otkrytye Armandovskie chtenija: Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija, radiolokacii, rasprostranenija i difrakcii voln [All-Russia open Armandov Readings: Modern problems of remote sensing, radiolocation, wave propagation and diffraction] № 1. P. 349–356 [in Russian].

8. Årabadzhjan D. K., Paramonova N. N., Makarova M. V., Poberovskij A. V. (2015) Analisys of temporal variablity of methane concentration on the base of ground. *In Vestnik SPBGU.[Bulletin of St. Petersburg State University]*. Ser. 4. V. 2 (60). №3 EDN UNNPEJ [in Russian].

9. Semenov S. M., Govor I. L. & Uvarova N. E. (2018) *Rol' metana v sovremennom izmenenii klimata [The methane role in modern climate change]*. Moscow ISBN 978-5-9631-0687-7. EDN TZBKQY [in Russian].

10. Vinogradova A. A., Ginzburg A. S., Gubanova D. P. (2022) Methane concentration variability in Moscow ground level atmosphere on different time scales. In Izvestija RAN. *Fizika atmosfery i okeana [Izvestia RAS: Atmospheric and Ocean Physics]* V 58, №2, p. 205-217 DOI 10.31857/S0002351522020110. – EDN TLTOXB [in Russian].

11. Ivahov V. M., ParamonovaN. N., Privalov V. I., Zinchenko A. V. (2016) Analysis of continous atmosphere methane concentration measurements on station Tiksi from 2010 to 2015 y. *Trudy* glavnoj geofizicheskoj laboratorii im. A.I. Voejkova [Proceedings of the Main Geophysical Laboratory named affter A.I. Voyeykov] № 582. P. 261–280 [in Russian].

12. Tuomas Laurila (FMI), Ed Dlugokencky (NOAÅ), Viktor Ivakhov (MGO), Juha Hatakka (FMI), Atmospheric CH4 at Tiksi by Finnish Meteorological Institute, dataset published as CH4_TIK_surfaceinsitu_FMI_data1 at WDCGG, ver.2022-07-08-2150, DOI 10.50849/WDCGG_0025-2002-1002-01-01-9999 (reference date: 2024/07/09).

13. World Meteorological Organization (2012) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008 edition updated 2010. *Geneva, Switzerland, WMO*, 716 pp. (WMO No. 8), DOI 10.25607/OBP-1528.

14. S. Starodubcev, V.S. Solov'jov (2021) Peculiarities of methan concentraion variability on the Arctic coastline at summer-autumn period. *In Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing Earth from space]* Vol. 18. No 6. P. 253–264.

15. George G. (2021) Metody i praktika prostranstvennogo analiza [Spatial Analysis Methods and Practice: Describe – Explore – Explain through GIS] (A.N. Kiseljova, trans). Moscow: DMK Press [in Russian].

Author details

Nikita V. Popov – Research Assistant of the Department of Energy and Industry Greenhouse Gas Emissions Monitoring.

Vasilii A. Malinnikov – D. Sc., Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology.

Received 25.12.2024

© N. V. Popov, V. A. Malinnikov, 2025