

**“Групповая работа “ГЛОБАЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
ВЫБРОСОВ МЕТАНА”**

Проект

Направление “*Спутникостроение и геоинформационные технологии*”

Участники:

ученик 10 «А» класса ГБОУ Школа
№ 1583 Ануфриев Артём Дмитриевич

ученик 10 «А» класса ГБОУ Школа
№ 1583 Казаков Тимофей Андреевич

Москва, 2024

Оглавление

Введение.....	
Методика выполнения работы, место и сроки выполнения работы.....	
Результаты и обсуждение.....	
Выводы.....	
Список используемой литературы.....	

Введение

Процессы глобального потепления вызывают озабоченность международной общественности. В значительной мере эти процессы связаны с так называемым парниковым эффектом, который отвечает за повышение температуры в нижних слоях атмосферы. Это создаёт такие проблемы как таяние ледников, увеличение частоты стихийных бедствий, влияние на климат в регионах, что может сокращать объём выращиваемых сельскохозяйственных культур, а также ведет к вымиранию некоторых видов животных и растений.

Метан относится к газам, которые в наибольшей степени отвечают за парниковый эффект и, тем самым, за процесс глобального потепления. Его способность удерживать тепло в атмосфере в 28-36 раз выше, чем у углекислого газа (CO_2). Это означает, что метан вносит значительный вклад в усиление парникового эффекта, несмотря на его меньшую концентрацию в атмосфере по сравнению с CO_2 .

Концентрация метана в атмосфере измеряется в частях на миллиард (ppb). Это означает, что на каждый миллиард частей воздуха приходится определенное количество частей метана [1].

Концентрация метана в атмосфере растет. В последние годы наблюдается увеличение выбросов метана из различных источников, включая антропогенные и природные. Это связано с увеличением добычи угля, сжиганием биомассы, расширением нефтегазовой промышленности и другими факторами. На рисунке 1 представлена динамика изменения концентрации метана в атмосфере за последние годы [2]

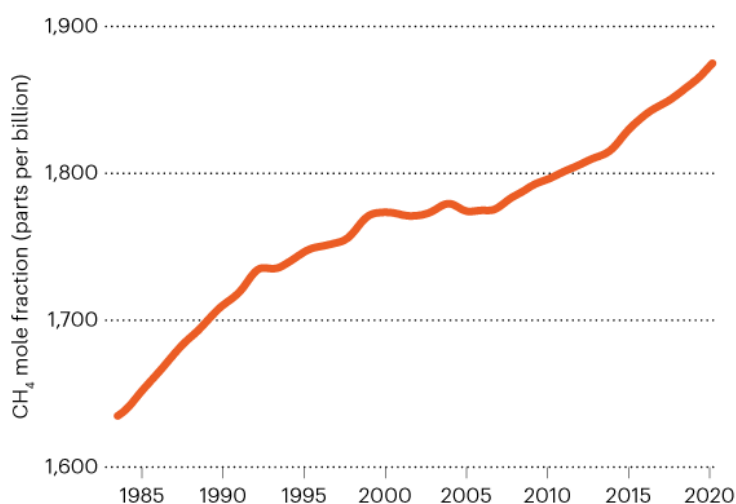


Рисунок1. Изменение концентрации метана в атмосфере за последние годы

Такой рост концентрации метана требует внимания и усилий для снижения выбросов. В мире в последнее время внедряются «зелёные» методы добычи и обработки ресурсов, позволяющие снизить выбросы этого газа в атмосферу.

Немаловажную роль в мониторинге выбросов метана играют орбитальные системы мониторинга земной атмосферы, позволяющие эффективно отслеживать его концентрацию в атмосфере Земли, а также оперативно выявлять места наиболее значительных выбросов. К преимуществам таких методов исследования также можно отнести высокую скорость получения данных и большую площадь исследования.

В настоящее время на орбите Земли функционирует ряд иностранных орбитальных систем, предназначенных для мониторинга выбросов метана.

Пионером таких систем следует считать семейство японских спутников GOSat/Ibuki 1 и 2 (Gases Observing Satellite), начавшее свою миссию в октябре 2008 года. В октябре 2017 года был выведен на орбиту спутник Европейского космического агентства Sentinel-5 Precursor.

Если ранее запуск таких аппаратов происходил достаточно редко, то в 2024 году на орбиту был выведен целый ряд спутников: американо-новозеландский MethaneSAT, американский Tanager-1, четыре аппарата канадской компании GHGsat, а также китайский аппарат Xiguang-1. Таким образом орбитальная группировка спутников дистанционного зондирования за рубежом постоянно наращивается.

Многие страны и сотрудничающие с ними международные организации наращивают меры, направленные на глобальный контроль за выбросами метана, в том числе, формирующимися за счёт антропогенной деятельности. С этой целью, например, Евросоюз принял нормативный акт, ограничивающий поставки нефти и газа из стран, где добыча этого сырья сопровождается значительными выбросами метана.

Ряд иностранных политиков и экспертов заявляют о недопустимом загрязнении Россией окружающей среды в процессе добычи углеводородов и других видов сырья, фактически лоббируя отказ от нефти и газа за счет замещения этих ресурсов американской и арабской продукцией. Ими делаются заявления, что фактические выбросы метана за счет деятельности российских компаний значительно превышают показатели, которые публикуют эти компании.

Тем самым создаются предпосылки для выдавливания российских нефтегазовых компаний с зарубежных рынков, снижения объемов поступления экспортной выручки и возникновения рисков для безопасности российской финансовой системы.

Отсутствие отечественной национальной системы всеобъемлющего мониторинга выбросов метана не позволяет дать аргументированные ответы на такие формирующиеся вызовы. Поэтому анализ принципов создания такой системы является важной государственной задачей и приоритетной для российской науки.

Как отмечается в обзорном научно-исследовательском отчете Института космических проблем РАН «Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли» [3], такая работа соответствует приоритетным направлениям национального проекта «Наука и университеты» в части климатических исследований, а именно, основным направлениям фундаментальных исследований, перечисленным в Программе фундаментальных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период 2021–2030 гг., утверждённой распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р. в части определения состава, структуры и динамики атмосферы, создания новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли по полям малых газовых составляющих.

Специалистами этого ведущего отраслевого отечественного института также указывается на необходимость создания технологии и системы спутникового мониторинга концентраций и потоков малых газовых составляющих атмосферы, в том числе — парниковых газов.

Президент Российской Федерации В.В.Путин в ходе состоявшегося 26 октября 2023 года совещания по вопросам развития космической отрасли поставил задачу расширить номенклатуру геоинформационных продуктов и технологий в области дистанционного зондирования Земли для более эффективного решения задач в области экологии и климата.

Однако до настоящего времени Россией не создана орбитальная группировка спутников, ни отдельные аппараты, осуществляющие количественный мониторинг выбросов парниковых газов. Регулярные и детальные работы по мониторингу выбросов метана с использованием иностранных источников информации также не проводятся.

Постановка задачи

В этой связи нами предпринята попытка самостоятельно оценить возможность импорта информации путем использования доступных сведений от операторов уже работающих иностранных аппаратов, построить на их основе карты наиболее заметных выбросов метана,

проверить справедливость заявлений о значительных выбросах метана на территории России, а также сформулировать основные концептуальные требования для создания национальной системы космического мониторинга парниковых газов.

Методика выполнения работы

Работа выполнялась в домашних условиях на протяжении второй половины 2024 года в свободное от школьных и дополнительных учебных занятий время.

Для анализа данных о выбросах метана нами была выбрана информация, получаемая со спутника Sentinel-5 Precursor (далее по тексту он обозначается как S5P), который оснащен точными приборами для измерения концентрации различных парниковых газов в атмосфере. Космический аппарат ежедневно обновляет данные по каждому участку планеты, что позволяет получать более подробную информацию о состоянии атмосферы на всей планете с высоким разрешением [4].

Информация о концентрации метана, полученная в результате анализа переданных этим спутником данных хранится в архивах Европейского космического агентства.

Орбита аппарата, вес которого около 820 кг, является гелиосинхронной - он проходит над любой точкой земной поверхности в приблизительно одно и то же местное солнечное время. При съемке спутник охватывает полосу шириной 2600 км, при разрешающей способности 7*7 км.

На спутнике установлен спектрометр Tropomi, который путем измерения поглощения отраженного от земной поверхности света на определенной частоте или длины волны в определенной части инфракрасного диапазона обеспечивает возможность точного мониторинга выбросов метана.

Зарегистрированные спектрометром показатели поглощения света молекулами метана непрерывно передаются в центр управления этим космическим аппаратом. Специалисты центра оценивают среднюю концентрацию метана от земной поверхности до орбиты аппарата в каждом пикселе с учетом альбедо (коэффициента отражающей поверхности земли, который будет разным для города, пашни, леса и т.п), а также температуры и давления вблизи земной поверхности, которые также оказывают влияние на колебания молекул метана и, следовательно, на их способность поглощать инфракрасную световую энергию.

Существенное значение также оказывает облачность. Специалисты центра считают достоверными сведения, полученные при прохождении аппаратов безоблачных участков. Для определения размеров облачности в каждой точке измерения используется американский метеорологический спутник Suomi-NPP, который движется по той же орбите, что и S5P, но несколькими минутами раньше него и передающий в наземный центр сбора и обработки информации сведения об облачности в каждом пикселе.

Специалисты этого центра на основании степени поглощения света, показателей облачности и атмосферных факторов вычисляют показатель концентрации метана в каждом пикселе. Достоверными считаются сведения, полученные при прохождении S5P над безоблачными регионами.

В планы нашей работы входил анализ выбросов метана за октябрь месяц 2022 – 2024 годов. В архивах Европейского космического агентства по интернет адресу <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/> содержалась обработанная вычислительным центром Агентства информация по каждому витку спутника. Доступ к этой информации можно было получить по гостевому входу (login: s5pguest, password s5pguest). С помощью программы менеджера закачек «Download Manager» было проведено скачивание этой информации за октябрь 2022 года. Информация в архивах агентства представлена отдельным файлом по каждому витку, причем за сутки аппарата совершает 14 витков вокруг Земли. Тем самым за октябрь 2022 года было скачан массив файлов, представленных в формате NetCDF (Network Common Data Form), поэтому для

их обработки необходимо специальное программное обеспечение и знание основ программирования.

Поиски в интернете показали, что под операционной системой Windows существует только одна программа, позволяющая извлечь данные – это программа «Panoply», разработанная входящим в структуру NASA американским институтом Годдарда (Goddard Institute for Space Studies), размещенная в сети Интернет по адресу <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>. Программа была установлена на ноутбук. При инсталляции программы потребовалась дополнительная установка пакета Java 9.

Формат представления информации в файлах Европейского космического агентства не позволяет конвертировать в единый файл все необходимые сведения – широту, долготу, время измерения, концентрацию метана и качество измерения. Эти показатели можно конвертировать в текстовые файлы только по отдельности в виде столбика значения каждого параметра (обычно около 900 тысяч значений каждого параметра на один виток).

Использование программы «Panoply» позволило открыть файл, относящийся к каждой орбите спутника за каждые сутки. Файл содержал информацию о каждой точке измерения: широта, долгота, время измерения по Гринвичу, концентрация метана и показатель качества измерения, под которым понимается степень облачности в точке измерения. Структура файла формата NetCDF организована специалистами Европейского космического агентства таким способом, что экспортировать из нее необходимые показатели оказалось возможным только по одному показателю в отдельный текстовый файл. Время необходимое для импорта в текстовый файл искомым показателей за одни сутки занимает около 15 минут.

Далее для сведения этих пяти файлов в единую таблицу применялся программный пакет Microsoft Visual FoxPro v.9, оптимизированный для работы с большими объемами данных и содержащий достаточно простой встроенный язык программирования, похожий на Python. Для получения сведенной информации по каждому витку, то есть для сведения необходимых текстовых файлов в один файл формата DBF, была разработана программа «vvod.prg», создающая пустой файл этого для каждого витка и построчно добавляющая в него сведения из каждого текстового файла, которые содержат длинные (примерно 900 тысяч строк) колонки чисел.

В первую строчку таблицы файла DBF добавлялось первое значение (первую строчку) из текстового файла, содержащего широту, первую строчку из файла с долготой, первую строчку из файла с концентрацией метана, первую строчку из файла времени измерения и первую строчку из файла со значениями качества измерений. Затем таким же образом добавлялись вторые строчки, третьи и так далее. Программа контролирует количество введенных значений каждого параметра и выдает сообщение об ошибке, если количество введенных показателей отличается хоть на единицу от количества других показателей. Затем файлы всех витков каких-либо суток сливались в один файл, содержащий информацию обо всех показателях за сутки. Процедура сведения всех показателей за одни сутки в единый файл занимает около 3 минут.

*Program Vvod

*Строки, начинающиеся со звездочки – комментарии, не оказывающие влияния на выполнение программ

CLEAR all

CLOSE all

clear

SET TALK off

SET SAFETY off

*С клавиатуры вводится номера витков, с какого и до какого включительно нужно объединять данные

i0=1

i1=14

@5,5 say "введите номер начального витка" get i0

READ

@7,5 say "введите номер конечного витка" get i1

READ

CLEAR

ttt1=TIME()

*Создаются файлы сводных данных по каждому витку и по суткам

CREATE dbf vitok (nomer n(2,0),timer c(30), line c(4), pixel c(4), latitude n(15,9), longitude n(15,9),
metan n(15,9), qa n(15,9))

CREATE dbf daily (nomer n(2,0),timer c(30), line c(4), pixel c(4), latitude n(15,9), longitude n(15,9),
metan n(15,9), qa n(15,9))

? "Ввод и объединение данных"

FOR ii=i0 TO i1

*Создание временного файла для широты и перенос в него строк из текстового файла

CLOSE all

CREATE dbf lati (f1 c(20), line c(4), pixel c(4), latitude c(25), xl n(15,9))

SELECT 1

USE lati.dbf

fail_1= ALLTRIM(STR(ii))+ "_latitude.txt"

APPEND FROM &fail_1 DELIMITED WITH tab

replace ALL xl WITH VAL(latitude)

n_lat=RECCOUNT()

*Создание временного файла для долготы и перенос в него строк из текстового файла

CREATE dbf lon (f1 c(20), line c(4), pixel c(4), longitude c(25), yl n(15,9))

USE lon.dbf

fail_2= ALLTRIM(STR(ii))+ "_longitude.txt"

APPEND FROM &fail_2 DELIMITED WITH tab

replace ALL yl WITH VAL(longitude)

n_lon=RECCOUNT()

*Создание временного файла для широты и перенос в него строк из текстового файла

CREATE dbf metan (f1 c(20), line c(4), pixel c(4), metan c(25), vybros n(15,9))

USE metan.dbf

fail_3= ALLTRIM(STR(ii))+ "_methane_mixing_ratio_bias_corrected.txt"

APPEND FROM &fail_3 DELIMITED WITH tab

replace ALL vybros WITH VAL(metan)

n_met=RECCOUNT()

*Вывод на экран количества введенных показателей широты, долготы и концентрации метана

? "Виток ",ii, " Latitude ",n_lat, " Longitude ", n_lon, " Концентрация ", n_met

*Создание временного файла для времени измерения и перенос в него строк из *текстового файла

CREATE dbf T (f1 c(20), line c(4), timer c(30))

USE t.dbf

fail_4= ALLTRIM(STR(ii))+ "_time_utc.txt"

APPEND FROM &fail_4 DELIMITED WITH tab

*Создание временного файла для качества измерения и перенос в него строк из текстового *файла

CREATE dbf q (f1 c(20), line c(4), pixel c(4), qa n(15,9))

use q.dbf

fail_5= ALLTRIM(STR(ii))+ "_qa_value.txt"

APPEND FROM &fail_5 DELIMITED WITH tab

*Перенос данных широты в общий файл для витка

SELECT 1

USE lati

SELECT 2

```

USE vitok
DELETE ALL
PACK
APPEND FROM lati
SELECT 1
CLOSE table
DELETE FILE lati.dbf
*Перенос данных долготы в общий файл для витка
SELECT 2
USE vitok
GO top
UPDATE vitok SET vitok.longitude=val(lon.longitude) from vitok inner join lon on
vitok.line=lon.line AND vitok.pixel=lon.pixel
SELECT 1
CLOSE table
DELETE FILE lon.dbf
*Перенос данных по метану в общий файл для витка
SELECT 2
USE vitok
GO top
UPDATE vitok SET vitok.metan= VAL(metan.metan) from vitok inner join metan on
vitok.line=metan.line AND vitok.pixel=metan.pixel
SELECT 1
CLOSE table
DELETE FILE metan.dbf
*Перенос данных по качеству измерений в общий файл для витка
SELECT 2
USE vitok
GO top
UPDATE vitok SET vitok.qa=q.qa from vitok inner join q on vitok.line=q.line AND
vitok.pixel=q.pixel
SELECT 1
CLOSE table
DELETE FILE q.dbf
*Перенос данных по времени измерений в общий файл для витка
SELECT 1
USE t
GO 2
m.t=timer
SELECT 2
USE vitok
UPDATE vitok SET vitok.timer=t.timer from vitok inner join t on vitok.line=t.line
replace ALL nomer WITH ii
SET FILTER TO metan=0
DELETE ALL
PACK
SET FILTER TO
*Сведение файлов о каждом витке в общий файл ежесуточной информации
SELECT 3
USE daily
APPEND from vitok
SELECT 2

```

```

DELETE ALL
pack
ENDFOR
*Уничтожение всех временных файлов
SELECT 1
CLOSE table
DELETE FILE t.dbf
SELECT 2
CLOSE table
DELETE FILE vitok.dbf

*Создание ежесуточного файла, название которого содержит дату измерений      SELECT 1
use daily
fajlo=LEFT(m.t,10)+".dbf"
fajlo1=LEFT(m.t,10)
copy to &fajlo
SELECT 1
USE &fajlo

*Уничтожение в ежесуточном файле всех данных с качеством измерения меньше единицы
delete for qa<1
pack
DELETE FILE daily.dbf
clear

ttt2=TIME()
Вывод на экран времени формирования ежесуточной информации
? "Время начала обработки", ttt1
? "Время завершения обработки", ttt2
WAIT
close all
DELETE FILE daily.dbf
DELETE FILE short.dbf
CLEAR
CLOSE all
RETURN

```

В результате вышеуказанной обработки информации у нас получилась таблица, содержащая три основных параметра: долготу, широту и концентрацию метана в точке измерения с этими координатами.

Если первоначальные сведения по каждому витку составляли около 900 тысяч измерений, то после удаления непригодных для анализа измерений, а также измерений с показателем качества менее единицы, подходящих для анализа показателей оставалось от 400 до 800 тысяч, в зависимости от состояния облачности в регионах планеты. Ежесуточные данные могут быть объединены в общий файл за месяц.

Большинство исследователей метеоинформации на основе данных о каком-либо атмосферном показателе предпочитают строить т.н. «тепловые карты». Мы приняли иное решение – сделать наглядной информацию, показывающую только места наиболее крупных выбросов метана.

Для этой цели была разработана программа «world_map.prg», в которой задается уровень отсекаемых менее значительных выбросов. Иными словами, программа высчитывает среднюю концентрацию метана в эти сутки на планете, выводит это значение на экран и мы сами задаем уровень отображаемый на карте концентрации, который, например, на 10 или 20 процентов

превышает средний. Места с такой концентрацией рисуются программой на карте Земли. В интернете была найдена и скачана карта Земли «map_kontour.bmp» в разрешении 10800 на 5400 пикселей объемов 233 мегабайта, выполненная в равнопромежуточной проекции, которая сохраняет один и тот же масштаб как по широте, так и по долготе [5].

В пакете графических библиотек программы Visual FoxPro [6] подразумевается, что верхний левый пиксель рисунка имеет номер 0 как по оси X, так и по оси Y. На карте это соответствует широте +90 град и долготе -180 град. Программа пересчитывает фактические координаты в пиксельные и рисует окружность с центром в этой точке. Причем чем больше концентрация метана, тем больше радиус нарисованной окружности.

*Program «World_map.prg»

CLEAR

CLOSE all

set talk off

set safety off

set confirm off

*Загрузка графических библиотек и задание условий

SET CLASSLIB TO vfpgdiplus

lcFile = "map_kontur.bmp"

x_pixel=10800

y_pixel=5400

loGP = CREATEOBJECT("gdipimages")

llStatus = loGP.CreateBitmap(x_pixel,y_pixel)

llStatus = loGP.CreateTextureBrush(lcFile, 1)

llStatus = loGP.FillRectangle(0,0,x_pixel,y_pixel)

llStatus = loGP.CreatePen(1, 0xFF000088)

llStatus = loGP.DrawLine(1, 1, x_pixel-1, 1)

llStatus = loGP.DrawLine(1, y_pixel-1, x_pixel-1, y_pixel-1)

llStatus = loGP.DrawLine(x_pixel-1, 1, x_pixel-1, y_pixel-1)

llStatus = loGP.DrawLine(1, 1, 1, y_pixel-1)

llStatus = loGP.DrawLine(1, (y_pixel-1)/2, x_pixel, (y_pixel-1)/2)

llStatus = loGP.DrawLine((x_pixel-1)/2, 1, (x_pixel-1)/2, (y_pixel-1))

loGP.SetPenColor(0xFFAA0000) && Тёмно-красный цвет

loGP.SetPenWidth(5) && Толщина - 1 пиксел

*f1=getfile("dbf")

select 1

Вместо слова «ФАЙЛ» подставляется наименование обрабатываемого файла

use ФАЙЛ

*Вычисляется среднее значение концентрации метана на планете и *осуществляется ввод пользователем порогового значения. Оставшиеся *после фильтрации координаты *рисуются на карте. Кроме этого они и *значения концентрации копируются в файл *электронной таблицы Excel.

average(metan) to porog

@5,5 say "введите порог концентрации" get porog

READ

SET FILTER TO metan>porog

EXPORT TO world TYPE xls

GO top

DO WHILE NOT EOF()

x1=(Longitude+180)*X_pixel/360

y1=(-latitude+90)*y_pixel/180

```

diameter=10*((metan-porog)/250)*x_pixel/400
llStatus = loGP.DrawEllipse(x1,y1,diameter)
SKIP
ENDDO
SET FILTER TO
llStatus = loGP.SaveToFile("World.jpg")
CLEAR
CLOSE all
Return

```

После того, как из архива Европейского космического агентства были скачаны все необходимые файлы за октябрь 2022 года, было начато скачивание файлов за этот месяц 2023 и 2024 годов. Однако с середины октября 2024 года использованный нами сайт <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/> был закрыт и все данные из него были перенесены в другой архив по адресу <https://dataspace.copernicus.eu>. На этом сайте нет гостевого входа требуется персональная регистрация по адресу электронной почты и IP-Адресу. После тридцати дней пользования этим сайтом, услуга становится платной и требует подписки. Российский адрес электронной почты для регистрации не принимается, так как в списке стран, пользователем которых разрешен доступ к информации, наша страна отсутствует.

Нами был получен пробный доступ, действующий в течение одного месяца, получить удалось, но медленный прокси-сервер позволил скачать данные о 14 орбитах только одного дня текущего года – 20 октября. Эти данные по каждой орбите были обработаны по вышеописанному алгоритму.

Поиски альтернативных вариантов получения информации привели на сайт <https://maps.s5p-pal.com/ch4/>, содержащий среднемесячные и среднегодовые «тепловые карты» распределения концентрации метана на планете. Как отмечается на этом сайте, создание тепловых карт по заказу Европейского космического агентства делает нидерландская корпорация «S&T», которая регулярно выкладывает все среднесуточные значения координат концентрации метана на сайте <https://radianteearth.github.io/stac-browser/#/external/data-portal.s5p-pal.com/api/s5p-l3/ch4>. Так как Sentinel-5P над каждой точкой планеты пролетает один раз в сутки, то среднесуточные значения являются фактическими.

Корпорация «S&T» также представляет данные в формате NetCDF, однако в этом случае программа «Panoply» сразу экспортирует все три нужных показателя (широта, долгота, концентрация) показателя в один текстовый файл длиной около 33,5 млн строк. Перевести этот файл в формат DBF уже не составляет труда с помощью написанной нами миниатюрной программы «vvod1.prg», которая создает файл формата dbf и построчно заносит в него показатели долготы, широты и концентрации. Затем программа удаляет все значения с нулевой концентрацией метана.

```

*Program Vvod1.prg
CLEAR
CREATE dbf 20_10(noname c(5), latitude n(16,9), longitude n(16,9), metan n(10,2))
use 20_10
append from 20_10.txt delimited with tab
delete for metan=0
PACK
CLOSE all
Return

```

Таким образом, на выходе мы снова получаем файл, пригодный для рисования уровня высоких концентраций на глобальной карте. Тем самым нам на легальном уровне удалось обойти наложенный на российских пользователей запрет использования информации

Полученные результаты

Нами было проведено сравнение двух результатов за 20 октября 2024 года, полученных как непосредственно из обработки всех орбитальных данных за этот день, так и сводных от компании «S&T». Сравнение двух карт показало их полное совпадение. Это является очевидным, так аппарат S5P регистрирует данные о каждой точке планеты один раз в сутки и показатели, заявленные «S&T» в качестве среднесуточных, фактически являются реальными. Тем самым мы сочли допустимым использовать для производства карт выбросов данные «S&T» для построения карт за октябрь 2023 и 2024 годов.

В результате обработки данных по каждому витку за октябрь 2022 года и среднесуточным данным за октябрь 2023 и 2024 годов, с помощью созданных нами программ построены карты, на которых выделены места наиболее крупных выбросов, которые примерно на 10 процентов превышают средний уровень выбросов метана на планете.

Полученные нами средние по планете значения концентрации метана представлены в таблице 1. По оценкам специалистов «S&T» погрешность проведенных специалистами Европейского космического агентства измерений концентрации метана примерно составляет $2 \cdot 10^{-9}$ ppb, т.е. около 0,1 процента.

Таблица 1. Рассчитанная средняя концентрация метана в атмосфере планеты за отдельные месяцы 2022 – 2024 годов

Месяц года	Средняя концентрация метана в атмосфере, 10^{-9} ppb
Октябрь 2022 года	1885
Октябрь 2023 года	1877
Октябрь 2024 года	1893

Эти данные о глобальной средней концентрации метана по планете фактически совпадают с результатами других исследователей.

На представленных ниже рисунках красными окружностями отображены места, в которых в октябре соответствующего года концентрация метана превысила уровень в $2100 \cdot 10^{-9}$ ppb.

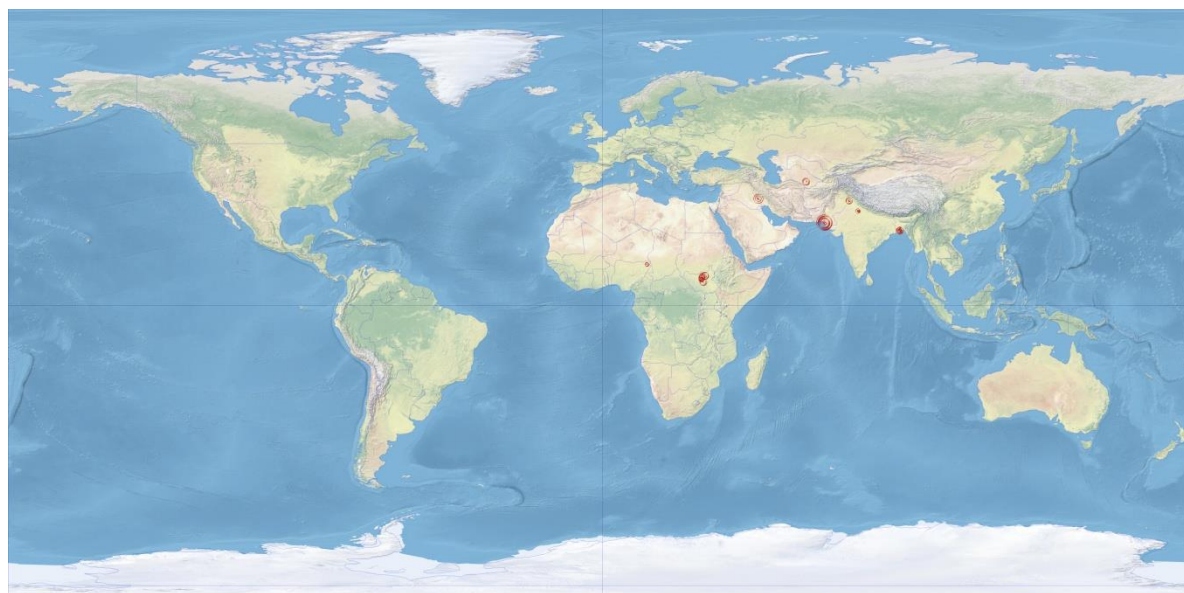


Рисунок 2. Октябрь 2022 года. Регионы с концентрацией метана, превышающей $2100 \cdot 10^{-9}$ ppb

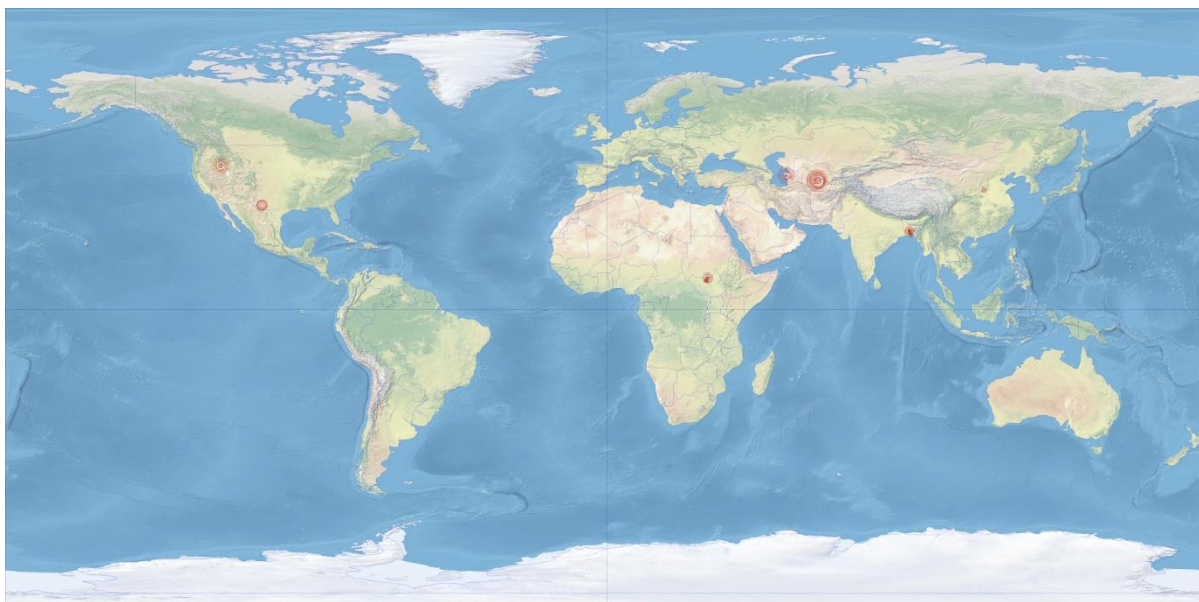


Рисунок 3. Октябрь 2023 года. Регионы с концентрацией метана, превышающей $2100 \cdot 10^{-9}$ ppb

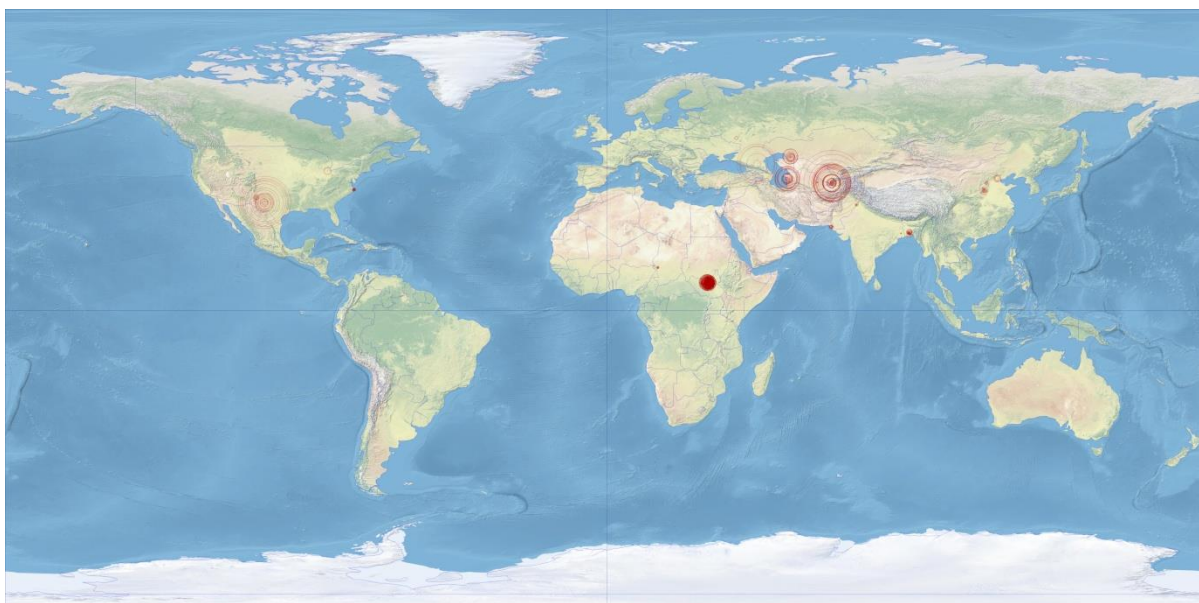


Рисунок 4. Октябрь 2024 года. Регионы с концентрацией метана, превышающей $2100 \cdot 10^{-9}$ ppb

Полученные результаты координат крупных выбросов и концентраций метана за октябрь трех лет последних сведены в таблицу, из которой были отобраны двадцать мест с наиболее крупными выбросами и приведены иллюстрации с сайта Google Maps двух регионов с наибольшими концентрациями метана, причем произошедших в один и тот же день – 24 октября 2024 года. Сведения об этих двадцати местах приведены в таблице 2.

Таблица 2. Координаты мест с наибольшими концентрациями метана

Номер	Дата	Широта	Долгота	Концентрация	Примечание
-------	------	--------	---------	--------------	------------

1	24.10.24	37,9907	67,1704	2646	Узбекистан, месторождение «25 лет независимости»
2	24.10.24	32,2778	-102,4146	2534	США, западный Техас, нефтегазовое месторождение
3	29.10.24	43,7915	44,8462	2429	РФ, вблизи г. Моздок
4	02.10.23	38,5620	62,7319	2355	Туркменистан, центральная часть
5	10.10.24	39,3970	53,9429	2307	Каспийское побережье Туркменистана вблизи месторождения ENI SSP Oilfield
6	12.10.23	42,9126	-115,4224	2255	США, западный Техас, нефтегазовое месторождение
7	08.10.23	40,0122	53,5474	2245	Каспийское побережье Туркменистана вблизи г.Кара-Тенгир
8	28.10.24	8,2837	30,1245	2235	Южный Судан, верховье Нила, предположительно, болота
9	15.10.23	30,8276	49,5483	2234	Иран, промышленное предприятие в г. Табарех (Tabareh)
10	10.10.22	25,0870	67,1585	2231	Пакистан, северный пригород г. Карачи
11	08.10.24	45,9448	54,8218	2224	Казахстан, к востоку от побережья Каспийского моря
12	12.10.23	42,9126	-115,4663	2223	США, шт. Айдахо, вблизи г. Хамметт (Hammatt)
13	04.10.23	9,4263	30,0806	2188	Южный Судан, верховье Нила, предположительно, болота
14	19.10.23	52,2729	60,3149	2185	РФ, Челябинская область, вблизи г. Бреды на границе с Казахстаном
15	31.10.23	31,1792	-103,1177	2184	США, западный Техас, нефтегазовое месторождение
16	08.10.22	32,3199	47,1824	2178	Ирак, западный регион вблизи границы с Ираном
17	18.10.22	9,0199	31,0333	2161	Южный Судан, верховье Нила, предположительно, болота
18	12.10.22	37,4694	61,6025	2160	Туркменистан, вблизи г. Мары

19	01.10.22	7,0954	30,5149	2160	Южный Судан, верховье Нила, предположительно, болота
20	17.10.22	31,7038	74,6662	2157	Индия, г. Чогаван (Chogawan)

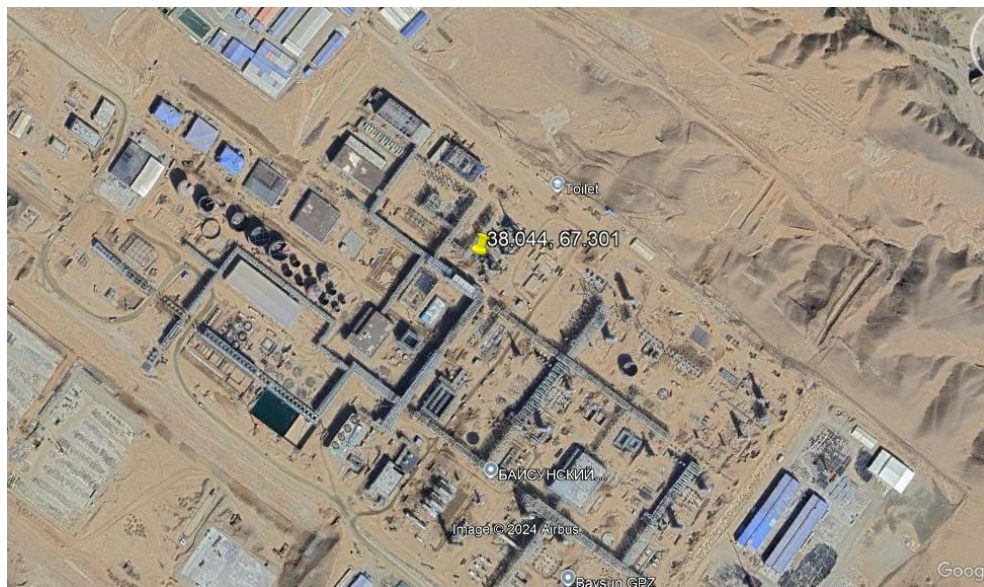


Рисунок 5. 24 октября 2024 года, Узбекистан, месторождение «25 лет независимости», широта 38.044, долгота 67.301, концентрация метана 2645 10⁻⁹ ppb



Рисунок 6. 24 октября 2024 года, Западный Техас (США), нефтегазовое месторождение, широта 32.278, долгота -102.414, концентрация метана 2534 10⁻⁹ ppb

Анализ сведений, приведенных в таблице показывает, что из 20 локаций с наибольшими концентрациями, лишь четыре (т.е. 20 процентов) можно уверенно идентифицировать как относящихся к естественным источникам метана. Остальные 16 локаций относятся либо к крупным нефтегазовым месторождениям, либо к городской среде азиатских стран. Иными

словами, преобладающий вклад в выбросы метана происходит за счет человеческой, т.е. антропогенной деятельности.

Интересно, что выброс метана в Узбекистане связан с одной из крупнейших техногенных катастроф в истории этой страны [7]. Авария на газовом месторождении «25 лет Независимости» в Байсунском районе Сурхандарьинской области стала одной из шести крупнейших техногенных аварий в истории Узбекистана, как заявил министр энергетики Журабек Мирзамахмудов. Сложность заключалась в том, что на месте аварии было высокое содержание сероводорода, что значительно усложнило работы. Этот газ разъедал оборудование, что приводило к утечкам. Для решения проблемы привлечены специалисты из Азербайджана и США. В случае если запланированные меры не сработают, то будут применяться другие варианты, которые продлятся 2-3 месяца.

Достаточно крупный выброс произошел в районе российского города Моздок, однако источник выброса нами не был определен.

Проведенный нами анализ информации показал, что в октябре 2024 года произошло несколько крупных выбросов на этом месторождении, которые отображены в таблице 3.

Таблица 3. Даты наиболее крупных выбросов метана на узбекском газовом месторождении «25 лет независимости» в октябре 2024 года

Дата	Концентрация, 10^{-9} ppb
2 октября	2232
9 октября	2486
14 октября	2119
17 октября	2405
18 октября	2137
20 октября	2250
24 октября	2646

Российские регионы не вносят столь же большого вклада в эмиссию метана, однако изучение карт выбросов с концентрациями, превышающими $2000 \cdot 10^{-9}$ ppb показало наличие заметного количества выбросов метана в районе Кузбасса (Кемеровская область) с концентрацией не более $2080 \cdot 10^{-9}$ ppb.

Для более детального изучения этого района была разработана программа kuzbass.prg, которая отбирает из глобальной картины выбросов только те, которые относятся к региону, ограниченному по долготе от 84 до 90 градусов и по широте от 52 до 57 градусов. Для отрисовки границ Кемеровской области использовались координаты точек границ региона (<https://gist.github.com/max107/6571147>), а для нанесения координат основных городов области – данные сайта <https://time-in.ru/coordinates/kemerovskaya-oblast>.

В ходе работы программы происходит начертание границ области, нанесение на рисунок городов и мест с концентрацией метана, превышающей $2000 \cdot 10^{-9}$ ppb

*Program kuzbass.prg

CLEAR

CLOSE all

SET CONFIRM OFF

SET SAFETY OFF

ON ERROR skip

*Загрузка графической библиотеки Visual FoxPro 9

SET CLASSLIB TO vfpgdiplus

x_pixel=5400

y_pixel=5400

loGP = CREATEOBJECT("gdipimages")

* Создаём растр и связанный с ним объект Graphics

```

llStatus = loGP.CreateBitmap(x_pixel,y_pixel)
* Создаём текстурированную кисть
*   llStatus = loGP.CreateTextureBrush(lcFile, 1)
* Заливаем растр рисунком, считанным из файла
*   llStatus = loGP.FillRectangle(0,0,x_pixel,y_pixel)
* Создаём перо толщиной 10 пиксель синего цвета
    llStatus = loGP.CreatePen(10,0xff0000dd)

*Загрузка файла border_kuzbass.dbf с координатами точек границы Кемеровской области и
рисование отрезков, соединяющих точки координат границ области
use border_kuzbass
GO top
x1=longitude
y1=latitude
SKIP
x2=longitude
y2=latitude
lfunc=granical(x1,y1,x2,y2)
x1=x2
y1=y2
i=1
do while .not. eof()
x2=longitude
y2=latitude
lfunc=granical(x1,y1,x2,y2)
x1=x2
y1=y2
skip
enddo

*Загрузка необходимых шрифтов для написания названий городов
lnBoldItalic = 0
lnUnderline = 0
llStatus = loGP.CreateSolidBrush(0xFF0000FF)
llStatus = loGP.CreateFont("Times New Roman", 128, lnBoldItalic + lnUnderline)
llStatus = loGP.CreatePen(4,0xff0000dd)

*Загрузка файла city_kuzbass.dbf с координатами городов Кемеровской области и рисование
окружностей, символизирующих эти городаUSE city_kuzbass
GO top
do while.not.eof()
    x=(longitude-84)*5400/6
    y=(57-latitude)*5400/5
    llStatus = loGP.DrawEllipse(x,y,100)
    llStatus = loGP.DrawString(x+75,y-50, 0, 0, city)
skip
enddo

*Определение цвета для рисования мест выбросов
    loGP.SetPenColor(0xFFAA0000) && Тёмно-красный цвет
    loGP.SetPenWidth() && Толщина - 1 пиксел

```

```

*Фильтрация из глобальной карты выбросов во временный файл tmp.dbf координат и величин
выбросов метана
f1=getfile("dbf")
use (f1)
set filter to longitude>84 and longitude<90 and latitude>52 and latitude<57
copy to tmp
use tmp
index on metan to 1 unique
use tmp index 1
average(metan) to porog
@5,5 say "введите порог концентрации" get porog
READ
    SET FILTER TO metan>porog
    EXPORT TO kuzbass TYPE xls
    GO top
*Рисование мест выбросов
    do while.not.eof()
        x=(longitude-84)*5400/6
        y=(57-latitude)*5400/5
        diametr=250*((metan-porog)/250)*x_pixel/400
        llStatus = loGP.DrawEllipse(x,y,diametr)
        skip
    enddo
SET FILTER TO
Status = loGP.SaveToFile("kuzbass.jpg")
*llStatus = loGP.SaveToFile("kuzbass.bmp")
close all
RETURN

FUNCTION granical(longitude1,latitude1,longitude2,latitude2)
xx1=(longitude1-84)*5400/6
yy1=(57-latitude1)*5400/5
xx2=(longitude2-84)*5400/6
yy2=(57-latitude2)*5400/5
llStatus = loGP.DrawLine(xx1,yy1,xx2,yy2)
RETURN .T.

```



Рисунок 7. Кузбасс, октябрь 2022 года, места выбросов метана с концентрацией более $2000 \cdot 10^{-9}$ ppb

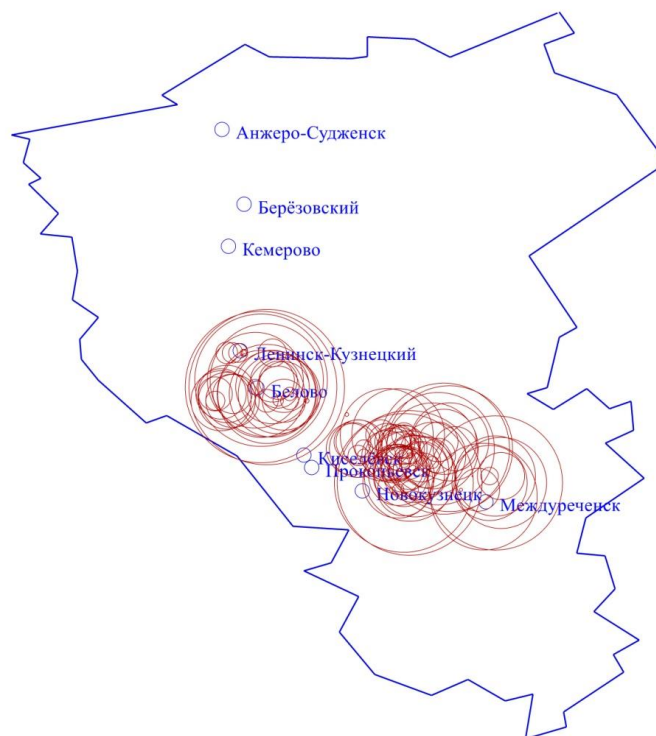


Рисунок 8. Кузбасс, октябрь 2023 года, места выбросов метана с концентрацией более $2000 \cdot 10^{-9}$ ppb

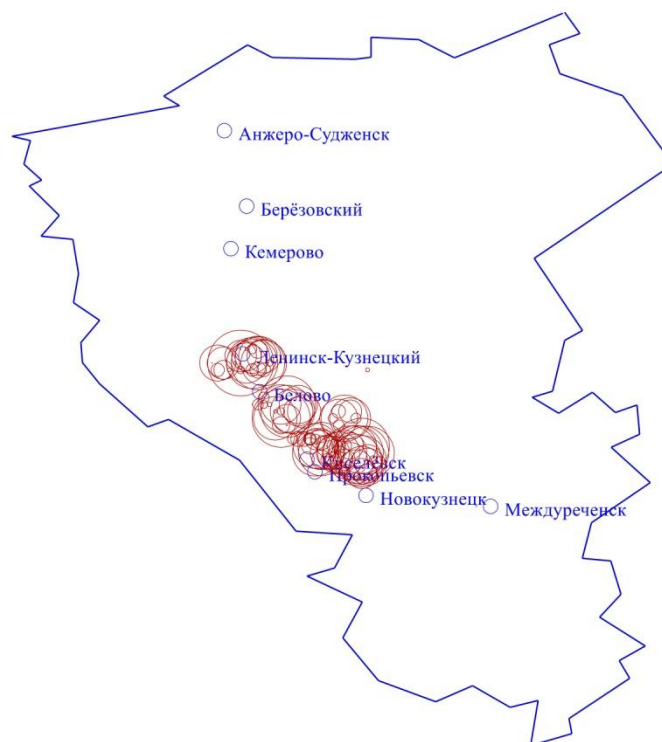


Рисунок 9. Кузбасс, октябрь 2022 года, места выбросов метана с концентрацией более $2000 \cdot 10^{-9}$ ppb

Анализ мест расположения выбросов в Кемеровской области показал, что все они относятся к Кузнецкому угольному бассейну, расположенному между городами Ленинск-Кузнецкий и Междуреченск.



Рисунок 10. Угольный разрез в Кузбассе. 7 октября 2023 года, зарегистрированная концентрация метана $2048 \cdot 10^{-9}$ ppb

Особенностью этого угольного бассейна является значительное количество метана в породах и трещинах угольной породы. Нами отмечено, что в Кузбассе выбросы метана при добыче угля

достигают 15,1 кубических метров на тонну угля. Поэтому достаточно регулярны случаи регионального увеличения концентрации метана, которые зарегистрированы космическим аппаратом Sentinel-5 Precursor.

Более подробный анализ выбросов за октябрь 2024 года показал, что наиболее крупные выбросы случилось 16, 17 и 18 октября 2024 года. На рисунке 11 показано, что эти выбросы заметно превышают как среднюю концентрацию метана по региону, так и размеры максимальных выбросов в другие дни месяца.

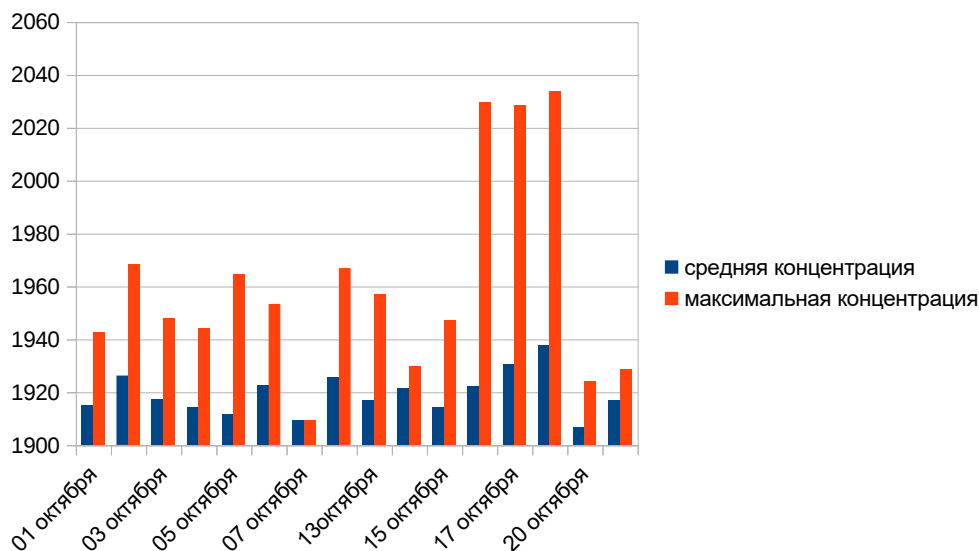


Рисунок 11. Средняя и максимальная концентрация метана в Кемеровской области в октябре 2024 года

Анализ доступных источников информации показал, что по информации Казахстанского центра сбора информации о землетрясениях [9] 15 октября в 16 час 15 минут по местному времени в Новокузнецком районе Кемеровской области произошло землетрясение магнитудой 4,0 единиц. Других землетрясений на территории Кемеровской области за октябрь 2024 года этим Центром зарегистрировано не было.

Так как аппарат S5P проходит над этой областью примерно в полдень по местному времени, он провел измерения 15 октября 2024 года раньше землетрясения и выбросы метана в этот день спутником не были зарегистрированы. Основные выбросы были зарегистрированы в последующие за землетрясением три дня.

Можно предположить, что землетрясение вызывало деформацию угольной породы с высвобождением из пор и трещин породы метана, выход которого на поверхность и был зарегистрирован спектрометром, расположенным на космическом аппарате.

Исходя из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что метод орбитального дистанционного измерения концентрации метана позволяет оперативно проводить анализ изменений, происходящих в атмосфере во времени и пространстве, выявлять техногенные аварии и катастрофы. А предложенная нами экономически выгодная методика получения информации вполне может без каких-либо изменений и дополнительных затрат использоваться на отечественных добывающих предприятиях, характеризующихся разветвленной и обширной сетью их объектов (шахты, трубопроводы).

Как нами было написано выше, задача разработки и внедрения национальной системы глобального мониторинга выбросов метана является приоритетной для российской науки. В настоящее время такая система в России практически отсутствует. По заявлению исполнительного директора Роскосмоса по перспективным программам и науке Александра Блошенко, его организация на данный момент ведет проекты по созданию спутниковых

группировок дистанционного зондирования Земли, которые помогут оценить углеродный отпечаток промышленности РФ и стран-соседей [10].

Проектирование «группировки спутников» вероятно означает, что Роскосмос считает вывод на орбиту ряда космических аппаратов, оснащенных спектроскопической аппаратурой вполне достаточным условием для создания национальной системы дистанционного зондирования парниковых газов.

Как нами отмечалось выше, орбитальный спектрометр регистрирует поглощение отраженного от земли солнечного света в инфракрасном диапазоне. Роскосмосом не упоминается необходимость решения ряда не слишком очевидных, но необходимых и дорогостоящих проблем.

Во-первых, очевидно, что интенсивность отражения света от земной поверхности сильно зависит от альбедо поверхности, т.е. от отражающих свойств земной поверхности. Огромная территория России содержит очень широкий набор видов поверхности – тундра, пустыня, леса, лесостепи, пашни, сельхозугодия, города, промышленные зоны. Каждый из таких видов характеризуется определенными свойствами альбедо, которые к тому же могут меняться в зависимости от времени года. Необходимость проведения таких широкомасштабных работ никем не упоминается.

Во-вторых, работа на орбите космических спектрометров предполагает непрерывную передачу информации в наземный центр связи и не предполагает передачи сведений об условиях измерения – как, например, сильная облачность, песчаные или пылевые бури, которые существенно ослабляют прохождение отраженных солнечных лучей через атмосферу. Именно с целью учета таких факторов Европейское космическое агентство задействует спутник Suomi NPP, который проходит за несколько минут по той же самой орбите до прохода Sentinel 5 Precursor и передает на Землю фотоизображения поверхности, которые позволяют оценить состояние облачности перед работой космического орбитального спектрометра.

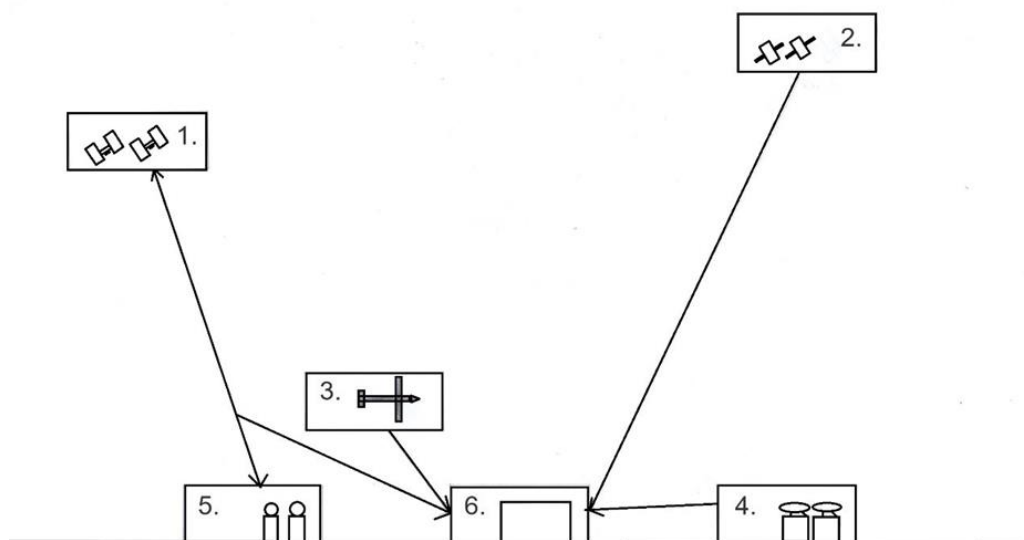
В-третьих, спектры поглощения парниковых газов в инфракрасном диапазоне зависят от таких физических свойств окружающей среды, как давление, температура и влажность воздуха. Неполный учет этих атмосферных факторов может исказить результаты мониторинга.

В-четвертых, общеизвестно, что оптические части приборов, расположенных на спутниках, со временем теряют свои оптические свойства. Их прозрачность уменьшается в связи с попаданием в них микрометеоритов и космической пыли. Регулярная проверка показаний спектрометра на предмет их достоверности также обходится стороной.

Недостаточный учет этих четырех факторов может существенно исказить результаты зондирования Земли на предмет изучения концентраций парниковых газов, их изменения и распределения по отдельным регионам.

В этой связи нами представлен эскиз национальной системы такого мониторинга, учитывающий вышеперечисленные факторы.

Рисунок 12. Концептуальная схема взаимодействия отдельных сегментов предполагаемой национальной системы космического мониторинга парниковых газов



Предполагается, что система должна состоять, как минимум, из шести необходимых сегментов:

1. Сегмент орбитальной группировки аппаратов, оснащенных космическими спектрометрами.
2. Сегмент погодных спутников, ориентированных на мониторинг погодных условий в районе во время проведения в нем спектроскопических измерений. Аппараты этого сегмента могут также выполнять и другие схожие задачи в интересах народного хозяйства.
3. Сегмент авиационных наблюдений, предназначенных для регулярного измерения альбедо земной поверхности в различных регионах страны в разные времена года.
4. Сегмент метеонаблюдений, представляющий собой сеть наземных автоматических метеостанций, регистрирующих основные погодные показатели.
5. Сегмент контроля качества работы космического спектрометра (5). Нами предполагается, что наиболее адекватным способом контроля качества орбитальных измерений будет параллельное измерений концентраций парниковых газов в атмосфере с земной поверхности. Существующие автоматические станции мониторинга парниковых газов решают эту задачу недостаточно эффективно. Такие станции измеряют концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы, которые, естественно, отличаются. От показателей, полученных с помощью орбитальных спектрометров, измеряющих усредненные характеристики во всем столбе атмосферы от поверхности Земли до спутника. Для проверки показаний космического аппарата нами предлагается использовать аналогичный спектрометр на Земле, нацеленный на Солнце и измеряющий в прямом солнечном свете концентрацию парниковых газов в момент прохода над ним спутника. Тем самым измерения будут проводится в одно и то же время в одинаковых атмосферных условиях за исключением того, что свет будет проходить через атмосферу различное количество раз.
6. Сегмент наземного комплекса сбора и обработки информации от пяти предыдущих сегментов, вычисления концентраций парниковых газов и представления информации пользователям в удобном для них виде.

Предложенная концепция орбитального мониторинга позволяет определить координаты выбросов метана, однако не решает вопрос об общем количестве метана, выброшенного в атмосферу в этом месте. Космический спектрометр регистрирует концентрацию метана в каждом месте планеты всего лишь один раз в сутки. Поэтому регистрация концентрации метана в месте выброса может произойти, допустим, или за пять минут до выброса, или через 23 часа 55 минут после выброса. Определение общего объема вышедшего в атмосферу метана будет проведено с очень большой погрешностью. Для более точного решения этого вопроса необходимо определиться с количеством аппаратов на орбите, от которого будет зависеть с какой частотой должны регистрироваться сведения о концентрации парниковых газов и каким является допустимый перерыв в наблюдении любой точки на поверхности Земли для одиночного спутника, а также определить рациональное расположение нескольких таких спутников в системе и минимизировать перерыв в наблюдении для всей орбитальной группировки спутников. Поэтому одного космического аппарата будет явно недостаточно и придется искать компромисс между требованиями по качеству и оперативности получения информации и минимизацией количества космических аппаратов орбитальной группировки, а также стоимости их создания и эксплуатации.

Выводы

На примере данных, полученных в октябре 2022, 2023 и 2024 годов, впервые в отечественной практике проведено систематическое изучение ежедневных выбросов метана на площади всей планеты. Показано, что метод орбитального дистанционного измерения концентрации метана позволяет оперативно проводить анализ изменений, происходящих в атмосфере во времени и пространстве, выявлять техногенные аварии и катастрофы.

Разработан легальный механизм бесплатного получения ежедневной информации, относящейся к ежедневному распределению концентрации метана из архивов Европейского космического агентства, заблокированных на территории России.

Выявлены места наиболее значительных выбросов, расположенные на территории нефтегазовых месторождений США и Узбекистана. Показано, что заявления ряда зарубежных экспертов об интенсивном загрязнении атмосферы выбросами метана предприятиями России являются спорными.

Проведен более подробный анализ повышенной концентрации метана на территории Кемеровской области России. Выдвинута гипотеза, что произошедшие в октябре 2024 года выбросы на территории Кузбасса, менее значительные по сравнению с зарубежными, связаны с предшествующим им землетрясением в этом регионе.

Разработанная нами методика глобального мониторинга выбросов без каких-либо затрат может быть использована добывающими предприятиями Российской Федерации, обладающих достаточно разветвленной пространственной структурой (шахты, месторождения, трубопроводные системы) для оперативного ежедневного контроля за ситуацией с выбросами метана. Предложена концептуальная схема отечественной системы глобального мониторинга эмиссии метана, учитывающая особенности эксплуатации зарубежных систем подобного назначения.

Список литературы

1. Киселев Андрей Александрович, Кароль Игорь Леонидович. С метаном по жизни. – Санкт-Петербург: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. 2019. – 73 с.: ил. ISBN 978-5-9500883-7-7. I. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. II. Климатический центр Росгидромета.
2. <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/novosti-partnerov/840-nature-globalnyeurovni-metana-vzletayut-na-rekordnye-vysoty> Климатический центр Росгидромета. 17 июля 2020. Новости партнеров. Nature: Глобальные уровни метана взлетают на рекордные высоты.
3. https://iki.cosmos.ru/docs/annual/2022/R_Emissiya-2022.pdf
4. Парсаданян А.А. Изучение состояния озонового слоя в арктических зонах на основе ДЗЗ Copernicus Sentinel-5P // Современные научные исследования и инновации. 2023. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/05/100325> (дата обращения: 23.09.2024).
5. <https://www.deviantart.com/giallo86/art/Free-HD-20k-x10K-Earth-World-Map-Texture-771486575>
6. В.Клепинин, Т.Агафонова, «Visual FoxPro 9.0 в подлиннике», СПб, БХВ- Петербург, 2008, - 1216 стр. ISBN 978-5-94157-882-5.

7. «Министр: ЧП в Байсуне – одна из крупнейших техногенных аварий в Узбекистане», 08:48 / 07.10.2024 файл «Министр_ ЧП в Байсуне – одна из крупнейших техногенных аварий в .pdf».
8. Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Макеев М.П. Фугитивные выбросы метана и технологии их сокращения при угледобыче в Кузбассе. Горная промышленность. 2022;(6):54–59. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-54-59> Источник: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/17725-fugitivnye-vybrosy-metana-i-tekhnologii-ikh-sokrashcheniya-pri-ugledobyche-v-kuzbasse>
9. <https://www.volcanodiscovery.com/ru/zemletryaseniya/quake-info/9655028/mag4quake-Oct-15-2024-SOUTHWESTERN-SIBERIA-RUSSIA.html>
10. <https://tass.ru/pmef/18019577>. ТАСС 15 июня 2023 года «Роскосмос проектирует группировки спутников для мониторинга парниковых газов».