



Пламен Николов Тренчев

**ИЗПОЛЗВАНЕ НА СПЪТНИКОВИ ДАННИ СЪС СРЕДНА
ПРОСТРАНСТВЕНА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ ЗА РЕГИСТРИРАНЕ НА
АТМОСФЕРНО ЗАМЪРСЯВАНЕ С МЕТАН**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд

за присъждане на образователна и научна степен

ДОКТОР

научна специалност:

„Дистанционни изследвания на Земята и планетите“

Научен ръководител:
доц. д-р Даниела Аветисян

СОФИЯ

2022 Г.

Съдържание

Основни съкращения	4
Увод	5
Актуалност.....	5
Цел на дисертационния труд.....	5
Задачи по изпълнение на целта	5
Глава 1. Обзор - Атмосферно замърсяване	6
Глава 2. Атмосферно замърсяване с метан – значение, източници, сателитни данни	10
2.1. Значение на метана като парников газ	10
2.2. Природни източници на метан	13
2.3. Антропогенни източници на метан	16
2.4. Сателити, източници на данни за метан	18
Глава 3. Обекти и методика на изследване на атмосферни замърсявания с метан посредством спътникови данни	23
3.1. Анализ на проблема за регистриране и количествено определяне на емисиите на метан. Предимства и недостатъци на спътниковата технология	23
3.2. Избор на спътникови данни за изследване на метанови емисии	23
3.3. Обекти и област на изследване за емисии на метан с антропогенен характер	25
3.4. Изследване на пространственото и времевото поведение на метановите емисии от избраните обекти	27
3.5. Установяване на връзки на метановите емисии с емисии на други замърсители от избраните обекти	30
Глава 4. Анализ на резултатите от изследването	31
4.1. Липсващи данни в сателитните изображения	31
4.2. Определяне на фоновите нива на метан за областите на интерес	32
4.3. Регистриране на събития с високи емисии на метан в изследваните области	35
4.4. Взаимовръзка между случаи на метанови емисии и емисии на други замърсители от избраните обекти	41
Изводи	42
Приноси	43
Статии на автора по темата на дисертационния труд	43
Литература	44

Благодарности

Изказвам своята благодарност на научния ми ръководител доц.д-р Даниела Аветисян за оказаната помощ и съвети в работата над моята дисертация.

Изказвам своята дълбока благодарност към доц. д-р Мария Димитрова и доц.д-р Деян Гочев за ползотворното сътрудничество, конструктивните съвети и стимулиращи дискусии.

Благодаря Ви, че бяхте част от целия процес на това интересно пътуване от раждането на идеята до нейната реализация!

Използвани съкращения

АИС	-	Автоматични измервателни станции
ДНК	-	Дезоксирибонуклеинова киселина
ЕВРОСТАТ	-	Статистическа служба на Европейския съюз
ЕКА	-	Европейска космическа агенция
ЕС	-	Европейски съюз
ЛОС	-	Летливи органични съединения
МГИК	-	Междуправителствена група по изменение на климата
МГО	-	Минимална граница на откриване
НАСА	-	Национално управление по въздухоплаване и изследване на космическото пространство, САЩ
НМЛОС	-	Неметанови летливи органични съединения
ПГЗ	-	Потенциал за глобално затопляне
ПДК	-	Пределно допустими концентрации
ТЕЦ	-	Топлоелектрически централи
ФПЧ	-	Фини прахови частици
С3S	-	Copernicus Climate Change Service
CAMS	-	- Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CCAC	-	Climate & Clean Air Coalition
EPA	-	U.S. Environmental Protection Agency
GOSAT	-	Greenhouse gases Observing SATellite
GWP100	-	Global Warming Potentials over 100 years
GWP20	-	Global Warming Potentials over 20 years
МАЕ	-	Международна агенция по енергетика
NIES	-	National Institute for Environmental Studies
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
SAR	-	Synthetic Aperture Radar
SNAP	-	Sentinel Application
SPRUCE	-	Spruce and Peatland Responses Under Changing Environments
SRON	-	Netherlands Institute for Space Research
SWIR	-	Short-wave infrared light
TEMIS	-	Tropospheric Emission Monitoring Internet Service
TROPOMI	-	TROPOspheric Monitoring Instrument
WEO	-	The World Energy Outlook

У В О Д

АКТУАЛНОСТ

Едно от най-важните предизвикателства в науките за Земята през следващото десетилетие е по-задълбоченото разбиране на влиянието на метана в процесите на изменение на климата. Метанът е вторият най-мощнен парников газ, като през последните години концентрациите му се увеличават с все по-бързи темпове. Той е една от основните причини за по-бързото затопляне на климата. Намаляването на емисиите на метана е най-силният инструмент, с който разполагаме, за да забавим изменението на климата през следващите 10 години и допълва необходимите усилия за намаляване на въглеродния диоксид. Сателитните технологии за дистанционни изследвания все повече разгръщат своя голям потенциал както за оперативно наблюдение на емисии на метан от различни по големина и характер източници, така и за подобряване на инвентаризация на емисиите отдолу-нагоре. Доказателство за важността на спътниците за изследване на метановите емисии е големият брой планирани и готови за извеждане в орбита сателити с висока и средна пространствена разделителна способност.

ЦЕЛ:

Цел на настоящият дисертационен труд е разработване на единна методика за регистриране и изследване на различни източници на метанови емисии и други газови компоненти посредством спътникови данни.

ЗАДАЧИ:

За реализиране на целта се решават следните задачи:

1. Избор на обекти за изследване – източници на метанови емисии с антропогенен характер.
2. Избор на най-подходящите за целите на изследването спътникови данни за атмосферен мониторинг.
3. Изследване на пространственото и времево поведение на метановите емисии от избраните обекти.
4. Установяване на връзки на метановите емисии с емисии на други замърсители от избраните обекти.

Глава 1. Обзор - Атмосферно замърсяване

Замърсяването на въздуха е един от основните екологични проблеми в световен мащаб понастоящем. Това е местен, общоевропейски и междуконтинентален проблем. Замърсителите на въздуха, емитирани в една държава, могат да бъдат пренесени в атмосферата и да влошат качеството на въздуха на други места (Manisalidis et.al. 2020). Големи части от населението в Европа не живеят в здравословна околна среда, което причинява вреда на човешкото здраве, и поради това в Европа е важно да бъдат наложени по-амбициозни действащи екологични стандарти (Mackenzie et al., 2021). Значителна част от замърсяванията на въздуха се генерират от енергийния сектор. Задържането на топлината на Земята в атмосферата в резултат на повишените концентрации на парникови газове като въглеродния диоксид и метан води до по-високи температури и свързаните с това следствия в изменението на климата като повишаване на морското равнище, екстремно време, смъртни случаи и т.н. (EEA, 2020).

Един от основните начини за справяне с проблема за изменението на климата в резултат на замърсяването на атмосферата е посредством мултидисциплинарен подход от страна на научните експерти, националните и международни организации с цел намиране и прилагане на устойчиви методи. Нивата на замърсяване на въздуха във и извън градските зони зависят основно от количеството и вида на емитираните в атмосферата вредни вещества, от източниците на тези емисии, а също и от метеорологичните и орографски условия за конкретната област на изследване. Метеорологичните процеси са съществен фактор, който оказва пряко въздействие върху скоростта на натрупване и разсейване на замърсителите в атмосферата за даден район при различни времеви периоди. Метеорологичните условия имат допълнителен косвен ефект върху качеството на въздуха чрез ролята им в химичните процеси, които протичат в атмосферата (Hester et al., 2009).

Замърсяването на въздуха и изменението на климата са тясно свързани. Замърсителите като метан, тропосферен озон, сажди и аерозоли влияят върху количеството входяща слънчева светлина, а по-високата им концентрация води до повишаване на температурата на Земята. Невинаги, обаче, качеството на въздуха се подобрява пропорционално и моментално при спад на антропогенните емисии на замърсители на въздуха. Причините за това са няколко и имат сложен характер. Налице е и нарастване на процента на трансграничен и трансконтинентален пренос на замърсители на въздуха (Manisalidis et.al. 2020). За да се направи оценка на степента на замърсяване на атмосферния въздух, е необходимо познаването на качествения и количествения характер на замърсяванията, както и нормите за пределно допустими концентрации (ПДК) на замърсяващите вещества.

Много важен аспект относно контрола на замърсяването на въздуха е да се вземе предвид значението и различния характер на точковите и неточковите източници. Подробният опис на емисиите трябва да регистрира всички източници в дадена област, като се проучи научно тяхното естество и се вземе под внимание топографията и метеорологията за конкретния район (Schwela D. et.al 1994; NRC, 2014; Manisalidis et.al. 2020).

Сегашната ера на глобална промяна в климата се дължи до голяма степен на изгарянето на изкопаеми горива като въглища, нефт, природен газ, което води до парников ефект. Антропогенните дейности унищожават естествения механизъм на температурен баланс на земната атмосфера, а глобалното затопляне се проявява посредством вредни ефекти върху човешкото здраве, дивата природа, земеделието и водната среда. Изчезващите ледници и ранното топене на снега повишават нивото на световния океан, чиято средна температура също нараства. Тропическите бури акумулират допълнителна енергия или казано по друг начин увеличават се способността на буря от категория 3 да се превърне в по-опасна буря от категория 4 или дори 5 (MacMillan A. et al., 2021; Mackenzie et al., 2021).

Източници на замърсяване на въздуха

Съществуват много системи за класификация на замърсителите на въздуха – например на основата на източниците, причиняващи замърсяване, или класификация според вида замърсител. Замърсителите се различават и по своите физични и химични свойства (Manisalidis et.al. 2020). Тези източници могат да бъдат класифицирани в две основни категории, а именно:

А. Антропогенни източници, свързани с изгарянето на различни видове горива. Те се делят на:

- i. **Стационарни източници** - включват емисии на замърсители от електроцентрали, рафинерии, промишлени предприятия, химическа промишленост, пещи за изгаряне на отпадъци и други.

- ii. **Мобилни източници** - включват моторни превозни средства, ж.п.транспорт, морски плавателни съдове, самолети и т.н.
- iii. **Химикали, прах и контролирани практики на изгаряне** в управлението на земеделието и горите. Контролираното изгаряне е техника, използвана понякога в управлението на горите и земеделието. Огънят е естествена част както от гората, така и от пасищата, и контролираният пожар може да бъде инструмент за лесовъди и земеделци.
- iv. **Отлагане на отпадъци в дена**, които генерират метан. Метанът не е токсичен, но е силно запалим и може да образува експлозивни смеси с въздуха. (Яблански Ц. и др., 2011).

Б. Природни източници – това са естествени източници, които включват природни бедствия като горски пожари, вулканични изригвания, прашни бури и др.

Замърсителите също така могат да бъдат класифицирани като **първични и вторични**. Обикновено първичните замърсители са вещества, директно излъчени от даден процес, като пепел от вулканично изригване, газът въглероден окис от отработените газове от моторно превозно средство или серен диоксид, освободен от фабрики. Вторичните замърсители не се излъчват директно. Те се образуват във въздуха в резултат на взаимодействие между първичните замърсители. Важен пример за вторичен замърсител е приземният озон - един от многото вторични замърсители, които съставляват фотохимичен смог (Manisalidis et.al. 2020, Яблански Ц. и др., 2011).

Основни първични замърсители

i. Серни оксиди (SO_x)

SO₂ се изхвърля в атмосферата от вулкани, горски пожари и при различни индустриални процеси, свързани с изгаряне на изкопаеми горива. Тъй като въглищата и петролът често съдържат серни съединения, при изгарянето им се отделя серен диоксид. По-нататъшно окисляване на SO₂, обикновено в присъствието на катализатор като NO₂, образува H₂SO₄ (сярна киселина) и в резултат се получава киселинен дъжд. Има силно негативно влияние и върху растителния и животинския свят (Mondal P., 2021; Яблански Ц. и др., 2011).

ii. Азотни оксиди (NO_x)

Азотните оксиди са химични съединения на азота с кислород. Емитират се в атмосферата основно под формата на NO, а от него чрез реакции сравнително бързо се получава NO₂. Те могат да бъдат естествен (природен), биогенен и антропогенен произход. От естествените източници най-значими са гръмотевичните бури заради екстремно високите температури, които се получават при мълниите. Други естествени източници са вулканичните изригвания и горските пожари. Селскостопанското торене и използване на азотфиксиращи растения (чрез фиксиране на азот от микроорганизми) е пример за биогенен източник на азотни оксиди. NO_x, получени от антропогенни източници, се групират в три категории (Manisalidis et.al. 2020; Richmond-Bryant J. et al, 2017; Chen T-M et al., 2007):

- **Термичен NO_x** – генерира се от стационарни горивни източници (топлоелектрически централи (ТЕЦ), промишлени предприятия, петролни рафинерии), освобождава се в атмосферата при горене на изкопаеми горива като природен газ и др.;

- **Горивен NO_x** – емитира се от мобилни горивни източници (сухопътен, въздушен и воден транспорт) при изгаряне на горивото от транспортните средства. Тези емисии възлизат на около 54% от всички NO_x с антропогенен произход.

- **Бърз NO_x** - възниква в ранния етап на горене, образувайки фиксирани видове азот (като NH и др.), които могат да се окислят до NO.

NO₂ невинаги е основният вид от азотните оксиди, но това е един от най-важните замърсители на въздуха в градска среда от гледна точка на човешкото здраве. При наличие на летливи органични съединения (ЛОС) във въздуха и под въздействието на интензивна слънчева светлина азотният диоксид (NO₂) взаимодейства химически, в резултат на което се получава вторичен замърсител – озон. Озонът при високи концентрации също уврежда растителността и е съществен вторичен замърсител (Bezirtzoglou E. et al, 2009).

iii. Въглероден окис (CO)

Въглеродният окис се отделя при непълно изгаряне на изкопаеми горива като природен газ, въглища, дървен материал. Той е отровен безцветен газ, без мирис и не е дразнещ. Основен източник в населените места са отработените газове от автомобилите и отоплителните инсталации. Най-голям

източник на СО като цяло, обаче, са вулканите и пожарите, но се получава и при фотохимични реакции в атмосферата, биологично окисляване от морски организми и др. Това е един от най-широко разпространените атмосферни замърсители (Emberson L.D. et al., 2018; Яблански Ц. и др., 2011).

iv. Въглероден диоксид (СО₂)

Въглеродният диоксид (СО₂) е естествен газ в атмосферата, не е токсичен и е основна съставна част от жизнения цикъл на растенията и животните. Той не винаги се разглежда като замърсител. Но когато концентрацията му превиши установените норми, се възприема като замърсяващ газ. СО₂ е основен парников газ и именно силното повишаване на концентрацията му в атмосферата е една от причините за наблюдаваното глобално затопляне (Яблански Ц. и др., 2011).

v. Летливи органични съединения

ЛОС са съществен замърсител на въздуха. Те често се разделят на отделни категории: *метан* (СН₄) и неметанови съединения (НМЛОС). Метанът е изключително мощен парников газ, който допринася за засилено глобално затопляне. Другите въглеводородни ЛОС също са значителни парникови газове чрез ролята си в създаването на озон и при удължаване на живота на метана в атмосферата, но ефектът им варира в зависимост от местните физико-географски условия и качество на въздуха (Gibb T.2019; Kumar A. et al., 2014).

Посредством сложни физични и биогеохимични процеси, протичащи в биосферата, ЛОС са основен елемент от преобразуването на въглеродния диоксид в органичен материал и обратно в неорганичен въглерод. Основният процес на отстраняването им от атмосферата е окисляване чрез реакция с хидроксилен радикал (ОН) под действието на UV в слънчевата светлина, но скоростта му на протичане варира в много широки граници – от няколко часа до десетки години (Ebersviller S. et al., 2012; Kumar A. et al., 2014; Manisalidis et.al. 2020).

vi. Прахови частици

Атмосферният прах се класифицира според големината на съставлящите го частици, според своя състав, както и според произхода си. В зависимост от концентрацията и състава си те отразяват или поглъщат част от пряката слънчевата радиация и подпомагат парниковия ефект от въглеродния диоксид и др. парникови газове. Те са и важен климатообразуващ фактор (Cheung K. et al., 2011; Manisalidis et.al. 2020; Wilson W.E et al.1997). Образоването на облаци и валежи също се влияе от наличието на прахови частици, действащи като кондензационни ядра, т.е. в зависимост от тяхното количество могат да се образуват повече или по-малко облаци. Основните параметри, които са важни за поведението на праха в атмосферата, са неговата концентрация, размерите на съставните му елементи, химичният състав на дисперсната фаза и др. Най-често говорим за фини прахови частици (ФПЧ) с размер до 10 и до 2.5 μm – ФПЧ10 и ФПЧ2,5. (Яблански и др. 2011). Те са сложен замърсител, тъй като съдържат различни компоненти в променливи концентрации.

По състав прахът се дели на органичен, неорганичен и смесен. Източниците, от своя страна, се делят на естествени и антропогенни. Някои прахови частици попадат в атмосферата директно, като почвени частици, частици морска сол, дим от горски пожари и т.н.; други се изхвърлят при изригване на вулкани (Бокрис, 1982). Всички те спадат към естествените източници на атмосферен прах. Антропогенните емисии се излъчват в атмосферата в резултат от изгарянето на твърди и течни горива в енергетиката, транспорта, индустрията и бита. Въпреки че са по-малко от естествените форми, антропогенните аерозоли могат да доминират във въздуха, особено в градските и индустриалните зони. Съотношението ФПЧ2.5/ФПЧ10 предоставя информация за източниците на прахови частици при различни условия на околната среда (Wilson W.E et al.1997; Cheung K. et al., 2011; Manisalidis et.al. 2020).

Вторични замърсители

Вторичните прахови частици са резултат от кондензацията на газове, химични реакции, включващи първични частици с газове, и коагулацията на различни първични частици. Образуват се в долната част на атмосферата. Те са по-трудни за контрол, тъй като имат различни начини на синтезиране. Приземният озон се генерира чрез химическа реакция между азотни оксиди и ЛОС, излъчени от естествени източници и/или вследствие от антропогенни дейности (Wilson W. et al, 1997; Kelishadi R. et al., 2010). Основните първични замърсители, участващи в образуването на вторични прахови частици, са азотни оксиди и серен диоксид. Елиминирането на праховите частици от атмосферата се извършва гравитационно и чрез валежите.

Времето на престой на пращинките във въздуха зависи от тяхната големина и разпределение в отделните слоеве на атмосферата, като времевият интервал е от 3 до около 30 дни.

Регистриране на атмосферните замърсявания

Атмосферните замърсявания са обемно атмосферно явление. Обикновено те имат предизвикващ източник, но се разпространяват бързо (в рамките на минути и часове) както във височина, така и в различни направления из атмосферата. В някои случаи замърсяванията са локални и засягат основно региона около източника си (основно промишлени обекти и транспорт). В други, обаче, се наблюдава далечен атмосферен пренос и могат да бъдат засегнати площи на хиляди километри. В зависимост от спецификата на изследваното явление става и изборът на методи и данни за неговото регистриране.

Регистрирането на атмосферните замърсители се извършва по два основни начина – посредством преки и посредством дистанционни измервания. Преките измервания се извършват в една точка, докато дистанционните методи дават данни за обемно съдържание. При измерване от сателити се получава съдържанието за даден замърсител в цялата колона от атмосферата над дадена площ, отговаряща на пространствената разделителна способност на апарата. За получаване на цялостната картина на явлениято е най-добре да бъдат използвани съвместно и двата източника на информация.

Преките измервания на замърсителите във въздуха се извършват от наземни измервателни станции, които най-често са автоматични - т.н. АИС (автоматични измервателни станции). От 2013 до сега работи единен портал за данни от АИС в Европа (EUROPEAN AIR QUALITY PORTAL). (фиг.1.1).

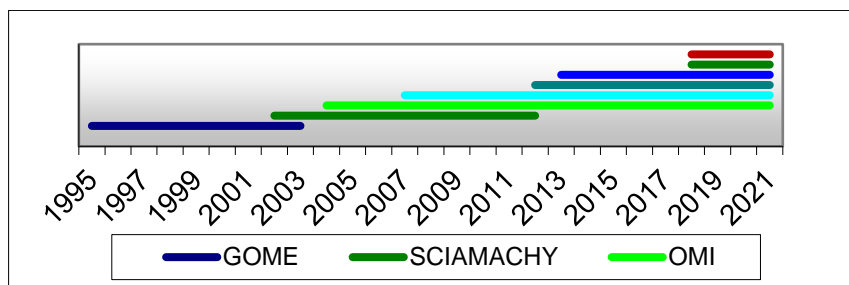
Наземните измервателни станции, представени на Фиг. 1.1, предоставят почасови и усреднени дневни данни за следните замърсители:

- ФПЧ:
- ФПЧ2.5
- ФПЧ10
- NO
- NO₂
- SO₂
- CO



Фиг. 1.1. Наземни измервателни станции – Единен европейски портал за данни

Дистанционните измервания се извършват основно посредством спътникови данни. На фигура 1.2. графично е представено времето на работа на основните апарати, разположени на сателитни платформи, измерващи редица атмосферни замърсители (TEMIS).



Фиг. 1.2. Сателити за изследване на атмосферно замърсяване

Както се вижда, сателитни данни за атмосферни замърсители съществуват от повече от 25 години (TEMIS , Dimitrova 2021).

Всички изброени инструменти дават данни за (TEMIS):

- | | |
|-------------------|-------------------|
| - AAI | - NO ₂ |
| - SO ₂ | - CHON |

Инструментът GOME-2 предлага данни още и за BrO. Инструментите SCIAMACHY и TROPOMI предоставят информация допълнително за:

- | | |
|------|-------------------|
| - CO | - CH ₄ |
|------|-------------------|

Докато повечето спътникови апарати, измерващи концентрацията на атмосферните замърсители са с ниска разделителна способност (около 50×50 km), данните от Sentinel-5P са със средна такава (7×3.5 km) и дават възможност за много по-детайлно изследване на различни явления и процеси.

Глава 2. Атмосферно замърсяване с метан – значение, източници, сателитни данни

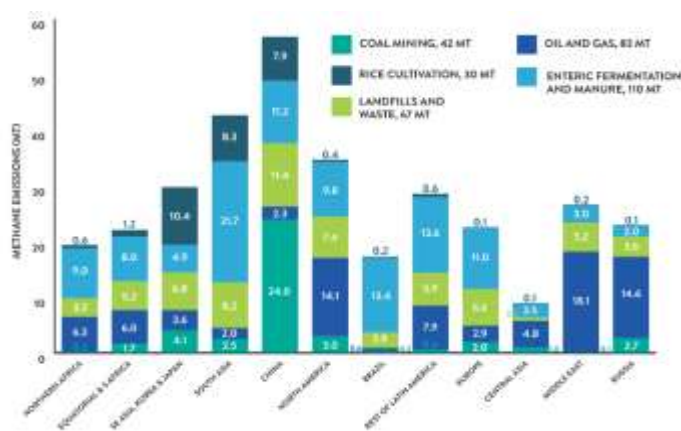
2.1. Значение на метана като парников газ

Общото название „парникови газове“ се отнася до всички газове, под чието влияние се затопля повърхността на Земята и по-ниските слоеве от атмосферата. Въглеродният диоксид позволява на слънчевите лъчи да достигнат до повърхността на Земята, но възпрепятства излъчването на топлината обратно. Други газове, които действат по същия начин, са метанът, диазотният оксид и хлорофлуоровъглеродите (фреоните), които се използват в аерозолните препарати и в много климатици.

Причина за основната част от наблюдаваното повишаване на температурата от 50-те години на 20-ти век до сега са по-високите емисии и съответно увеличените концентрация на парникови газове в атмосферата в резултат от човешката дейност (IPCC, <https://www.ipcc.ch/>, august 2021). Най-бързият и ефективен начин за съществено намаляване на емисиите във възможно най-кратък времеви хоризонт е чрез прилагане на комбинация от различни научни и технически подходи (Höglund-Isaksson Lena et al, 2020a).

Един от водещите акценти в доклада на МГИК са мощните парникови газове, като метанът, които се задържат в атмосферата десетилетие или по-малко, тъй като намаляването им би могло сравнително бързо да доведе до забавяне на затоплянето. Метанът е с висок потенциал за глобално затопляне и е подобър в улавянето на топлина, отколкото въглеродния диоксид. Емисиите му в процентно отношение са по-ниски спрямо CO₂, най-разпространеният парников газ, поради което CO₂ е най-големият проблем. Но емисиите на CO₂ са стабилни през последните няколко десетилетия и концентрациите на CO₂ нарастват с много предвидими темпове (Legere L., 2021). А през последните години концентрациите на метан се увеличават с все по-бързи темпове и тъй като метанът има по-висок потенциал за глобално затопляне, той е една от причините за по-бързото затопляне на климата. Уникалното при метана е, че за малко повече от 8 години той намалява наполовина в атмосферата, а една част се превръща в CO₂ през т.нар. кратък въглероден цикъл. Но докато метанът е в атмосферата, той допринася много силно за затоплянето - за целия си период на съществуване това е около 80 до 100 пъти повече, отколкото при CO₂ (Vellinga Th., 2021). Обратно, намаляването на емисиите на метан може да доведе до намаляване на концентрацията на метан в атмосферата и следователно дори до намаляване на парниковия ефект. При намаляването на CO₂ настоящият парников ефект остава същият и само не се увеличава. Изводът: намаляването на метана е по-ефективно от намаляването на CO₂ (Vellinga Th., 2021).

В Глобалната оценката на метана са представени и анализи за въздействията на национално ниво за всяка държава и регионалният потенциал за смекчаване на последиците, което дава насоки към кои сектори да се насочат основните усилия и средства за намаляване на емисиите. В нея е видно, че потенциалът за смекчаване на последиците от изменението на климата е различен в различните държави и региони (фиг.2.1, Saunio et al, 2020). Най-големият потенциал в Европа и Индия е в сектора на отпадъците. В Китай той е от производството на въглища, следвано от животновъдството. В Азиатско-тихоокеанския регион, с изключение на Китай и Индия, потенциалът е от въглища и отпадъци, а в Близкия изток, Северна Америка и Русия - от , въглища, нефт и газ (Vellinga T., 2021).



Фиг. 2.1. Изчислени годишни секторни емисии на метан по региони и общо за сектора в световен мащаб, с изключение на Океания. 2017 г., в млн. тона. Източник Sauniois et al 2020.

Трябва да се има предвид също така, че метанът е основен прекурсор при образуването на приземен озон (смог) – друг мощен фактор за влошаване на климата и замърсител на въздуха, който оказва отрицателно въздействие върху човешкото здраве и добивите от земеделски култури. Намалването на емисиите на метан може да изиграе ключова роля за намаляване на приземния озон в световен мащаб (van Dingenen et.al, 2018). Той е така нареченият "краткотраен фактор за климата". Около 60 % от световните емисии на метан произхождат от селското стопанство, депата за отпадъци и отпадъчните води, както и от производството и транспорта на изкопаеми горива (van Dingenen et.al, 2018). Насочването към тези три сектора може да доведе до значително намаляване на общите емисии на метан и концентрациите на озон в световен мащаб.

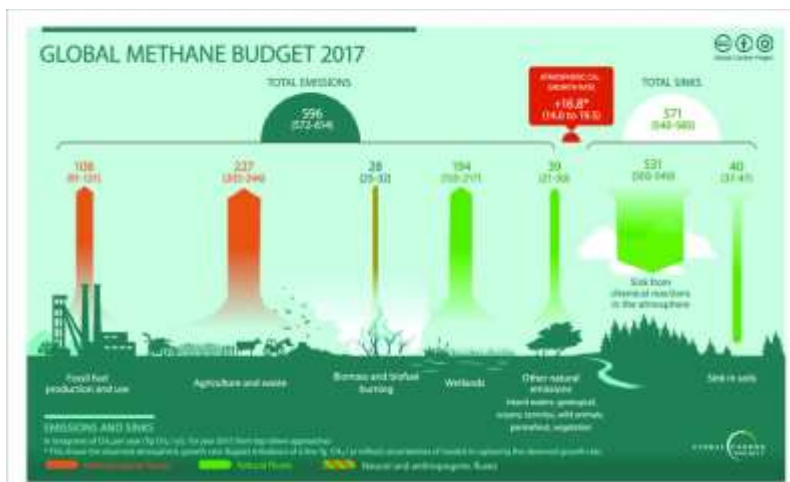
ЕС е водещ инициатор в глобалните усилия за борба с изменението на климата и за намаляване на емисиите на парникови газове, като приносят на Европа към световните емисии на CH_4 понастоящем е само около 6%. Въпреки това намаляването на емисиите на метан само в Европа не е достатъчно и е необходимо глобалното сътрудничество за цялостното предотвратяване на замърсяването на въздуха.

Метанът е вторият най-мощен парников газ и поради това колкото по-дълго пребивава в атмосферата, толкова повече топлина задържа. Ето защо е от съществено значение за климатичните модели да изчисляват правилно колко дълго престоява метанът, преди да се разгради. А това се случва, когато молекулата на метана реагира с хидроксилен радикал (ОН) в процес, наречен окисление. Хидроксилните радикали унищожават и други опасни замърсители на въздуха. ОН е основният окислител в долните слоеве на атмосферата (Wolfe et al., 2019). Той контролира продължителността на живота на почти всеки реактивен газ. Но в световен мащаб не е наличен начин за директно измерване на ОН. Сателитните измервания позволяват да се разшири и усъвършенства модела за цялото земно кълбо, като се използват различни данни от съществуващите сателити, например тези, които следят емисиите от градските райони или горските пожари (Wolfe et al., 2019).

Бюджетът на атмосферния метан е сборът от различните индивидуални източници и погългителни (отстраняващи метана от атмосферата), които променят общото количество метан в атмосферата. Но съществуват сериозни предизвикателства в способността ни да определим количествено този бюджет (Ganesan et.al, 2019). Необходими са технологии и научни постижения за проследяване на нивата на метан в атмосферата, които през следващото десетилетие биха подобрили значително способността ни да разберем механизмите, причиняващи промени в атмосферния метан. Интерпретирането на тези данни чрез съвременни моделни симулации на атмосферата би позволило по-точното количествено определяне на емисиите от измерванията в атмосферата. Това от своя страна би помогнало за по-точна инвентаризация на емисиите на метан, например чрез проследяване на състава на отпадъците, изпращани на сметища, или посредством наблюдение на емисиите от течове в нефтената и газовата промишленост. Трите основни аспекта на науката за метана включват атмосферни измервания на метана и неговите изотопни вариации; модели, които симулират процесите, стоящи в основата на емисиите на метан; и количествено определяне на различните компоненти на бюджета за метан от атмосферните измервания (Rigby M., 2019). Напредък в тези три области заедно ще доведе до по-точно количествено определяне на емисиите на метан и съответно ще ни позволи да направим жизненоважна стъпка по пътя към изпълнение на Парижкото споразумение.

Установено е, че между 2000 и 2017 г. емисиите на метан са се повишили до нива, които съгласно климатичните модели ще доведат до затопляне с 3 – 4 °C до края на този век (Jackson et.al, 2020). Това е много опасен температурен праг. Само през 2017 г. земната атмосфера е абсорбирала близо 600 милиона тона от този мощен парников газ. Повече от половината от всички емисии на метан понастоящем се дължат на човешката дейност (фиг. 2.2).

Емисиите на метан от селското стопанство са нараснали до 227 млн. тона през 2017 г., което е с близо 11% повече от средната стойност за периода 2000–2006 г. Емисиите на метан от производството и употребата на изкопаеми горива достигат 108 млн. тона през 2017 г., което е с близо 15 % повече спрямо предходния период.

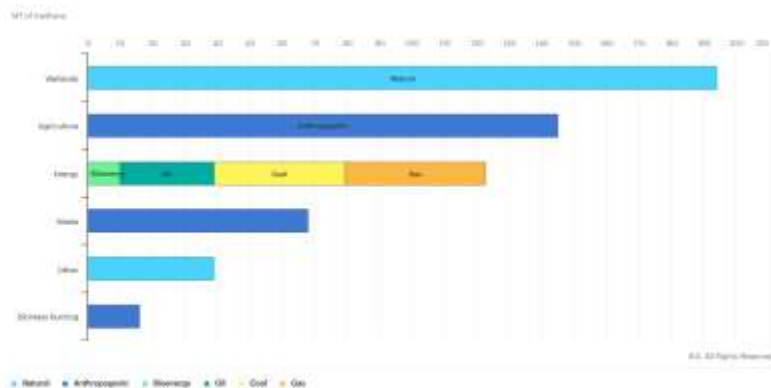


Фиг. 2.2. Глобален бюджет на метана за 2017 г. Оценка на база метод „отгоре-надолу“. Източник GCP, Global Carbon Project

Европа се откроява като единствения регион, в който емисиите на метан са намалели през последните две десетилетия, отчасти благодарение на ограничаването на емисиите от химическото производство, по-ефективното отглеждане на храни, а също и в резултат от по-доброто управление в провежданите политики за намаляване на емисиите от сметища, оборски тор и други източници (Sauniois M et al, 2020). До 2017 г. не са установени доказателства за увеличаване на емисиите на метан в Арктика, въпреки опасенията, че размразяването на вечната замръзналост може да доведе до освобождаване на метан в атмосферата. В тази насока самолетите и безпилотните летателни апарати са обещаващи за наблюдение на метана, включително и на петролните и газовите кладенци.

Глобалният бюджет на метана синтезира резултатите от проучванията "отгоре-надолу" и оценките "отдолу-нагоре", за да предостави глобални данни за емисиите на метан от 2000 до 2017 г. (Sauniois M et al, 2020). Съществуват различни начини за комбиниране на тези резултати, за да се оцени ефектът върху глобалното затопляне. Най-разпространеният от тях е потенциалът за глобално затопляне (ПГЗ). ПГЗ за метана е между 84–87, когато се разглежда въздействието му за 20-годишен период (GWP20), и между 28–36, когато се разглежда въздействието му за 100-годишен период (GWP100) (МГИК, www.ipcc.ch).

За да се анализира и прогнозира въздействието на антропогенните емисии, е необходимо да разполагаме с пълна картина на метановия цикъл в атмосферата. Това включва подробна информация за размера на входящите емисии - както природни, така и антропогенни (фиг. 2.3.), а също и на изходящите емисии. Трябва да е известно също така колко време метанът се задържа в атмосферата. В бюджета за метана, ако един член е несигурен, той добавя несигурност към всички останали членове и ограничава способността ни за прогнозиране посоката на промяна в глобалната метанова система (Rochester U. 2019, Weber et.al 2019). През 2020 г. метанът достига най-високите си концентрации от началото на спътниковите записи през 2003 г. (по данни от C3S, <https://climate.copernicus.eu/>). Осъзнаването на този факт на глобално и трайно покачване на емисиите на метан и отражението му върху климата и качеството на въздуха е от съществено значение (Shindel D. et.al, 2021). В този ръст категорично е налице силно човешко влияние (Aben I., 2021).



Фиг. 2.3. Източници на метанови емисии по оценка на IEA (2021). Източник: IEA (2021), *Methane Tracker 2021*

Насърчаването към действия за намаляване на емисиите на метан нараства. Стратегията на Европейския съюз е да се подобри мониторинга и докладването на емисиите на метан чрез своята служба за мониторинг на атмосферата "Коперник" (CAMS). В САЩ се разработва програма REMEDY (REMEDY), която ще развива технологии за намаляване на емисиите на метан в нефтената, газовата и въглищната промишленост. В световен мащаб 45 държави, които произвеждат около три четвърти от световните емисии на метан, са част от Глобалната инициатива за метан (<https://www.globalmethane.org/>), която също е насочена към намаляване на емисиите на метан в тези отрасли.

За разлика от въглеродния двуокис, емисиите на метан са по-неуловими. За метана няма глобално точни данни за производствените дейности, а вземането на проби не е равномерно разпределено. Знаем много за някои държави и много малко или нищо за други. Имаме нужда от глобално покритие и тук се включват спътниковите наблюдения. Измерванията са голямо предизвикателство - веднъж освободен в атмосферата, метанът се смесва с въздуха и пътува. На дадено място се вижда само моментната концентрация на метан, но метанът, който измерваме, може да идва и от друго място. Спътниковите измервания позволяват да се проследят промените в тези концентрации по света и да се определят и оценят емисиите (Aben I., 2021). Измерването на метана е от основно значение за осъществяване на промени в отраслите с най-високи емисии на метан, особено като се има предвид, че според оценки на Международната агенция по енергетика 40 % от емисиите могат да бъдат намалени без допълнителни разходи. Най-новата инициатива на ООН и Комисията на ЕС е Международна обсерватория за емисии на метан, която има за цел да подобри мониторинга на метана чрез създаване на по-пълна картина на емисиите - съчетаване на доклади на компаниите, сателитни данни и научни изследвания.

2.2. ПРИРОДНИ ИЗТОЧНИЦИ НА МЕТАН

Естествените източници на метан включват сладководни басейни, влажни зони, океани, пермафрост, газови хидрати, както и други източници, например горски пожари и т.н. (Sauniois M. et al., 2016). Стойностите за различните източници по данни от Доклада за глобалната оценка на метана на ССАС са представени в Таблица 2.1 (ССАС, 2021). Въпреки че съществува значителна несигурност в оценките на емисиите от всеки един от тези източници, относителният порядък на величината на общите глобални естествени емисии остава стабилен (Christensen et al., 2019).

Както се вижда от Таблица 2.1, влажните зони са едни от най-големите естествени източници на метан в световен мащаб с емисии, които се оценяват на 102 до 200 млн. тона. Това са средни годишни стойности за периода 2008–2017 г. (Jackson et.al, 2020; Sauniois et.al, 2020) и представляват около една четвърт от всички глобални емисии на метан. Влажните зони са екосистеми, в които почвите или торфищата са наситени с вода или където повърхностното заливане, независимо дали е постоянно или не, доминира биохимията на почвата и определя видовия състав на екосистемата (EPA, 2015). Примери за влажни зони са мочурища, блата, торфища и др. Влажните зони са от решаващо значение за глобалния бюджет на метана – настоящ и бъдещ, но към момента все още са налице значителни пропуски в разбирането за тях (Sjögersten et al., 2020). Това е и причината за широкия диапазон в оценките на емисиите от влажните зони.

NATURAL SOURCES	MAGNITUDE (MT/YR)	ANTHROPOGENIC SOURCES	MAGNITUDE (MT/YR)	SINKS	MAGNITUDE (MT/YR)
Wetlands	145 [100–183]	Coal mining	44 [31–63]	Soils	40 [37–47]
Termites	9 [3–15]	Oil and gas industry	84 [72–97]	Total chemical loss	531 [502–540]
Oceans	6 [4–10]	Landfill and waste	66 [64–71]	Total loss	571 [540–585]
Geological	45 [18–85]	Ruminants	115 [110–121]		
Wild animals	2 [1–3]	Rice cultivation	30 [24–40]		
Freshwaters	155 [117–212]	Biomass burning	16 [11–24]		
Permafrost soils	1 [0–1]	Industry	3 [0–6]		
		Biofuels	13 [10–14]		
		Transport	4 [1–13]		
Total natural	367 [243–488]	Total anthropogenic	380 [358–407]		
Total natural (top-down)	232 [194–267]	Total anthropogenic (top-down)	364 [340–381]		

Таблица 2.1. Източници на метан – природни и антропогенни (по данни от Доклада за глобалната оценка на метана на Коалицията за климат и чист въздух Източник: CCAC (2021))

Сладките води са друг значителен естествен източник на метан. Много често те са подобни на влажните зони и в резултат на това двойното отчитане е съществен проблем (Saunio et al. 2020). Проучванията показват, че преките човешки промени в естествените водни екосистеми могат да увеличат емисиите на метан. Нещо повече, глобалният принос и значението на сладководните екосистеми като емитери на метан са силно подценени (Rosentreter J. et.al, 2021). Водните екосистеми и влажните зони като цяло допринасят за поне половината от общия бюджет за емисии на метан (Silverman 2021). Именно поради тази причина точното отчитане на източниците на метан от водните екосистеми и доколко те са повлияни от човешките дейности е важно за разбирането на концентрациите на метан в атмосферата (Judith et.al 2021).

Добре известно е, че природните източници се влияят от изменението на климата, поради което може да се смята, че част от техните емисии на метан се дължи косвено на човешка дейност. Като примери могат да се посочат увеличените емисии от размразяването на вечната замръзналост (Oh Y. et.al, 2020; Dean et.al 2018; Cooper et.al 2017) или такива от влажните зони при затопляне на климата (Gedney et al. 2004). Тази взаимосвързаност на емисиите на метан от природни източници и изменението на климата има нелинейна характер и е с положителна обратна връзка. Доказателство за това е, че освобождаването на метан от размразяващата се вечна замръзналост става по-бързо в резултат на рязко, а не на постепенно размразяване (Anthony et al. 2018). Тези обратни връзки не могат да бъдат смекчени пряко, но могат да бъдат намалени чрез намаляване на антропогенните емисии на метан.

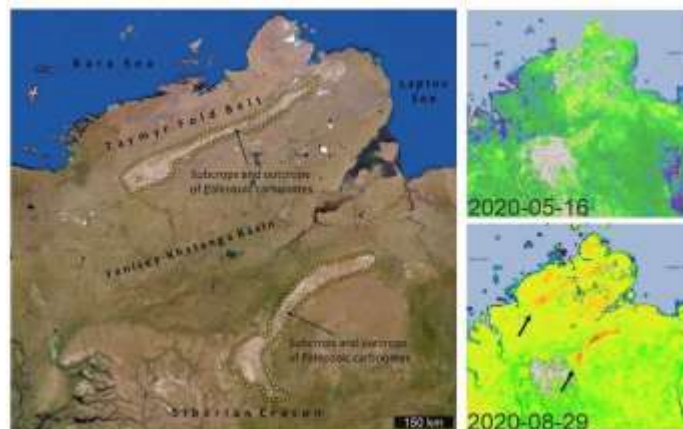
Торфищата са известни под различни имена - блата, мочурища, торища, части от вечно замръзналата тундра и др. Те съхраняват над една трета от въглерода в почвата на Земята и обхващат около 3% от общата площ на сушата. Това е повече от въглерода, съхраняван във всички останали растителни видове, взети заедно, включително горите в света (Huang Y., Wang Y., 2021). През последните години се отделя голямо внимание на тези комплексни системи, защото е установено, че затоплянето на Земята стимулира сложни промени в екосистемите, чийто краен резултат е отделянето на още повече парникови газове във въздуха (Morgan T., 2021). Затоплянето води до освобождаването на повече парникови газове в атмосферата в резултат на каскаден ефект и тези по-високи емисии, ако не бъдат ограничени, могат да оказват влияние в дълъг период от време (Wilson R. et al, 2021).

Вечната замръзналост по дефиниция е почва, която остава замръзнала в продължение на две или повече последователни години, и е съставена от скали, почва, седименти и различни количества лед, които свързват елементите помежду им (IIASA 2019). В арктическият ландшафт тя представлява един от най-големите естествени резервоари на органичен въглерод в света. Огромните количества метан, които потенциално могат да бъдат освободени в резултат на размразяването на вечната замръзналост, често се описват като бомба със закъснител и будят сериозно безпокойство по отношение на промените в климата. Вечно замръзналите почви обхващат големи площи от северното полукълбо, предимно в Северна Азия и

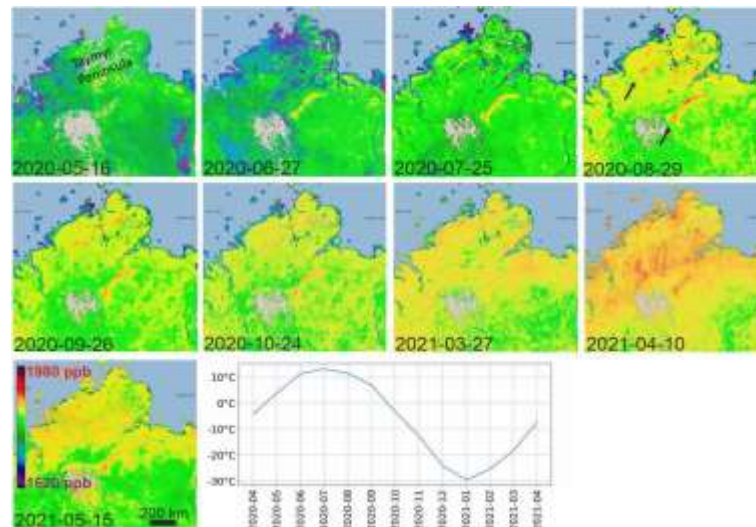
Северна Америка. Тяхното размразяване води до отделянето в атмосферата на огромни количества CO_2 и метан, което допълнително засилва антропогенния ефект на парниковите газове (Froitzheim et.al. 2021).

Скорошно проучване все пак показва, че е възможно да се неутрализира заплахата от природен газ, която се крие под арктическата почва, разгледайки няколко възможни бъдещи сценария (Christensen et.al 2019). В анализа се установява количествено горната стойност на диапазона за естествените емисии на метан, които могат да бъдат освободени от арктическата тундра, тъй като това позволява те да бъдат поставени в зависимост от много по-голямото освобождаване на емисии на метан от човешката дейност.

(Christensen et.al, 2019) докладват първото по рода си проучване, при което относителният принос на двата източника за глобалното затопляне е количествено определен и сравнен. Проблемът с метана, отделен от размразяващата се арктическа тундра, е възможно да остане управляем, ако се постигне ефективен контрол на антропогенните емисии. Резултатите показват, че емисиите, причинени от човека, могат да бъдат намалени в достатъчна степен, за да се ограничи причиненото от метана затопляне на климата до 2100 г., дори в случай на неконтролирана естествена обратна връзка с емисиите на метан в Арктика (Christensen et.al 2019).



Фиг. 2.4. Вляво: Сателитна снимка на Северен Сибир. С жълти прекъснати линии са отбелязани два района с палеозойски варовици. В горния десен ъгъл: Спътниково измерена концентрация на метан. Източник: N. Froitzheim, D. Zastrozhnov, използване на данни от GHGSat (pulse.ghgsat.com/)



Фиг. 2.5. Концентрации на метан в Северен Сибир през 2020-2021 г., (<https://pulse.ghgsat.com/>). Два издължени максимума на концентрацията на метан (стрелки), които съвпадат с районите на карбонатните разкрития (фиг. 2.4.), и към увеличението на концентрацията в целия регион през март-април 2021 г. Кривата показва средните месечни стойности на температурата в Сибир през периода на изследване (<https://climateresearcher.org/>). Източник: N. Froitzheim, D. Zastrozhnov, (Froitzheim et.al. 2021).

Друго важно проучване прави сравнение между пространственото и времето разпределение на концентрациите на метан в атмосферата над Северен Сибир, определено чрез сателитна спектроскопия, и геоложките карти (Froitzheim et.al. 2021, Born 2021). В резултат се откриват значително повишени концентрации в два района на Северен Сибир - Таймирския гънков пояс и ръба на Сибирската платформа (фиг. 2.4). Особеното в тези два района е, че скалната основа там е изградена от варовикови образувания от палеозойската ера, а почвените формации са много тънки или изобщо не съществуват.

Както може добре да се види на фиг. 2.5, в двата района се наблюдават повишени концентрации от емисии на метан по време на екстремната гореща вълна през лятото на 2020 г. и се запазват месеци след това. Тези емисии е малко вероятно да се дължат на разпадането на органична почвена материя, тъй като там почвата е много тънка. Предполага се, че системите от пукнатини във варовика, които са били запушени от смес от лед и газов хидрат, при затоплянето са станали пропускливи, в резултат на което природният газ, представляващ основно метан от резервоари във и под вечната замръзналост, може да достигне до земната повърхност.

За арктическите морски системи газовите хидрати представляват най-големият потенциален източник на освобождаване на метан в атмосферата поради големите количества метан, съдържащи се в тези находища (Kretschmer et.al, 2015). Много други видове източници (напр. геоложки) също допринасят за потенциалното освобождаване на метан от океана. Емисиите от Северния ледовит океан в атмосферата се оценяват на от 1 до 17 Tg CH₄/година (Kort et.al 2012; Shakhova et.al 2014). Тези емисии се освобождава предимно от плитките води на Северния ледовит океан, тъй като метанът, отделен от по-дълбокото морско дъно, е подложен на значително окисление по време на издигането си във водния стълб (Saunois, M. et al., 2016).

2.3. АНТРОПОГЕННИ ИЗТОЧНИЦИ НА МЕТАН

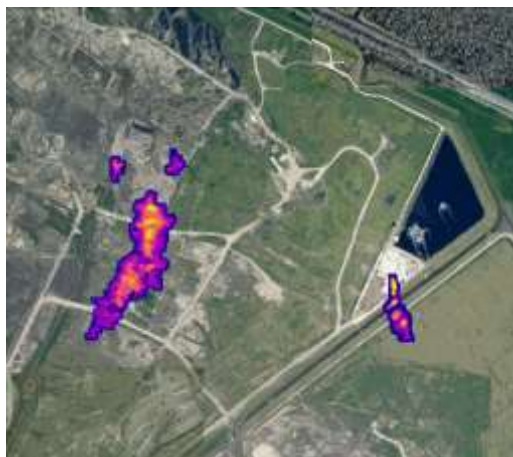
Поредица от мащабни изследвания на множество екипи и научни организации през последните няколко години се обединяват около становището, че приблизително около 60% от общите световни емисии на метан се дължат на антропогенни източници (CSAC 2021), а над 90 % от тях произлизат от три сектора: изкопаеми горива (~35 %), селско стопанство (~40 %) и отпадъци (~20 %). В сектора на изкопаемите горива добивът, преработката и разпределението на нефт и газ представляват 23 %, а добивът на въглища – 12 % от емисиите. В сектора на отпадъците депата за отпадъци и отпадъчните води съставляват около 20 % от емисиите. В селскостопанския сектор емисиите от животновъдството, свързани с оборския тор и ентералната ферментация, представляват около 32 %, а отглеждането на ориз – 8 % от емисиите.

В селското стопанство емисиите от ентерална ферментация и оборски тор представляват около 32 % от световните антропогенни емисии. Отглеждането на ориз допринася за още 8 % от антропогенните емисии. Селскостопански отпадъци допринасят за около 1 % или по-малко. Емисиите от някои подсектори показват големи несигурности в съществуващите инвентаризации, по-специално за отглеждането на ориз и др. (Таблица 2.1). При изкопаемите горива емисиите при добива, изпомпването и транспортирането на нефт и газ представлява около 23% от всички антропогенни емисии, а въгледобива допринася за още около 12% от тях. Секторът на отпадъците, който включва депата за отпадъци, пречиствателните водни съоръжения и управлението на отпадъците са друг съществен компонент, който съставлява около 20 % от глобалните антропогенни емисии.

В целия свят депата за отпадъци са третият по големина източник на метан. Понастоящем 70% от отпадъците в световен мащаб се депонират, като често по нерегламентиран начин. Освен това според прогнозите на Световната банка до 2050 г. генерирането на отпадъци ще се увеличи с 60 %. Ето защо е от належащо да намалим емисиите на сметнишни газове в целия свят.

По данни на ЕВРОСТАТ почти половината от европейските държави-членки все още изхвърлят на сметницата над 40 % от битовите си отпадъци. Само през 2018 г. емисиите на метан от депата за отпадъци в 27-те държави членки на ЕС плюс Обединеното кралство са генерирани около 100 млн. тона еквивалент на CO₂ (източник ЕАОС) и представляват над 20% от общите европейски емисии на метан. Според данни на ЕРА - САЩ (<https://www.epa.gov>) депата за отпадъци са сред най-големите източници на метан в страната, който се отделя при разлагането на органични отпадъци, като остатъци от храна, дърво и др. Съединените щати са третият по големина източник на метан в света.

Дистанционното наблюдение на метана от самолет от април 2021 г. показва (фиг. 2.8), че газовите потоци на депото River Birch край Ню Орлиънс идват от активната част на съоръжението (вляво), където всеки ден се добавят нови отпадъци, а също и от вентилационната шахта (вдясно). Изследователите изчисляват, че скоростта на изпускане на метан е около 2 тона/час, или 48 тона/ден (Bruggers et.al. 2021).

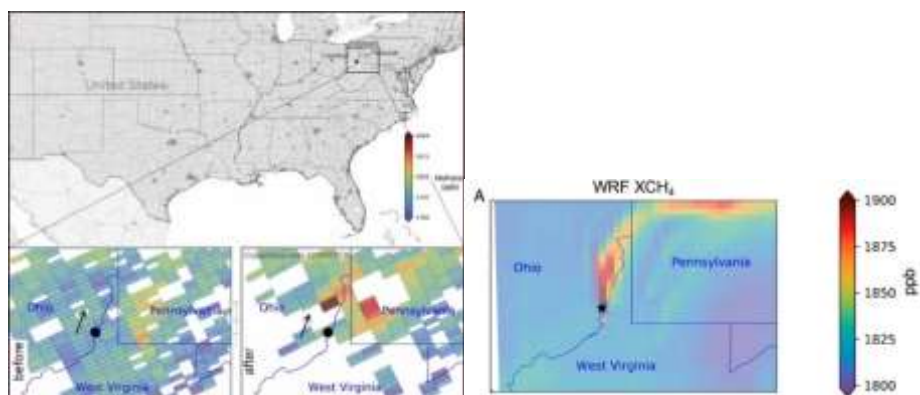


Фиг. 2.8. Газови потоци от депото River Birch край Ню Орлиънс, САЩ. Източник: University of Arizona, Arizona State University, NASA JPL and Carbon Mapper. (Bruggers et.al. 2021)

Както бе отбелязано по-горе, въгледобива допринася за около 12% от световните емсии на метан. Индустрията за изкопаеми горива е един от най-големите източници на антропогенен метан в атмосферата, дължащ се предимно на секторите газ и нефт (по цялата верига от добива до изгарянето). Но добивът на въглища може да има значително по-голям принос за нивата на парниковия газ, като се очаква емисиите от тази индустрия да нараснат значително през следващите години (Kholod et.al 2020). Към настоящето въглицата, които отделят 75 % повече CO₂ за единица енергия, са сравнително пренебрегнати, когато става въпрос за метан. Но те също могат да бъдат мощни емитери на този парников газ. Метанът се отделя от въглищните пластове и често се отвежда чрез вентилационни системи, за да се осигури безопасна среда за миньорите (Gabbatiss J., 2020). Въгледобивният метан е сравнително слабо проучен. В прогнозата си за световната енергетика (WEO) от 2019 г. МАЕ (<https://www.iea.org>) определя общото количество метанови емисии в световен мащаб на 40 млн. тона (Mt) всяка година от действащите въглищни мини. Според МАЕ държавите с по-дълбоки въглищни мини и по-слаб регулаторен надзор имат по-високи нива на тези "непреки" емисии на метан, а най-голям принос има Китай.

В проучването на (Kholod, N. et al. 2020) за първи път е представена методология за оценка на глобалните емисии на метан от стари минни обекти, която показва значителна роля на метана от изоставени мини – факт, който доскоро почти е бил пренебрегван. С отчитането на този фактор емисиите на метан от въгледобив през 2020 г. се оценяват на около 114 млн. тона. Все пак трябва да се има предвид, че е налице несигурност в количествените оценки, дължаща се на въпроси като начина на измерване на метана, а също и на вида на въглицата и дълбочината на мините (Kholod, N. et al. 2020).

Благодарение на новите сателитни данни с висока пространствена разделителна способност вече е възможно да се регистрират огромните количества емисии, включително и умишлени изпускания на метан, известни също като "вентилиране" (ESA – Copernicus, Sentinel-5P, March 2021). Чрез комбиниране на данни от мисиите Copernicus Sentinel-5P и Sentinel-2, заедно с алгоритми с изкуствен интелект, за периода 2019-2020 г. от Каугрос регистрират общо 13 случая на емисии на метан със скорост до 164 тона/час по газопровода Ямал-Европа. От Каугрос заявяват, че броят на регистриране от тях емисионни събития над Русия се е увеличил с 40% през 2020 г. спрямо 2019 г., въпреки намаления обем на износ на руски газ за Европа заради пандемията COVID-19 с 14% (по данни на МАЕ). Големи изпускания на метан за същия период са открили от Каугрос и в САЩ от многобройни емисии, свързани с добива на шистов петрол, както и в други държави като Казахстан (ESA – Copernicus, Sentinel-5P, March 2021).



Фиг. 2.10. Метанова емисия след експлозия в сонда за природен газ в Охайо, САЩ (февруари, 2018). Източник: Модифицирани данни от Copernicus Sentinel (2018 г.), обработени от SRON. (Pandey et.al. 2019)

През февруари 2018 г. отново с помощта на данни от спътника Copernicus Sentinel-5P е регистрирана експлозия в сонда за природен газ в Охайо (фиг. 2.10), в резултат на която в атмосферата са изпуснати над 50 000 тона метан (Pandey et.al. 2019). В рамките на 20 дни взривът е освободил повече от този мощен парников газ, отколкото по-голямата част от европейските държави изпускат за една година от своите петролни и газови индустрии. Данните от инструмента TROPOMI на спътника Copernicus Sentinel-5P показват, че в резултат на взрива се отделят 120 тона метан на час. Мястото на експлозията е отбелязано с черна точка на изображението и показва емисиите на метан преди и след взрива.

Подобни измервания на Sentinel-5P показват, че спътниците са в състояние да измерват концентрациите на парникови газове, изпускани от точков източник (Zehner C., 2019).

Спътниковото дистанционно наблюдение представлява изключително важно средство за системно наблюдение на точковите емисии от регионите за добив на нефт и газ по света (Jacob et.al. 2016; Irakulis-Loitxate et al, 2021). Мисията Sentinel-5P/TROPOMI, изстреляна през 2017 г., е важна стъпка към мониторинга на емисиите на метан от космоса (Pandey S. et.al. 2019; Schneising O. et.al 2020; de Gouw J. A. et.al 2020), но размерът на пиксела ѝ от 7 km обикновено не позволява вземането на проби от отделни точкови източници (Cusworth et.al, 2018). Вместо това извличането на метан от данни с висока пространствена разделителна способност (~30 m) може да се извърши с помощта на сателитни спектрометри за изображения (Cusworth et.al 2019), които разменят фината спектрална резолюция на TROPOMI за фина пространствена резолюция (Irakulis-Loitxate et.al 2021). Този компромис не позволява извличането на малки източници на метан, но е идеален за откриване на големи точкови източници, както е демонстрирано по време на метановия взрив в Aliso Canyon (Thompson et.al 2016)

2.4. САТЕЛИТИ, ИЗТОЧНИЦИ НА ДАННИ ЗА МЕТАН

Все повече спътници за измерване на метан са в орбита или в процес на проектиране, като към настоящия момент съществуват две основни категории: сателити за глобално картографиране и такива за изследване на точкови източници. Детекторите за глобално картографиране са предназначени за идентифициране и количествено определяне на широки модели на емисии в много широк мащаб. Водещ пример за това е инструментът TROPOMI на ЕКА. За разлика от тях, детекторите за точкови източници са създадени за измерване на относително големи емисии на метан от конкретни предварително определени места. Най-добър пример за това е GHGSat. Вече е налице и нов подход, който е разработен в MethaneSAT. Този апарат има много по-широко зрително поле и много по-висока прецизност (което означава, че е по-чувствителен) от системата с точкови източници, както и много по-нисък праг на откриване и по-висока пространствена разделителна способност в сравнение с глобалния картограф.

Връзка между местоположението на спътника и събирането на данни

Сателитите GOSAT, GOSAT-2, Sentinel-5 Precursor, GHGSat, MethaneSat, TANGO са проектирани да работят в полярна, слънчевосинхронна орбита, известна като ниска земна орбита (LEO). Орбитите LEO

се определят като орбити с височина между 200 и 1000 km. Спътниците в LEO се движат по своите орбити за около 100 минути със скорост приблизително 7.6 km/s, докато Земята се върти под тях. Тъй като спътниците в LEO се намират в непосредствена близост до Земята, те могат потенциално да предоставят висококачествени данни на изображения с умерени размери на сензорите; те са по-евтини и отнемат по-кратко време за изграждане. От друга страна, спътниците на LEO не са в състояние да осигурят непрекъснато покритие на определени места на повърхността на Земята. Обратно, спътниците в геостационарна орбита са в състояние да поддържат непрекъснато събиране на данни върху целеви географски места. Такъв е спътникът GeoCarb (Geostationary Carbon Observatory), който е планиран за изстрелване в началото на 2024 г. и се очаква да извършва 10 милиона ежедневни наблюдения на концентрацията на метан и въглероден диоксид в Северна и Южна Америка от геостационарна орбита с дължина 35 000 km. Тъй като геостационарните спътници работят много по-далеч от Земята, отколкото LEO спътниците, техните сензори имат по-голямо зрительно поле. Спътниците в геостационарна орбита се движат със скорост, равна на скоростта на въртене на Земята, и непрекъснато наблюдават едни и същи места. Например GeoCarb би позволил непрекъснато покритие на Северна и Южна Америка от южния край на залива Хъдсън до южния край на Южна Америка.

За периода 2002 ÷ 2022 година са налични или се във финална фаза за начало на редовна експлоатация редица спътници, измерващи вертикалната колона метанови емисии:

- Първа генерация сателити: Sciamachy - European Space Agency. Пространствена разделителна способност: 30x60 km. Период: 1.5 дни. Начало – 2002.
- Втора генерация сателити: GOSat - Japanese Agency.
Пространствена разделителна способност: 10x10km. Период: 3 дни. Начало – 2009.
- Сателит: GHGSat Claire.
Пространствена разделителна способност: 50x50 m. Период: 1 ден. Начало – 2016.
- Сателит: Sentinel 5P – European Space Agency.
Пространствена разделителна способност: 7 x 5,5 km. Период: 1 ден. Начало – 2017.
- Трета генерация сателити: MethaneSat.
Пространствена разделителна способност: 100 x 400 m. Период: 1 ден. Начало – 2022.

По-долу са представени някои характеристики и сравнителни данни за отделните инструменти.

GOSAT - Japanese Agency

GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) е японски спътник, предназначен за измерване на парникови газове (данни за концентрацията на CO₂ и CH₄) от космоса. Основната цел на проекта GOSAT (<http://www.gosat.nies.go.jp/en>) от извеждането на апарата в орбита на 23 януари 2009 г. е да се оценят емисиите и поглъщанията на парникови газове в субконтинентален мащаб (няколко хиляди квадратни километра); да се подпомогне екологичната администрация при оценяването на въглеродния баланс на земната екосистема и извършването на оценки на регионалните емисии и поглъщания. Друга важна задача е натрупване на нови знания за глобалното разпределение и времевите изменения на парниковите газове, а също и за глобалния въглероден цикъл и неговото влияние върху климата, които нови знания бъдат използвани за прогнозиране на бъдещи климатични промени и оценка на тяхното въздействие. GOSAT се осъществява NIES (NIES, Japan <https://www.nies.go.jp/index-e.html>), основните задачи на което включват разработване на алгоритми за изчисляване на колоновите съдържания на CO₂ и CH₄ от данните от наблюденията на GOSAT, валидиране и оценка на резултатите, както и разработване и подобряване на числени модели за оценка на източниците и поглъстителите на CO₂ и CH₄. Продуктите от данни за CO₂ и CH₄ на ниво 4 се публикуват съответно от декември 2012 г. и юли 2014 г.

GOSAT-2 Japanese Agency

GOSAT-2 (Greenhouse gases Observing SATellite 2) е наследник на GOSAT и е изстрелян на 29 октомври 2018 г. с проектен живот от 5 години. Една от основните мисии на GOSAT-2 е да продължи и

подобри космическите измервания на основните парникови газове от космоса, започнати от GOSAT. Дизайнът му е базиран на спътника ALOS-2 на JAXA, изстрелян през 2014 г. Основните изисквания към космическия апарат GOSAT-2 са обобщени в Таблица 3.

	GOSAT-2	GOSAT
Orbit type	Sun synchronous	Sun synchronous
Local equator crossing time in a descending node	13:00 ± 0:15	13:00 ± 0:15
Altitude	613 km	666 km
Repeat cycle	6 days	3 days
Dimension (When expanded in orbit)	Y:5.3 m x Y:2.0 m x Z:2.1 m (Y:16.5 m)	X:3.7 m x Y:1.8 m x Z:2.0 m (Y:13.7 m)
Mass	< 2,000 kg	1,750 kg
Power	5.0 KW	3.8 KW

Табл. 3. Сравнителни данни за GOSAT и GOSAT-2

Sentinel-5P TROPOMI

Основната цел на Copernicus Sentinel-5 Precursor е да извършва атмосферни измервания с висока пространствено-времева разделителна способност, които да се използват за мониторинг и прогнозиране на климата и качеството на въздуха. Спътникът е изстрелян на 13 октомври 2017 г. с монтиран на борда си инструмент TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). Мисията Copernicus Sentinel-5P намалява пропуските в наличността на глобални продукти от атмосферни данни между SCIAMACHY/Envisat (която приключи през април 2012 г.), мисията OMI/AURA и бъдещите мисии Copernicus Sentinel-4 и Sentinel-5. Предоставянето на данни за колони тропосферен озон и метан започва от 1 март 2019 г. Sentinel-5P е с ниска околоземна орбита и е проектиран за седемгодишен експлоатационен живот.

Орбитата на Sentinel-5P е квази полярна, слънчевосинхронна, с голяма инклинация (приблизително 98,7°). Орбиталният цикъл е 16 дни (14 обиколки на ден, 227 обиколки на цикъл). Референтната височина на орбитата е приблизително 824 km. Важна особеност на мисията Sentinel-5P е синергичното използване на едновременни измервания на данни от визуализиращи устройства от пакета VIIRS (Visible/Infra-red Imager and Radiometer Suite), качен на спътника Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership) на NASA/NOAA (мисията NPP започна на 28 октомври 2011 г.).

Инструментът TROPOMI е съфинансиран от ЕКА и Нидерландия и има следните основни характеристики:

- Широчина на полоса: 2 600 km;
- Пространствена разделителна способност: 7x7 km²;
- 4 спектрометра, всеки електронно разделен на две честотни области (2 в UV, 2 във VIS, 2 в NIR, 2 в SWIR);
- Планирано време на експлоатация - 7 години;
- Обем на генерираните данни: 139 Gbits на пълна орбита.

Съществуват различни продукти от данни, свързани с трите нива на обработка на TROPOMI. Продуктите от ниво 1B и ниво 2 са достъпни от центъра за свободен достъп на програмата Copernicus. Продуктите от ниво 0 не се предоставят на обществеността и включват инженерни данни, спомагателни данни за спътника (за позицията, положението), сензорни данни от 4-те спектрометра за атмосферни и за калибрационни измервания, и др.

Продуктите от ниво 2 са:

- геолокализирани общи колони на озон, серен диоксид, азотен диоксид, въглероден оксид, формалдехид и метан;
- геолокализирани тропосферни стълбове на озон;
- геолокализирани вертикални профили на озона;
- геолокализирана информация за облаци и аерозоли (напр. индекс на абсорбиращия аерозол и височина на аерозолния слой).

GHG Sat Claire

GHGSat (<https://www.ghgsat.com/en/>) е инициатива на New Space, която използва данни от Copernicus Sentinel-5P за картографиране на горещите точки на метан - а сателитът Claire вече е събрал над 60 000 измервания на метан от промишлени съоръжения по целия свят. С помощта на данните от TROPOMI демонстрационният спътник на GHGSat Claire може да открива точкови източници на метан, като ги свързва с конкретни промишлени съоръжения в отрасли като нефт и газ, управление на отпадъци, минно дело, селско стопанство и производство на електроенергия.

GHGSat Claire е изстрелян на 21 юни 2016 г. и е пуснат в експлоатация един месец след изстрелването, като първите изображения са публикувани през есента на 2016 г. Claire обикаля около Земята приблизително 15 пъти на ден, като извършва няколко различни вида измервания:

- Инфрачервена снимка на обекта на клиента;
- Еднократна карта на концентрацията на обекта;
- Целогодишен мониторинг, включително оценки на нивото на емисиите.

След демонстрационния спътник Claire GHGSat планира до 2022 г. да разполага със съзвездие от 10 спътника, като следващият от тях - Iris, ще може да открива още по-малки изтичания на метан. Iris предлага пространствена разделителна способност от 25 m в сравнение с разделителната способност от 50m на Claire, което позволява още по-точно проследяване на метана. От GHGSat планират първоначално да предоставят визуализация на метана в мрежа със средни размери 2×2 km навсякъде по сушата. Потребителите ще могат да увеличават мащаба на решетката, за да проучат географските модели и горещите точки на метан. Освен това GHGSat предоставят и измервания на емисиите на метан с по-висока разделителна способност - до 25×25 m, в рамките на платена абонаментна услуга.

PRISMA – Italian Space Agency

Мисията PRISMA е изстреляна на 21 март 2019 г. и може да работи в два режима - първичен и вторичен. Основният режим на работа е събиране на хиперспектрални и панхроматични данни от конкретни индивидуални цели, поискани от крайните потребители. При вторичния режим на работа мисията ще изпълнява конкретна "фонова" задача, която ще събира изображения, за да може ресурсите на спътника и на низходящия канал да бъдат напълно използвани. PRISMA има възможност за придобиване, сваляне и архивиране на изображения от всички хиперспектрални/панхроматични канали с обща площ 200 000 km² дневно в основната зона на интерес, в диапазона 70° ю.ш. и 70° с.ш. Капацитетът ѝ за придобиване на непрекъснати ленти е до 1800 km и събиране, изтегляне и обработка на данни до максимум 200 000 km² на ден. Дневният капацитет за обработка на хиперспектрални изображения е 200 (30 km \times 30 km). Средната височина на орбитата е около 615 km с цикъл на повторение 29 дни (430 обиколки).

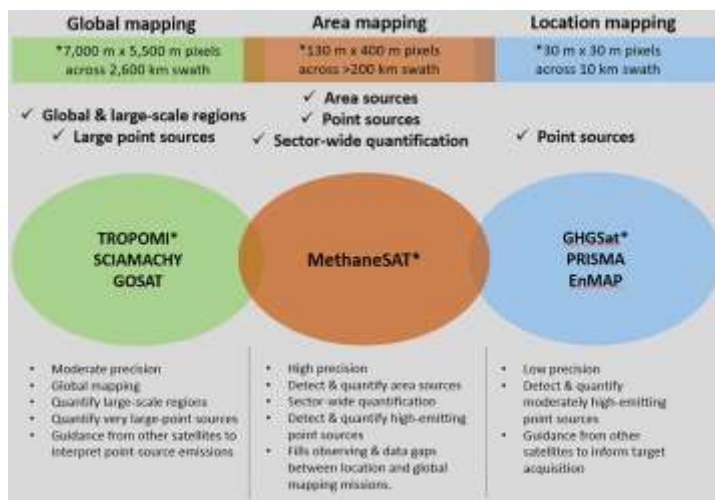
MethaneSAT

Основната мисия на MethaneSAT (<https://www.methanesat.org>) е да осигури редовен мониторинг на регионите, в които се извличат над 80 % от световния добив на нефт и газ, като определя не само местоположението, но и количествено нивото на емисиите с много висока точност. MethaneSAT ще може да измерва също така метана от промишленото селско стопанство и други източници и е в график за изстрелване от 1 октомври 2022 г. 350-килограмовият сателит ще покрива 260-километрова лента на заснемане. Сензорът е с висока разделителна способност (100 \times 400 m на пиксела) и има възможност за прецизно определяне на разлики в нивата на метан с прагова стойност 2ppb.

MethaneSAT заема мястото между спътниците за глобално картографиране и спътниците за проследяване на точкови източници (фиг. 2.12). Съществуващите в момента глобални картографи, като TROPOMI, който има пиксел с размер 7000 x 7000 m, могат да откриват само големи индивидуални

точкови източници, от порядъка на няколко хиляди килограма или повече на час, или много големи излъчващи площни източници. Поради широкото си зрително поле, съчетано с много прецизни сензори, MethaneSAT ще може да определя количествено емисиите в райони с различни видове емитери, независимо дали става въпрос за малки и разпръснати източници или за големи и концентрирани такива.

MethaneSAT е проектиран така, че да бъде по-прецизен от системите за точкови източници, като прецизността на измерването на метана е поне 10 пъти по-чувствителна, като в същото време осигурява 20 пъти по-голям обхват от инструмента GHGSat Iris, който има зрително поле от 12 km с относително висок праг на откриване на концентрация на метан от ~50 части на милиард.



Фиг. 2.14. Схематично представяне на сателити, измерващи метан

TANGO

TANGO е съкращение от Twin Anthropogenic Greenhouse gas Observers (двойни наблюдатели на антропогенни парникови газове). ISISpace, SRON, KNMI и TNO проектират двойна сателитна система, която може да измерва емисиите в отделни промишлени съоръжения с пространствена разделителна способност от около 300 м x 300 м.

Маневрените спътници TANGO ще могат на всеки три до четири дни да се насочват директно към известни източници на емисии на парникови газове и да ги измерват точно. Това позволява да се определят публично достъпните данни за емисиите и тенденциите, тяхното географско разпределение, вариациите им през годината и въздействието на мерките за намаляване на емисиите. След изстрелването си през 2024 г. данните на TANGO ще подобрят откриването на източници на CO₂ и CH₄, извършвано от мисията Sentinel 5 на ЕКА и ще бъдат ценно допълнение към данните от основните европейски сателитни мисии.

Мисията TANGO ще използва два инструмента Spectrolite за измерване:

- Емисиите на CO₂, по-големи от 5 млн. тона годишно, например от електроцентралите, които само в ЕС представляват около 44 % от годишните емисии на CO₂;
- Емисии на CH₄, по-големи от 10 хил. тона годишно, например от инсталации за добив на нефт и газ, сметища и въглищни мини, които само в ЕС се оценяват на около 68 % от общите емисии на метан;
- Емисии на NO_x, които ще подобрят откриването на емисии на CO₂, извеждането на историческите тенденции на емисиите на CO₂ въз основа на леснодостъпни глобални измервания на NO_x, както и разграничаването на възможния принос на CO₂ в смесени емисии на CH₄ и CO₂.

Глава 3. Обекти и методика на изследване на атмосферни замърсявания с метан посредством спътникови данни

3.1. Анализ на проблема за регистриране и количествено определяне на емисиите на метан. Предимства и недостатъци на спътниковата технология.

Количественото определяне на емисиите на метан се осъществява посредством един от следните два метода: емисионни фактори, вкл. инженерни изчисления, и преки измервания (NASE&M, 2018; Brown P. et.al, 2020; Methane Guiding Principles, 2020). При емисионните фактори е необходимо да имаме конкретна информация за вида и броя на източниците, времето на работа на съоръжението/оборудването и др. По същество те представляват степен на интензивност на емисиите (например маса за единица време, маса за единица енергия и т.н.) и това е бърз метод за получаване на количествена оценка. При прякото измерване емисиите се определят количествено при източника (Heath G. et.al, 2015; Haugland T., 2019; NASE&M, 2018). Обикновено се прилага комбинация от технологии, като една от тях се използва за откриване на наличието на метан (например части на милиард), а друга - за измерване на дебита или потока, от който се определя нивото на емисиите (Marcogaz, 2021; Haugland T., 2019; Methane Guiding Principles, 2020). Най-общо тези технологии могат да бъдат класифицирани като методи "отдолу-нагоре" или "отгоре-надолу". Примери за технологии за дистанционно наблюдение по метода „отгоре-надолу“ са дроне, самолети, спътници и др. (Brown P. et.al, 2020, Methane Guiding Principles, 2020).

В действителност са налице значителни разлики при сравняване на оценките на емисиите при двата подхода, като тези разлики варират между 60 и 200% в зависимост от прилаганите критерии (Alvarez et al, 20218). За последните пет години като най-обещаваща се очертава спътниковата технология поради бурния си темп на развитие в количествена и качествена посока, в т.ч. количеството и бързината на обработка на предоставената информация, широкият спектър от области на приложение и т.н. (EU Methane Strategy, 2020, Elkind J., et.al, 2020, Zhang Y. et.al, 2019). Но използването на спътници има редица ограничения и известна степен на несигурност, особено по отношение на оценките на емисиите, които е задължително да бъдат преодолени, за да може тази технология да се наложи като стандарт и да повиши доверието в предоставените данни. Въпреки това спътниците биха могли и вече променят начина, по който се отчитат емисиите. Те дават обещаващи резултати при създаване на профили на емисиите, в средносрочния и дългосрочния мониторинг, и са изключително полезни при проследяване на това дали целите за емисиите се изпълняват. Резултатите и анализите, които предоставя спътниковата технология, може да бъдат от голяма полза за редица международни организации и правителства в борбата с изменението на климата (Cooper J. et. al., 2022).

По своята същност спътниците с ниска и средна пространствена разделителна способност не са предназначени за идентифициране и количествено определяне на емисиите от точкови източници, а по-скоро за изследване на емисиите метан от съоръжения и обекти, разположение на големи площи, както и проследяване и анализ на преноса на средни и далечни разстояния (Cooper J. et. al., 2022). Най-общо казано, те са технология за откриване, тъй като измерват концентрацията на пиксел, но при определени обстоятелства, например много високи емисии, могат да се използват и за количествена оценка.

Към днешна дата все още има няколко основни фактори, които редуцират областите на приложение и ограничават качеството на данните на спътниците за атмосферни измервания. Такива са наличие на облачна покривка над зоната на изследване, ниско алbedo, вятър, липсващи пиксели, високо аерозолно съдържание в атмосферата, релефът на повърхността, високопланински райони и др., всички те с различна степен на влияние.

3.2. Избор на спътникови данни за изследване на метанови емисии.

Критерии за избор на данните

Въз основа на пространствените характеристики на атмосферните процеси атмосферното замърсяване може да се изследва в различни мащаби. За глобални явления, например пясъчни бури, най-подходящо е да се използват сателитни данни с ниска пространствена разделителна способност и широк

пространствен прозорец. Замярявания с ограничени пространствени мащаби, причинени от точкови и районни източници, разположени на или близо до повърхността, е по-добре да се изследват, като се използват спътникови данни с висока пространствена (от порядъка на 10 до 50 m) и времева (от порядъка на часове) разделителна способност, както и измервателни станции, разположение на повърхността, ако целта е получаване на прецизна количествена оценка за емисията.

Сателитни данни със средна пространствена разделителна способност

С подобряване на пространствената разделителна способност на сателитните снимки става възможно разширяването на областта им на приложение. Особено това се отнася за данни със средна времева (веднъж на ден) и пространствена (от 3 до 7 km на пиксел) разделителна способност, като спътника Sentinel-5P на ЕКА. Но за всички тях съществува една важна величина, която се нарича минимална граница на откриване (МГО). МГО ограничава откриването до определени прагове на нивата на емисии и се изчислява на базата на прецизността на инструментата и точността на сензора (Cooper J. et. al., 2022).

Спътниците със средна пространствена разделителна способност, въпреки относително високата си МГО, могат бързо да сканират големи площи и съответно бързо да идентифицират всички свръхизточници в дадена област (разбира се, ако нивото на емисиите е над МГО). В категорията свръхизточници може да включим и такива с нива на емисии, по-ниски от МГО на сателита, при условие, че те имат постоянни във времето емисии.

Друг важен компонент при използването на спътникови изображения е калибрирането и обработката на получените данни. Калибрирането най-често се извършва във времето, непосредствено след изстрелване на спътника, и на практика за повечето спътници периодично се прилагат подобрени модели по време на работа за повишаване на прецизността. Обработката на получените данни е ключов фактор при използването на спътниците. Към момента количественото определяне на емисиите с помощта на сателитни изображения изисква значителни човешки, времеви и технически ресурси. Трябва да се има предвид, че използването на спътниците за количествено определяне на емисиите има още един ограничаващ фактор. Дори и при достатъчно висока разделителна способност те са пряко зависими от разделителната способност на метеорологичните мрежи. (Ershadi A. et.al., 2013; Pendergrass W., 2017).

Една от основните трудности при използване на спътникови изображения със средна пространствена разделителна способност е липсата на определен процент пиксели от заснетата област. Този процент варира според условията и вида на замърсител. Например, на базата на данните от TROPOMI по отношение на метана този процент е значително по-нисък спрямо NO₂ и CO от същия източник. Данните от сензора TROPOMI на спътника Sentinel-5P осигуряват два източника на информация относно липсващите стойности: околните налични пиксели в същото изображение и съответните пиксели във времевата последователност на заснемане за същия пиксел/място. Използването на фокусни функции (средна стойност, медиана или мода), които интерполират липсващите стойности от съседни пиксели, е едно от решенията. Но по-важно е усилията да се фокусират върху намирането на промени в зоните с липсващите пиксели от заснетата област, вместо да се търси начин за изкуствено генериране на моментна стойност на липсващите пиксели. Това ще ни осигури по-голяма достоверност в определяне на фоновото ниво на емисиите на изследвания регион, но също така и поглед върху тенденциите в изменението им.

В настоящия дисертационен труд са използвани предимно данни със средна пространствена разделителна способност от спътника Sentinel-5P, който осигурява ежедневно заснемане. Но както бе споменато по-горе, дори и да имаме 100% покритие на изображението, това все пак е моментна снимка на състоянието на атмосферата над областта на заснемане. А това означава, че всяка друга снимка условно часове преди или след базисната може да дава различна информация. Поради това за решаване на проблема с липсата на пиксели трябва да се търсят и други подходи. Всяко това показва, че в зависимост от процента налични данни за дадена област на интерес сателитните изображения със средна пространствена разделителна способност са отлично средство за определяне на фоновите концентрации на метан, за проследяване на тяхната динамика, за откриване на източници със среден и висок обем на емисии, за проследяване на темпа им на почистване/разсейване в атмосферата, за определяне площите с високи нива на концентрации на метан в резултат от нерегламентирани емисии и по този начин (с отчитане и на метеорологичните данни) за определяне степента на влияние, което тези концентрации оказват върху локалните и регионални изменения в климата. Тези данни, обаче, не са особено подходящи за количествено определяне на емисиите на метан от постоянен или периодичен източник със среден или нисък интензитет, но могат да помогнат за тяхното откриване.

Извод: Всички описани по-горе трудности относно количественото определяне на емисиите са с различна тежест и могат да бъдат до известна степен преодолявани независимо една от друга. Но те не могат да бъдат комбинирани, за да получим обобщена стойност на несигурността в получените стойности. Разбира се, важно е те да бъдат взети предвид, когато се правят опити за съгласуване на оценките на емисиите.

Sentinel-5P

На основата на всички описани по-горе предимства и недостатъци на наличните спътникови данни за целите на изследване в настоящия дисертационен труд бе взето решение да се използва информацията, предоставена от сензора TROPOMI на спътника Sentinel-5P. Той е продукт на Европейската космическа агенция и се намира в слънчевосинхронна орбита. Данните от него са със свободен достъп и са налични от 2 до 4 дни след заснемането, което е ежедневно, с ширина на лентата 2600 km, местно време на прелитане около 13 ч. и пространствена разделителна способност от $7 \times 5.5 \text{ km}^2$ (от август 2019; $7 \times 7 \text{ km}^2$ от старта на мисията) (Varon, D. et al, 2019; Pandey, S. et al, 2019; Cusworth, D. et al, 2018). Стойността за метан xCH4 е средната за колоната суха молекулна фракция и е продукт от данни от ниво L2 (потребителски данни). Изразява се в единици части на милиард (ppb). За изследването се използват само данни без облаци и се премахват пиксели с оптична дебелина $> 0,07$ и алbedo в SWIR $< 0,02$. Тези прагове на филтриране са в съгласие с препоръките за използване на данните, предоставени от SRON (Plant G et al, 2022). Данните от Sentinel-5P се публикуват във формат netCDF и са с неправилна геометрия, поради което е необходимо геореферирание. Този процес се извършва в две фази с помощта на продукта за обработка на изображения на Sentinel – SNAP. Това е времеемка работа, но за данните от TROPOMI е задължителна стъпка. След георефериранието полученият файл се зарежда в ArcMap, където се извършва изрязване на областта на интерес с цел минимизиране на обема на файла с оглед необходимата изчислителна мощ и намаляване времето за работа на системата. За целия времеви интервал на прочуването за всеки ден от годината и за всяка област на интерес се извършва проверка за наличие на достатъчно данни за анализ (достатъчно на брой налични пиксели).

3.3. Обекти и област на изследване за емисии на метан с антропогенен характер

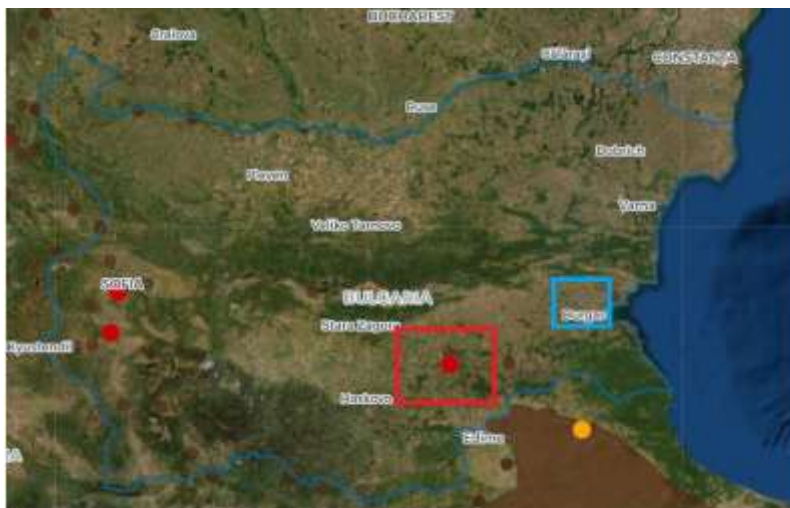
Една от основните цели на представената научна работа е да се изследват емисиите на метан във въгледобивни райони, тъй като този сектор от енергетиката е все още много слабо проучен по отношение на по-коректното определяне на метановите емисии. Все повече се налага становището, че емисиите на метан от въглищни мини са значително подценени (Kholod, N. et al. 2020) и е твърде вероятно оценката за тях да е от порядъка на 120 – 150 МТ годишно, т.е. от три до четири пъти по-висока спрямо докладваните към днешна дата. Причините за значителните разлики в оцените са няколко и имат разнороден характер, но предвид много високия процент в дела от общото количество емисии е важно отразяват да бъде доста по-детайлно проучен.

Настоящият дисертационен труд е част от по-широкомащабна изследователска работа по проследяване на емисиите на метан от въгледобивните райони в Германия, Полша, Чехия, Румъния, Сърбия, България, Турция, Казахстан, Русия и обхващаща четиригодишен времеви интервал от май 2018 до април 2022 г. В работата се проследяват и емисиите на метан в Туркменистан, които са дължат изцяло на петролния и газовия сектор. За по-голяма компактност тук са представени резултатите от изследванията посредством спътникови данни със средна разделителна способност в три от тези области на интерес – територията на България, с акцент две зони с най-големи концентрации на метан – въгледобивния район югоизточно от Стара Загора и региона около нефтепреработвателния комплекс, западно от Бургас (фиг.3.2); територията на Туркменистан (фиг. 3.3.); и най-големият въгледобивен район в Русия – Кемеровска област – територията между градовете Кемерово и Новокузнецк в югозападен Сибир (фиг.3.4.). Използваните данни са от сензора TROPOMI на спътника Sentinel-5P на Европейската космическа агенция и обхващат четиригодишен период от време от май 2018 до април 2022 г. включително.

Изборът на тези три области е направен по няколко основни причини:

В България има няколко въгледобивни района, като най-големият е т.нар. Маришки басейн (фиг. 3.2, червеният участък). Нашата страна е интересна с това, че са налице няколко разнородни източника на метанови емисии. Освен споменатите въгледобивни басейни, се наблюдават периодични емисии от

петролният и газови сектор, в частност района на нефтепреработвателното предприятие, северозападно от Бургас (фиг. 3.2, синият участък), няколко точки в североизточна и северна България по линия на газопроводни системи, като района около гр. Плиска, североизточно от Шумен, също така секторите селско стопанство и отпадъци. Освен това фоновите нива на метан в България се влияят и от преноса на метанови емисии от съседните страни, най-често идващи от три посоки – север-североизток от Румъния; северозапад-запад от Румъния и Сърбия; и югоизток - от Турция. Като цяло, в България емисиите на метан, включително от въгледобив, са относително по-ниски както спрямо съседните ни страни, така и на континентално ниво. Особено контрастно е това, както се вижда от изследванията, представени по-долу, спрямо другите две области на интерес.



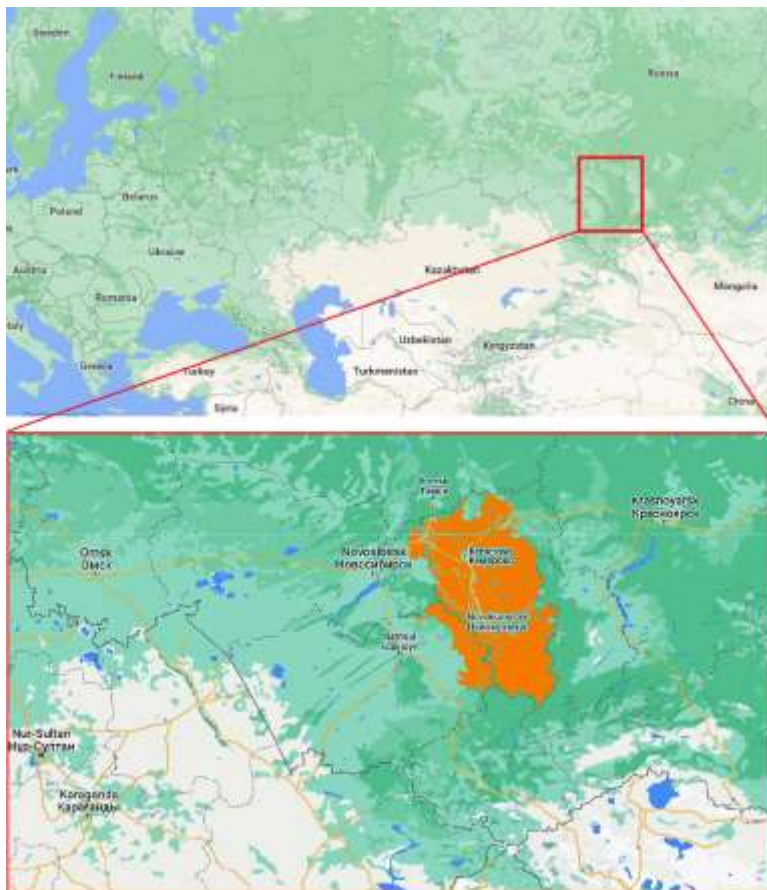
Фиг. 3.2. България. *Източник globalenergymonitor.org.*



Фиг. 3.3. Туркменистан. *Източник Google map*

Кемеровска област в Русия, югозападен Сибир (фиг.3.4), е интересна по няколко причини – това е най-големия въгледобивен район в страната с над 70 мини в цялата област, в него се намира най-голямата подземна и най-голямата изобщо мина в Русия – Распадская. Както се установи в хода на изследването, това е региона с най-големи емисии на метан в цяла Русия изобщо от добивния сектор. Друга много важна причина за избора на този регион, е че емисиите на метан, азотни оксиди и въглероден оксид са почти изцяло от въгледобивния отрасъл и много малка част се генерират от други източници, като например големи градски агломерации, характерни за централните и западно европейски области. В Кемеровска област единствените две големи градски агломерации са Новокузнецк и Кемерово, които извън сектор енергетика се характеризират с относително много по-ниски емисии на NO_2 , CO и метан спрямо еквивалентни градски центрове с подобна гъстота на населението в Европа например. Тук сектор енергодобив е основен отрасъл, генериращ по-голямата част от емисиите на метан, поради което е отличен

избор за откриване и проследяването им, без да се допуска значителен риск от погрешна интерпретация. Накратко казано, в този район основният източник на метанови емисии е въгледобивния сектор, поради което той може да послужи като сравнителна база при изграждане на модели за оценка и проследяване на емисиите в хетерогенни области с няколко източника.



Фиг. 3.4. Русия, област Кемерово. *Източник Google map*

Изборът на Туркменистан (фиг. 3.3) е направен изцяло с цел сравнителен анализ. Тук няма въгледобив или въглищни електроцентрали, но въпреки това тази страна се отличава с едни от най-големите емисии на метан в света през последните няколко години, които се генерират от петролния и газовия сектор. В хода на настоящото изследване се установи и един много важен факт – въпреки огромните емисии на метан се регистрират периодично много малки или почти никакви емисии на азотни оксиди и въглероден оксид в мащаби, които да бъдат регистрирани с помощта на сателитни изображения със средна пространствена разделителна способност. Това е в ярък контраст с област Кемерово, Русия, където винаги, когато се регистрират събития с високи емисии метан в районите на въгледобив, това е съпроводено и с регистрирането на много високи нива на емисии на NO_2 и CO . Това се дължи на вида източник на тези емисии. Друга особеност е, че климатът на Туркменистан е сух, пустинен и се характеризира с малко валежи (тук се намира едно от най-сухите места на Земята – пустинята Каракум) и относително нисък процент облачно покритие през годината. Това също има важно значение при отчитане на емисиите, тъй като оказва влияние върху преноса и способността на атмосферата за очистиране.

3.4. Изследване на пространственото и времевото поведение на метановите емисии от избраните обекти.

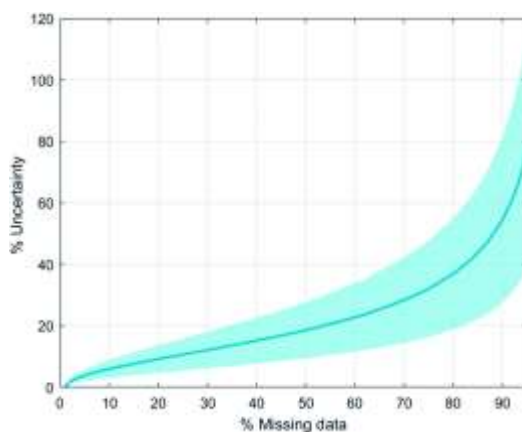
За пълноценен анализ на пространственото и времевото поведение на метанови емисии посредством сателитни данни със средна пространствена разделителна способност е необходимо да се осъществят няколко последователни стъпки.

Липсващи данни в сателитните изображения

Както бе подчертано по-горе, един от основните проблеми при изследване на метанови емисии по сателитни данни със средна разделителна способност е относително големият процент на липсващи пиксели. Ето защо е важно да определим с какви налични данни разполагаме, има ли някаква регулярност по време и място относно тази наличност и как въпросната информация може да ни помогне за решаване на поставените задачи. Поради тази причина за целия четиригодишен обхват на настоящото изследване е извършено проследяване в трите области на интерес за количеството налични данни.

В научната литература са публикувани няколко изследвания, които имат за цел количествено определяне на ефекта от липсващи пиксели върху получените крайни стойности за метана. В едно от тях се използват данни от сензора TROPOMI за пет държави (Австралия, Канада, САЩ, Иран, Саудитска Арабия) (Cooper J. et al., 2022), при което авторите допускат, че средното увеличение на метана е 5 ppb, и след прилагане на определена схема на изкуствено отстраняване на пиксели в пресмятанията се изчислява процентната грешка. Процесът се повтаря многократно и така се получават стойностите за всяко ниво на отстраняване на данни. Полученият резултат (фиг. 3.5) показва, че несигурността до голяма степен зависи от вариациите в нивата на метан в изследваната област. Там, където фоновото ниво на метан е относително стабилно, имаме ниска неопределеност дори и при голям процент на отстранени данни (Cooper J. et al., 2022). Обратно, в районите с големи колебания във фоновите нива (вероятно поради наличие на голям източник на периодични емисии) имаме значително по-висока неопределеност дори и при по-малък дял на отстранени данни. Този резултат е интересен и дава определена представа за това доколко можем да разчитаме на обобщаващи оценки за концентрациите на метан в изследваната област при съответния процент налични данни.

Проведените тестови анализи в настоящата изследователска работа по данни от сензора TROPOMI за Туркменистан показват много добро съответствие със стойностите от графиката на фиг.3.6.



Фиг. 3.6. Неопределеност в дефинирането на стойностите на CH_4 като функция на липсващите пиксели. Източник (Cooper J. et al., 2022). Използвани данни - Sentinel-5P.

Определяне на фоновите нива на метан за областта на интерес

По отношение на метана едни от най-важните показатели, които трябва да се следят, са фоновите нива. Познаването на стойностите на фоновите нива на метана за всяка област на интерес дава възможност да се проследяват сезонните и годишните тенденции в тяхното изменение, бързо да се откриват периодични или случайни емисии от нерегламентирани източници, също така проследяване на пренос от други области или редица процеси като способност за почистване (разсейване) и т.н.

В литературата за изчисляване на фоновото ниво на метана от изображения със средна пространствена разделителна способност най-често се докладват предимно два метода. При единия от тях се взема стойността на пиксела в съседство до зона с високи емисии и отчитане на посоката на вятъра. При втория метод се изчислява медианата на изображението и това ни дава стойността на фоновото ниво на метана за цялата област (ESA orbit, 2021; Cooper J. et al., 2022). Както бе подчертано по-горе, една от основните и непосредствени цели е определяне на фоновите нива (включително техните сезонни и друг

вариации) на метана за областите на интерес, след което откриването и проследяването на източниците на емисии става по-бързо и ефективно. Ето защо първият метод не е особено подходящ за използване в дългосрочен план, а по-скоро за изследване на конкретни случаи на свръхемисии. Причината е, че той изисква наличие на емисионно събитие в рамките на изследваната област, което е твърде избирателен подход. Освен това ценна информация относно нивата на фоновите концентрации остава скрита. Вторият метод също не е целесъобразен, защото метановият фон не е хомогенен и това може да внесе значителна доза неточност, ако се използват големи области на усредняване.

За надеждно определяне на фоновите нива на метана е необходимо да се раздели цялата област на заснемане на по-малки площи, като това разделение отчита локалните топографски особености (например област с еднороден релеф и близка надморска височина), както и най-важните местни атмосферни характеристики. След това всяка от тези площи се подлага на интегриран анализ на седмична база за определяне на фона по избраната методика. В настоящия дисертационен труд за определяне на фоновите нива на метан за трите изследвани тук региона се подхожда по следния начин. Първичното изображение, получено от базата данни на Sentinel-5P, се изрязва по контурите на областта на интерес. Тъй като това са големи площи (няколко хил.кв.км), директното изчисляване на фона чрез усредняване, използвайки всички налични пиксели, би довело до големи отклонения от реалните нива за съответната локална област поради евентуално наличие на аномалии (високи емисии от източници) и/или много на брой липсващи данни. Поради това областта на интерес разделяме на по-малки участъци, обусловени от близки топографски и атмосферни характеристики. За тези области фоновата стойност на метана изчисляваме по формулата:

$$(1) \quad XCH_4_{fn} = k * \mu - (k - 1) * \bar{x},$$

където XCH_4_{fn} е фоновата оценка на метана, μ е медианата, \bar{x} - средната стойност на набора от данни.

Това е една от най-популярните техники за автоматичен анализ на изображения при определяне на фона и извличане на астрономически обекти (Stetson P. 1987), (Bertin & Arnouts, 1996). Този подход е итеративен, тъй като в случая се извършва сигма-изрязване в една или няколко стъпки и се състои в следното. Цялото изображение се разделя на по-малки участъци, за които се изчислява стандартното отклонение σ . След това се премахват всички пиксели, които не попадат в интервала $\pm 3\sigma$ около медианната стойност μ . При резултат от над 95% от пикселите в този интервал се прилага формула (1), която дава фоновата стойност на метана за локализирания участък. Коефициентът k в (1) е предварително зададен. (Kendall & Stuart, 1977) определят $k = 3$, а (Bertin & Arnouts, 1996) използват $k = 2.5$ в своите изчисления. Тук ще използваме $k = 3$ като по-прецизна стойност за целите на настоящата работа. Представеният метод е широко използван от редица автори (Vikhlinin et al. 1995; Lazzati et al. 1999; Perret, Lefèvre & Collet 2009; Cooper J. et. al., 2022), като се твърди (Masias et al. 2012, 2013), че техниката със σ -изрязване понастоящем е най-разпространеният и опростен подход за обработка на астрономически изображения поради относително ниската си изчислителна тежест (Porowicz A., Smolka B., 2015).

Използваната мерна единица ([ppb]) – части на милиард) е стандартна за спътникови изображения и представлява броя на молекулите метан на 1 млрд. молекули газ в 1 м³. За преход към единици kg може да се използва следната формула:

$$(2) \quad 1 [ppm] = \frac{V_m 1\mu g \text{ gas}}{M 1 L \text{ air}},$$

където $M [g/mol]$ е молекулното тегло на метана,

V_m - стандартен моларен обем на идеален газ (при 1 бар налягане и температура 273.15K),

$$V_m = 22.71108 L/mol,$$

$$1 [ppm] = 1000 [ppb].$$

Регистриране на събития с високи емисии на метан в изследваните области

В настоящото проучване след определяне на фоновите нива на метан за трите области на интерес за всеки ден от четиригодишния обхват на изследване бе приложен 3σ – филтър за откриване на емисионни събития. Целта на този подход е да се търсят зони, които надвишават поне три пъти стойността на стандартното отклонение σ за съответния цикъл на пресмятане. Тези зони трябва да имат налични поне осем пиксела (за всеки отделен полигон, подложен на филтрация), които да превишават с минимум 3σ стойностите на фоновите нива, за да се регистрира наличие на емисионно събитие. Всички пиксели, които не отговарят на това условие, се елиминират от по-нататъшната проверка.

Стандартното отклонение определяме по формулата

$$(3) \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

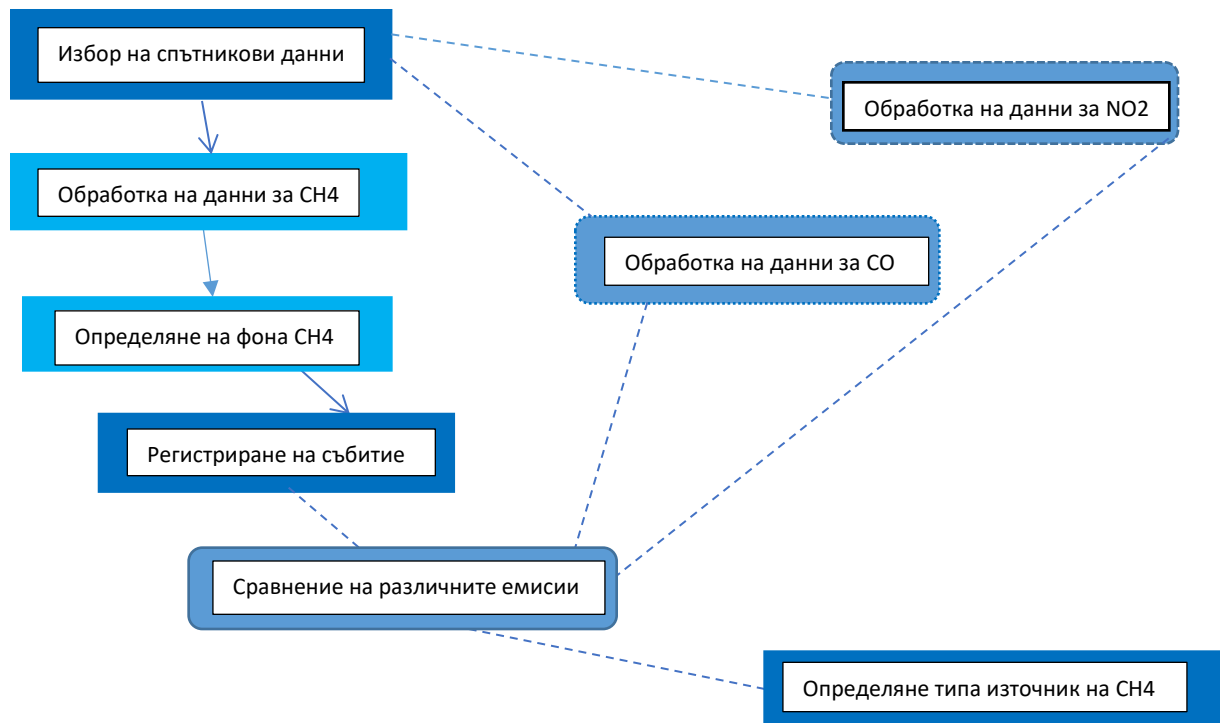
Този подход изключва субективния фактор и освен това позволява относително бърз автоматизиран процес със сравнително ниско машинно натоварване. Това е много важно, когато имаме за цел бързо извличане на ценна информация от големи масиви от данни, каквито са файловете с изображенията, получени от сензора TROPOMI на ежедневна база за големи площи.

3.5. Установяване на връзки на метановите емисии с емисии на други замърсители от избраните обекти.

Паралелното проследяване за наличие на емисиите на метан и на други газове замърсители в изследваните области дава възможност да се получи много по-богата и пълноценна информация за източниците и ефектите, които оказват по отношение на замърсяването на атмосферата и изменението на климата. В настоящия дисертационен труд цялостната методика за откриването и проследяването на пространственото и времевото поведение на емисиите на метан е приложена едновременно и по отношение на още два газове замърсители – CO и NO₂. Към момента в научната литература не са установени докладвани работи за подобно интегрално проучване за тези три замърсителя.

Добре известно е, че CO има напълно антропогенен произход. В атмосферата този газ взаимодейства с хидроксилните радикали (OH) и така намалява тяхното количество. OH-радикалите са важни, защото спомагат за намаляване времето на живот на силните парникови газове като метана. Тяхното редуциране води до косвено увеличаване потенциала на тези газове за глобално затопляне. С други думи, едновременното емитиране в атмосферата на NO₂, CO и CH₄ води до по-продължително запазване на високи концентрации на метан в съответните области.

На фиг. 3.7 схематично е представена единна методика за регистриране и анализ на метанови емисии от различни източници.



Фиг. 3.7. Схема на разработената методика за анализ на емисии CH₄ посредством спътникови данни

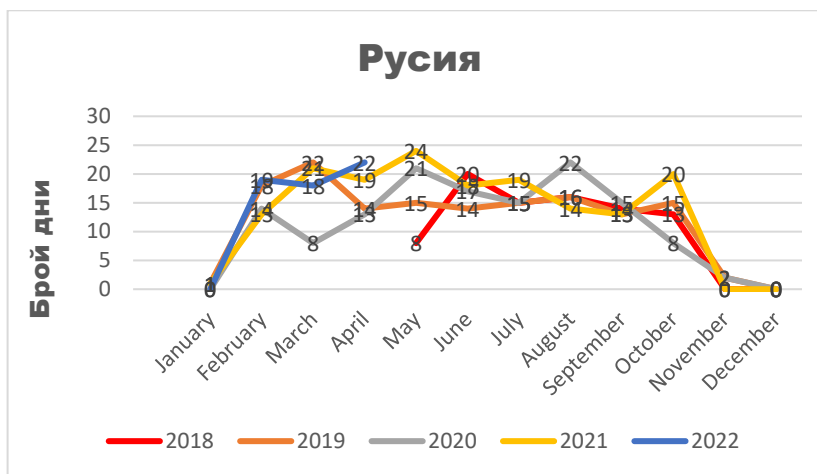
Глава 4. Анализ на резултатите от изследването

4.1. Липсващи данни в сателитните изображения

На фиг. 4.1-2-3 са представени резултатите от процеса на проследяване за процента налични пиксели за трите области на интерес – съответно Русия; Туркменистан и България за четиригодишния обхват на изследване (май 2018 – април 2022).

Област Кемерово, Русия

На фиг. 4.1 е показано разпределението на наличните данни за метан от сензора TROPOMI на спътника Sentinel-5P за област Кемерово, Русия за интервала време от май 2018 г. до април 2022 г.



Фиг. 4.1. Количество дни с налични данни за метан от спътника Sentinel-5p, Кемерово-Русия

Графиката ясно показва, че през месеците ноември, декември и януари няма никакви данни за метан от сензора TROPOMI за всички четири години за тази област. През останалите месеци процента наличност варира между 43% и 73%. Трябва да подчертаем, че много често това са налични данни за някаква част от територията на областта, като в повечето случаи става дума само за няколко десетки квадратни километра (няколко на брой пиксела). Търсеният минимум е клъстер от поне десет пиксела, а основанието за тази стойност е пояснена по-долу. Изводът, който се налага и който ясно се вижда на графиката, е, че за периода ноември - януари тук е невъзможно да се проследяват метанови емисии от каквито и да е източници с помощта на сателитни данни със средна пространствена разделителна способност и трябва да се търсят други методи за измерване.

Туркменистан

На фиг.4.2 е представена аналогична информация от същия източник и интервал от време за Туркменистан. Контрастът на тези данни спрямо предната графика е ясно разграничим. Тук източникът на метанови емисии е хомогенен, като в случая това е сектор нефт и газ, за разлика от Кемерово-Русия, където основните емисии се генерират от въгледобивната индустрия.

Процентът налични сателитни данни от TROPOMI за колоната суха молекулна фракция xCH_4 над територията на Туркменистан варира между 70% и 94%, с малки изключения за месеците февруари – април. Освен това почти всяко от изображенията е с по-голяма пълнота в пикселите, а причините за наблюдаваната картина по-горе бе подробно обяснена. Данните за Туркменистан са отличен еталон за проследяване на концентрациите на метан в атмосферата, в т.ч. определяне на фонов нива – тъй като имаме значително по-голяма плътност на информацията и съответно могат да се моделират и оценяват различни подходи; оценка на времето на престой, разсейване и почистване на метана в тази област при детектиране на събития с големи по обем емисии; и т.н.

Всичко това ясно показва, че изборът на Туркменистан е коректно избран и съществен за целите на изследването.

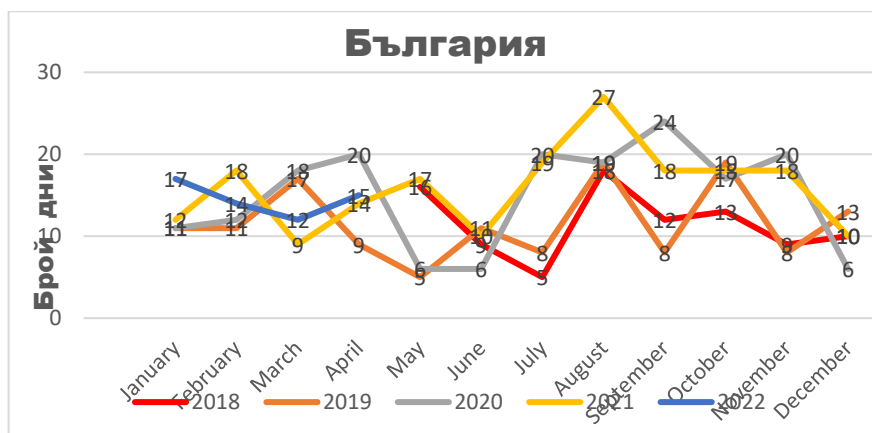


Фиг. 4.2. Количество дни с налични данни за метан от спътника Sentinel-5p, Туркменистан

България

За разлика от първите две области, графиката за България изглежда по съвсем различен начин (фиг. 4.3). Тук се налагат два извода. Първо, няма ясно изразен конкретен период от годината с много високи или много ниски проценти на налични данни. Причината за това е в по-голямата динамика на атмосферните процеси в нашата страна и редица други фактори, обяснение по-горе. Второ, средният процент налична информация (по дни и пълнота на изображенията) е значително по-нисък спрямо другите две области на интерес. Това създава допълнителни трудности при анализ на концентрациите на метан в атмосферата над България. Най-ефективното решение на проблема е комбинирането на тази информация с данни от дрон-заснемане, наземни измервания и данни, получени от сателитни измервания с висока пространствена разделителна способност (от порядъка на 30-50 m), съгласувани по време и локация.

Като се имат предвид резултатите, представени на фиг. 4.3 и изводите за нивата на неопределеност от фиг.3.6, потвърдени от направените тестови анализи в настоящата изследователска работа по данни от сензора TROPOMI за Туркменистан, се налага становището, че категорично можем да използваме наличните данни от сензора TROPOMI за определяне на фоновите концентрации на метан за избраните области на изследване с голяма доза увереност в оценката.

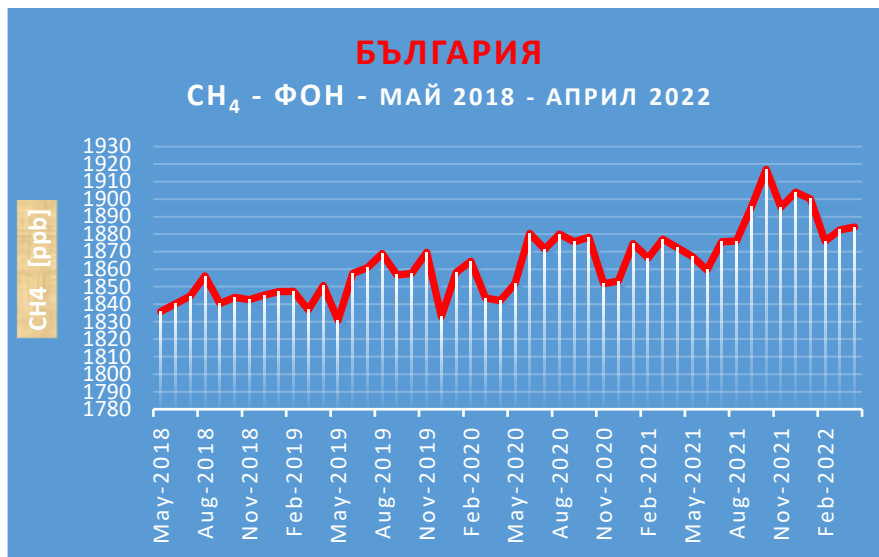


Фиг. 4.3. Количество дни с налични данни за метан от спътника Sentinel-5p, България

4.2. Определяне на фоновите нива на метан за областите на интерес

Прилагането на представеният в Глава 3.4 метод за изчисляване на фоновите нива на метана в атмосферата над трите разглеждани в настоящото проучване области дава следните резултати, представени в графиките по-долу.

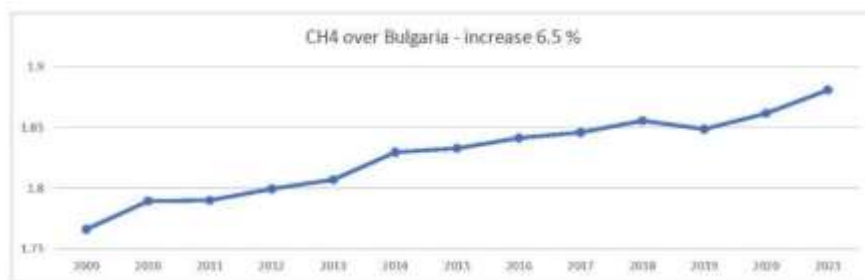
България



Фиг. 4.4. Фонове нива на метан в атмосферата над България за периода май 2018 – април 2022. Използвани данни - Sentinel-5P.

На фиг.4.4 са показани стойностите на фоновите нива на метан в България за четиригодишния обхват на изследване, получени след обработка на данните от спътника Sentinel-5p. Могат да се направят следните основни изводи.

Първо, отлично се забелязва тенденцията към трайно повишаване на фоновите нива на метан в атмосферата над територията на България на годишна база. Това е в потвърждение на резултатите от наше проучване за хода на сезонните и годишни изменения на концентрациите на метан, получени от анализ на сателитни данни с ниска ПРС, предоставени от спътника GOSAT (фиг. 4.8).



Фиг 4.8. Годишен ход на концентрациите на CH₄ над България

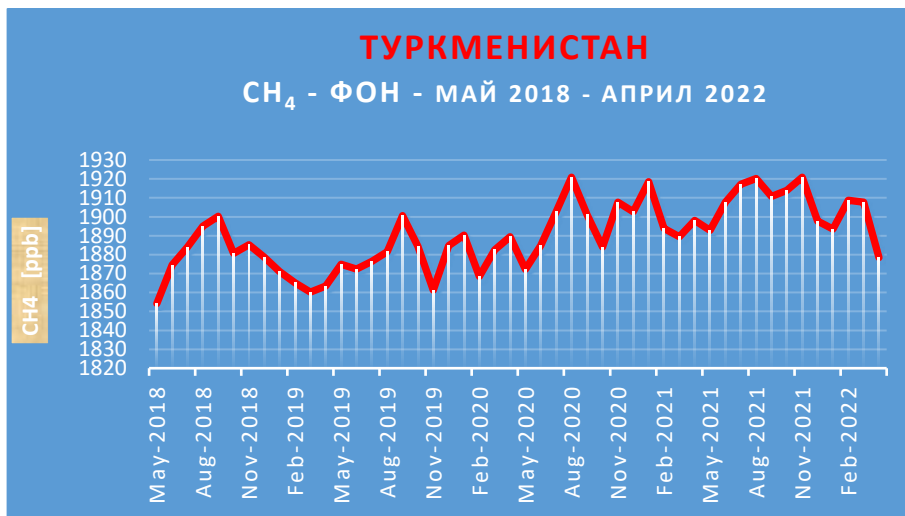
Както се вижда от фиг. 4.8, емисиите на CH₄ над България се увеличават с близо 6 % за около 12 години. Този резултат е в пряко съответствие с получената картина (фиг. 4.4) по спътниковите данни със средна пространствена разделителна способност от Sentinel-5P от наблюдаваната тенденция за Европа и в световен мащаб.

Второ, графиката на фиг. 4.4 показва, че не се забелязва ясно изразена сезонност в изменението на нивата на концентрации на метан в атмосферата над България за изследвания период. Освен това амплитудите в месечните вариации са относително малки, което се дължи на липсата на значими свръхизточници на метан на територията на България – фактор от съществено значение за акумулирането на по-високи концентрации. Едно изключение от тази констатация е времевият интервал август-октомври 2021 г., където се наблюдава временно по-рязко повишаване на наблюдаваните стойности. Това се дължи в случая не на появата на свръхемитер, а на периодично наблюдаван пренос от две външни зони – север и

северозиток от Румъния, и югоизток – от Турция. След пиковата стойност от октомври 2021 год. фонвите нива на концентрации на метан над България се връщат към установения ход.

Туркменистан

Резултатите от анализа за Туркменистан видимо се различават от тези, получени за България – фиг.4.9.



Фиг. 4.9. Фонови нива на метан в атмосферата над Туркменистан за периода май 2018 – април 2022. Използвани данни - Sentinel-5P.

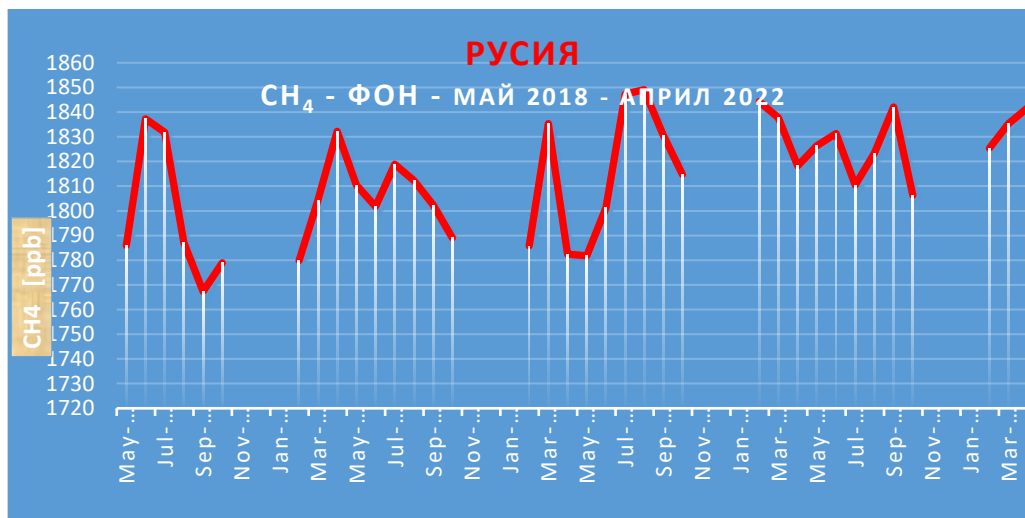
Тук се налагат следните изводи:

Първо: отново се наблюдава тенденция към устойчиво нарастване на фонвите нива на метан в атмосферата над изследваната територия на годишна база, но медианната стойност на кривата е с високи стойности спрямо тези за България.

Второ: амплитудите в месечните вариации в тази област са по-високи. Това в случая се дължи на наличието на няколко на брой свръхемитери на територията на Туркменистан, които периодично освобождават в атмосферата огромни количества метан и така рязко и трайно повишават неговите концентрации. Това ясно се вижда от представените конкретни емисионни събития от тези източници.

Русия

Резултатите за третия изследван от нас регион - област Кемерово – Русия са по-различни спрямо другите два – (фиг.4.10).



Фиг. 4.10. Фонови нива на метан в атмосферата над Русия-област Кемерово за периода май 2018 – април 2022. Използвани данни - Sentinel-5P.

Изводите са няколко:

Първо: налице е липсата на оценка за фоновите нива на метан за месеците ноември, декември и януари за четирите години, което се дължи на пълна липса на данни за този период, видно и от графиката на фиг.4.1. Но въпреки тази празнина в данните, проследяването на годишните тенденции в концентрациите на метан е възможно и това ясно се вижда от графиката.

Второ: Съпоставяйки медианните стойности от графиките за трите области на изследване, се налага извода, че най-ниско ниво имаме за област Кемерово. С други думи, фоновите концентрации на метан в тази област са най-ниски спрямо другите два региона.

Трето: Налице е тенденция към повишаване на метановия фон на годишна база, подобно на другите две области.

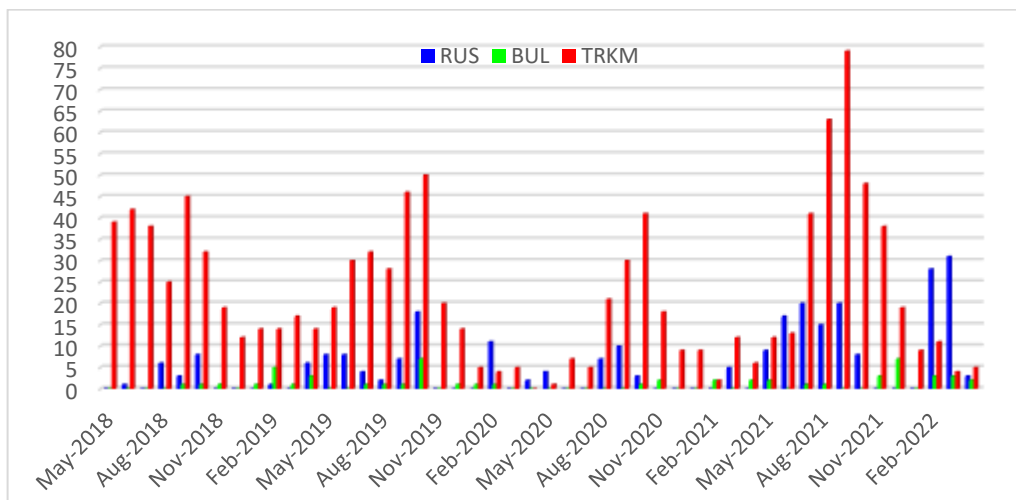
Четвърто: Голям контраст в резултатите спрямо другите две области на интерес са значително по-големите амплитуди в месечните вариации на фоновите нива на метан в тази област. Това се дължи на многото на брой свръхемитери на метан, разположени на относително неголяма територия, както и естеството на тези свръхемитери. Област Кемерово е най-големият въгледобивен район в Русия, като тук са концентрирани над 70 подземни и надземни мини. Въглищните пластове при много от тях се състоят от антрацитни въглища, които е известно, че съдържат най-високи нива на метан. Тези факти, заедно с основателното предположение за неефективна експлоатация на голяма част от тези минни обекти по отношение на емисиите на метан, са причината за наблюдаваната картина.

4.3. Регистриране на събития с високи емисии на метан в изследваните области

Наличието на детайлна информация за фоновите концентрации на метан за всяка от трите области на интерес дава възможност да се наложи 3σ – филтър за откриване на емисионни събития. Този метод бе подробно представен в Глава 3.4. Важно е да се отбележи, че при добре структурирана методика този процес на откриване и локализиране на съответните източници може да бъде автоматизиран и по този начин да се разширят времеви и пространствени обхват за анализ и оценка.

Емисии на метан - общи резултати

В резултат на прилагане на 3σ – филтъра бяха регистрирани значителен брой емисионни събития на територията на област Кемерово – Русия (265 отделни случая за периода май 2018 – април 2022) и Туркменистан (1067 случая) и относително неголям брой (55) такива случаи за територията на България. На фиг. 4.11 са показани получените резултати за трите области на интерес.



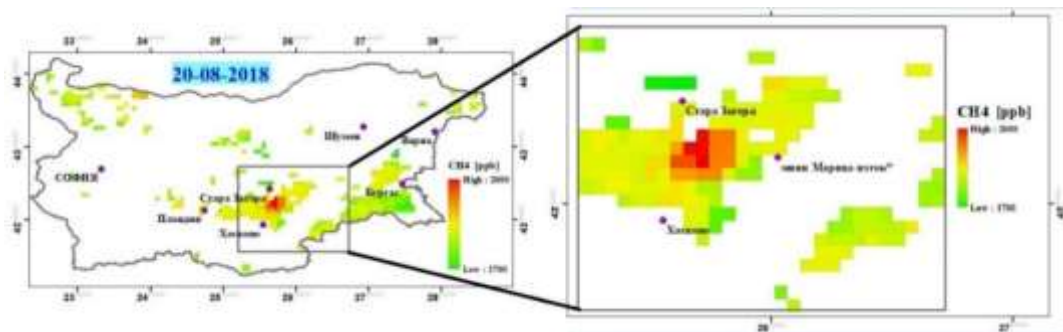
Фиг. 4.11. Емисионни събития на метан за периода май 2018 – април 2022. Използвани данни - Sentinel-5P.

Една от основните причини за наблюдаваната тенденция на повишаване на фоновите нива е наличието на голям брой свръхемитери, които периодично освобождават в атмосферата огромни количества метан. Графиката на фиг. 4.11 е доказателство за наличието на този огромен брой емисионни събития. Трябва да се отбележи, че всяко от тях има различна емисионна тежест, т.е. количеството

освободен в атмосферата метан е различно. По-долу са показани представителни извадки за такива значими събития за трите изследвани области.

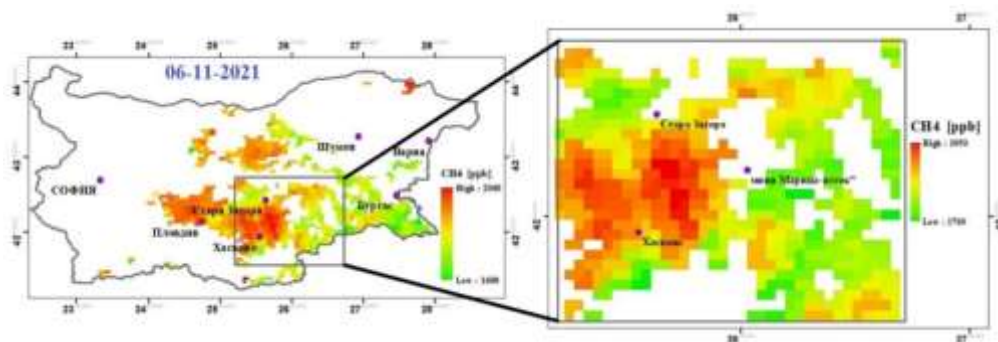
България – емисионни събития

На фиг. 4.12а-б, фиг.4.13а-б и фиг.4.14а-б са показани три отделни случая на по-значими емисии на метан на територията на България за дните 20-08-2018 г., 06-11-2021г. и 15-03-2022 г.



Фиг. 4.12а. Високи емисии на метан на 20-08-2018 год. в България. Използвани данни - Sentinel-5P.

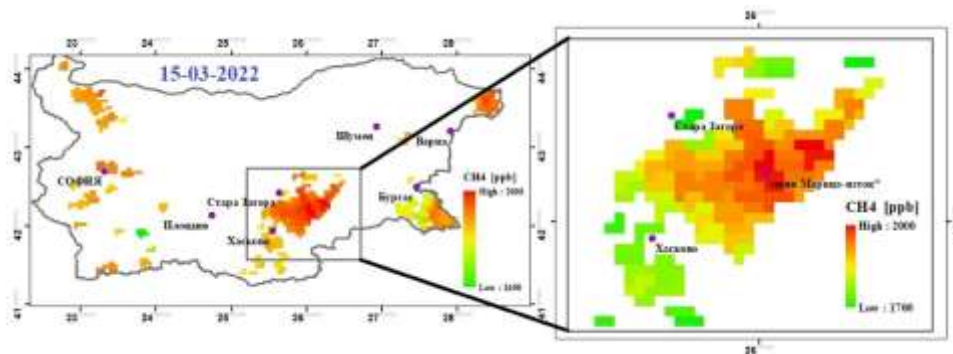
Случаят от 20-08-2018 г., показан на фиг. 4.12а,б, е една от най-големите емисии на метан, регистрирани на територията на България за целия период на изследване. Установената пикова стойност от използваните сателитни данни е 1957 [ppb] при фонова стойност за периода 1856 [ppb]. Областта на засичане е в района на Маришкия въглищен басейн, южно от Стара Загора.



Фиг. 4.13а. Високи емисии на метан на 06-11-2021 год. в България. Използвани данни - Sentinel-5P.

В района на Маришкия въглищен басейн се регистрирани десетки случаи на емисии на метан за периода на изследване, но повечето са с относително нисък интензитет и обем. Причината вероятно се дължи на вида въглища (лигнитни), които се добиват там. Освен това, мините там са открити, което също предполага плавен темп с не много високи нива на емисионни събития.

Случаите от 06-11-2021 г. (фиг.4.13а,б) и 15-03-2022 г. (фиг.4.14а,б) са с по-ниски максимални стойности, но регистрираните повишени концентрации на метан в резултат от тези емисионни събития обхващат по-големи площи.

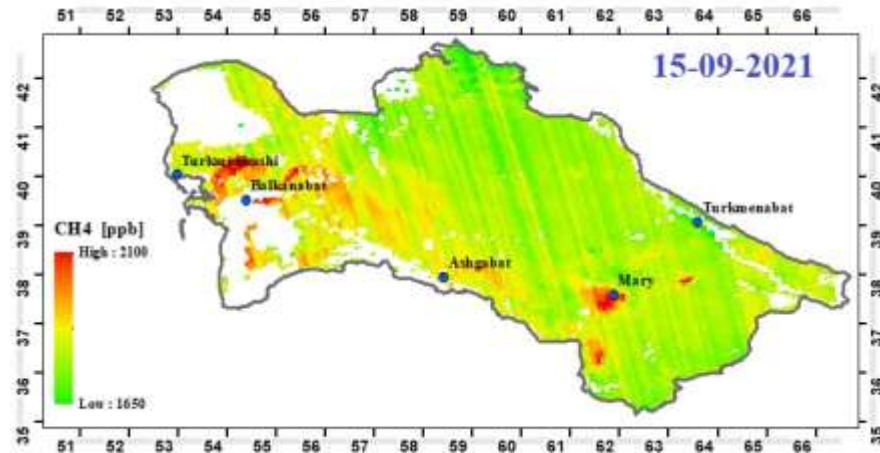


Фиг. 4.14а. Високи емисии на метан на 15-03-2022 год. в България. Използвани данни - Sentinel-5P.

Извод: Резултатите от изследването показват, че по отношение на въгледобива България е с относително нисък принос към наблюдаваната тенденция в повишаване на нивата на метан в атмосферата както на местно, така и на континентално ниво.

Туркменистан – емисионни събития

Втората област на изследване – територията на Туркменистан, показва по-различни резултати. Тук основен (почти единствен) източник на метанови емисии е петролната и газова индустрия. От графиката на фиг.4.11 се вижда изключително високия брой емисионни събития за четиригодишния обхват на изследване. Всички те са с различен интензитет и обем на емисии на метан – на фиг. 4.17 е показан един от тях - за 15-09-2021 г.



Фиг. 4.17. Високи емисии на метан - 15-09-2021 год. в Туркменистан. Използвани данни - Sentinel-5P.

Изводи:

Първо: Анализът от изследването показва, че на територията на Туркменистан се наблюдават девет основни локации на свръхемитери – повечето от тях се открояват ясно на фиг.4.16 и фиг.4.17. С най-висок интензитет и най-честа повтаряемост са четири от тях, разположени по крайбрежието на Каспийско море, като например терминала за втечен газ Kiyarly на север от Turkmenbashi, както и в района на град Mary в югоизточната част на страната.

Второ: Припокриването на локациите на големи инфраструктурни обекти от петролния и газовия сектор (фиг.4.18) (терминали, помпено-разпределителни станции, добивни басейни и т.н.) с „горещите точки“ на високи емисии на метан на територията на Туркменистан е недвусмислено.



Фиг. 4.18. Туркменистан – петролно-газова карта. Източник: crudeaccountability.org, Caspian interactive map service

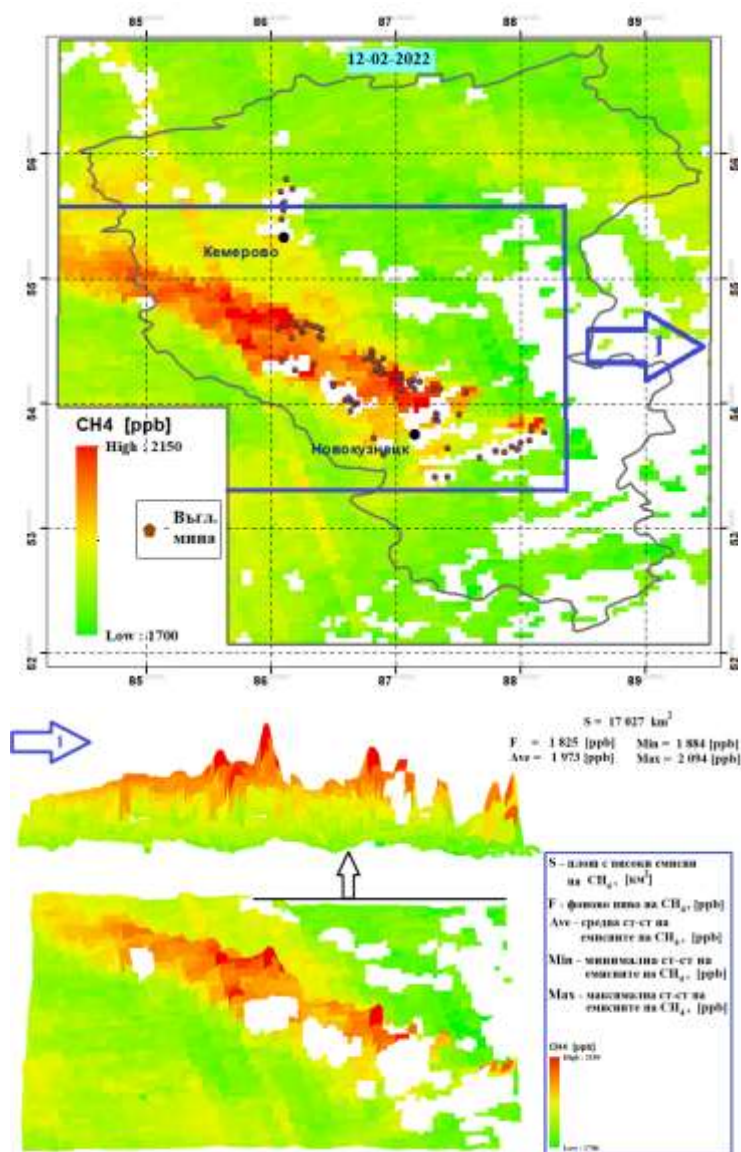
Друг важен извод е, че изключително големият брой емисионни събития, както и огромният обем емитиран в атмосферата метан, са причина за наблюдаваното високо ниво на фоновите концентрации в

Туркменистан. Те са отговорни и за преноса на метан на далечни разстояния, т.е. оказват влияние върху повишаването на фона на други места, където няма ясно открояващи се свръхизточници.

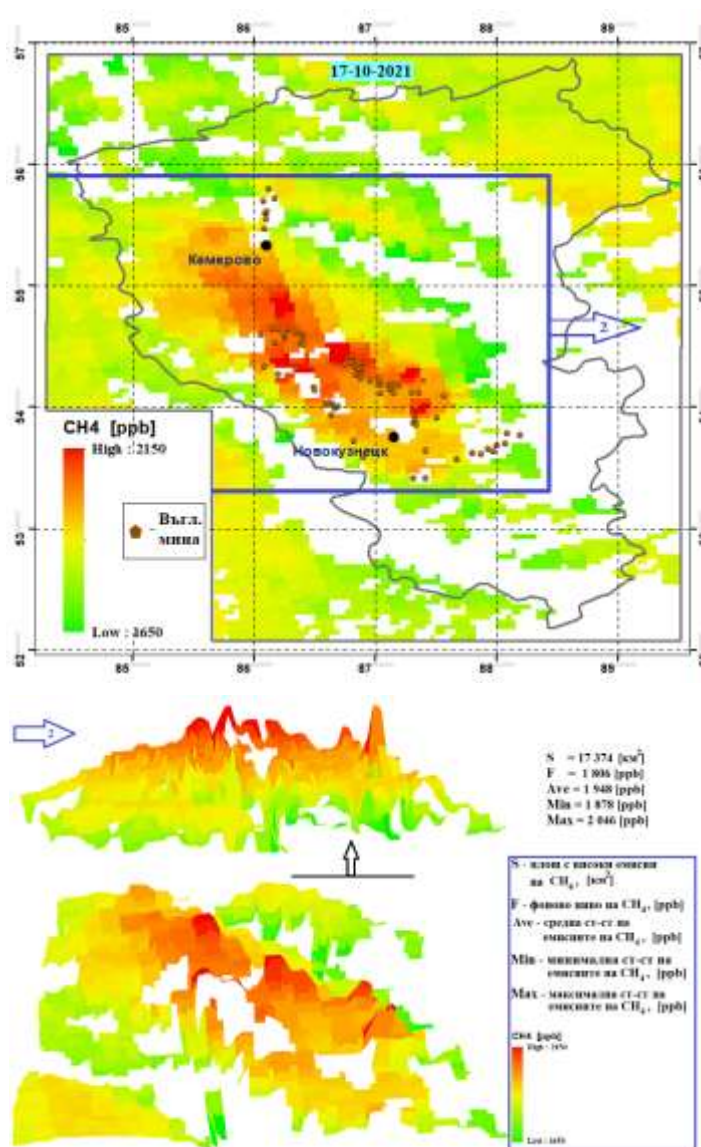
Област Кемерово, Русия – емисионни събития

Област Кемерово е най-големият въгледобивен район в Русия. За периода май 2018 – април 2022 г. бяха регистрирани 265 отделни случая на високи емисии на метан с различен интензитет. Тук се намира най-голямата въгледобивна мина в Русия – мина „Распадская“, от която в процеса на анализ се установиха над 25 отделни случая на много високи емисии на метан. Една част от тях (2022 г.) са потвърдени от GHGSat, търговска компания за сателитно наблюдение, базирана в Канада, която докладва регистриране на изтичане на метан от тази мина, еквивалентно на емисиите от пет въглищни електроцентрали. От компанията докладват за 13 измерени от тях отделни метанови емисии само от тази мина. Това е доказателство, че комбинираното използване на сателитни данни със средна и висока пространствена разделителна способност може да повиши значително както броя на откритите емисионни събития с тенденция към намаляване на МГО, така и по-прецизно да се определят количествено тези емисии.

На фиг.4.19 – фиг.4.22 са показани три отделни дни с високи емисии в разглежданата област. С кафяви точки са отбелязани локациите на всяка от мините.



Фиг. 4.19. Високи емисии на метан - 12-02-2022 год. в област Кемерово, Русия.. Използвани данни - Sentinel-5P.



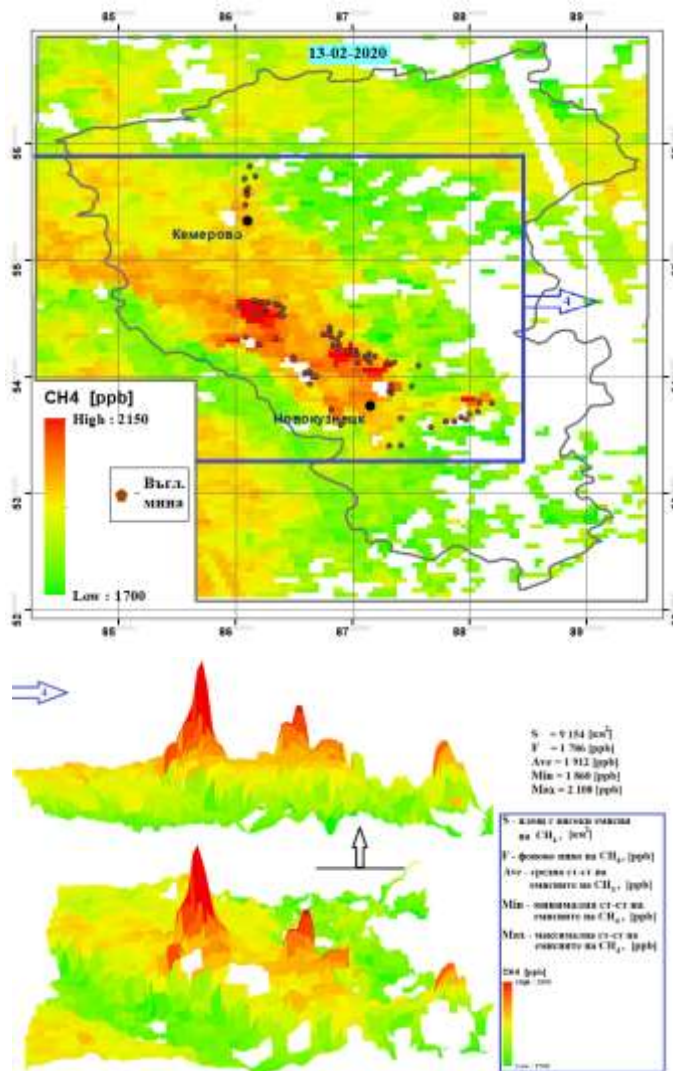
Фиг. 4.20. Високи емисии на метан - 17-10-2021 год. в област Кемерово, Русия.. Използвани данни - Sentinel-5P.

Изводи:

Първо: На показаните изображения отлично се вижда недвусмисленото припокриване на районите на въгледобив и областите с високи концентрации на метан.

Второ: Същото припокриване се наблюдава и в изображенията за емисии на азотен диоксид и азотни оксиди – фиг. 4.24 ÷ фиг. 4.26. Тази констатация е получена в резултат от паралелните изследвания за тези два вида замърсители в хода на настоящото изследване.

Показаните примери дават много ясна представа за мащаба на емисиите на метан от този въгледобивен район. При фоново ниво от 1825 [ppb], например за случая от 12 февруари 2022 г., пикови стойности от 2094 [ppb] (значителна разлика от 265 [ppb] в нивата) в съчетание с общата измерена площ от 17 027 km² говорят за огромни количества метан, освободени в атмосферата само за този отделен ден. Още по-контрастен е случаят от 13-02-2020 г. (фиг.4.22), при който е измерена максимална стойност на концентрация на метан в емисионното събитие от 2108 [ppb] при фоново ниво за областта от 1786 [ppb].



Фиг. 4.22. Високи емисии на метан - 13-02-2020 год. в област Кемерово, Русия.. Използвани данни - Sentinel-5P.

3D изображенията дават отлична представа за огромната разлика между фоните концентрации на метан в околността и изключително високите нива в емисионните събития за всеки от случаите. Те помагат освен това за по-ясното разграничаване на отделните емисионни събития (отделни източници) в рамките на един и същи ден в разглежданата област. Така например, за 17-10-2021г. и 06-09-2021 г. се наблюдават пет отделни емисионни събития, за 13-02-2020 г. – шест.

По-точното определяне на количеството емитиран в атмосферата метан от тези източници за всяко от събитията може да се направи с помощта на спътникови данни с висока пространствена разделителна способност (като тези от GHGSat) с отчитане на редица други фактори като посока и скорост на вятъра, влажност на въздуха и т.н.

В настоящата работа количествата на освободения в атмосферата метан за всяко от показаните четири емисионни събития на фиг.4.19 – фиг.4.22 на базата на спътниковите данни от Sentinel-5p, са оценени както следва:

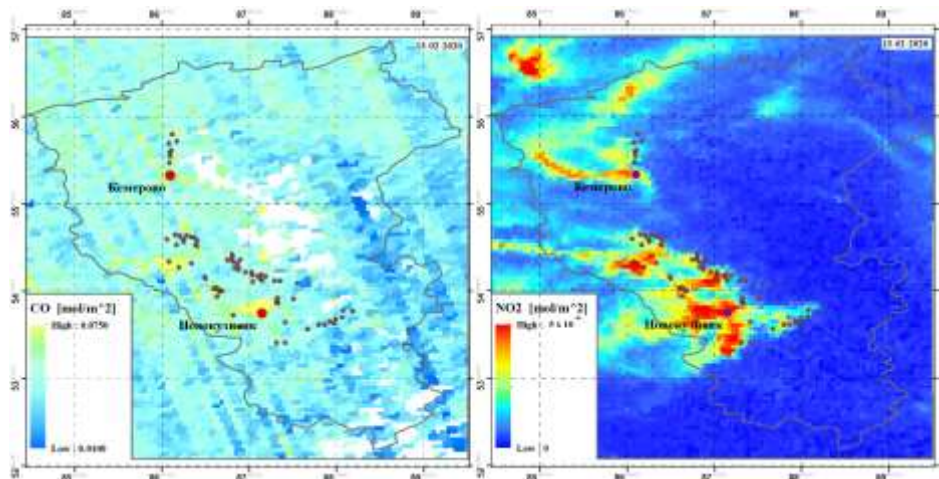
13-02-2020 г. – 203 тона метан;	06-09-2021 г. – 318 тона метан;
17-10-2021 г. – 1433 тона метан;	12-02-2022 г. – 787 тона метан.

Тези стойности са в добро съответствие с оценките, които GHGSat докладват по отношение на емисиите само от мина „Распадская“ за едно конкретно събитие – 18 тона/час.

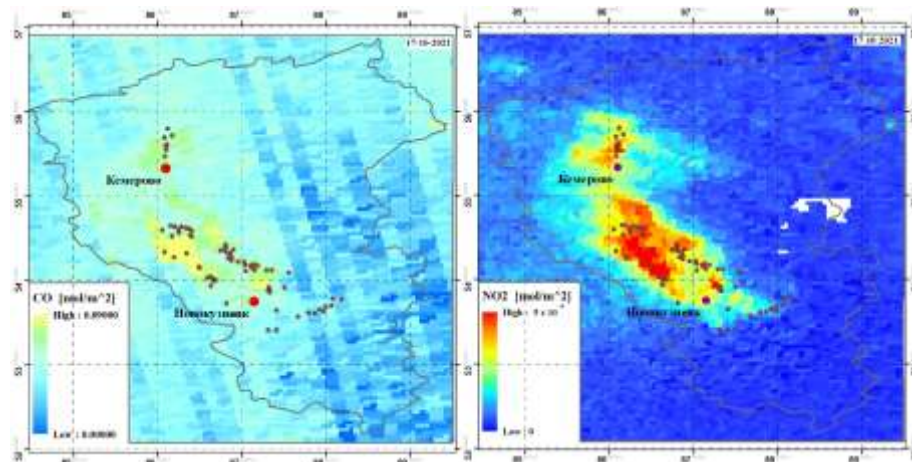
Извод: Все пак трябва да се има предвид, че получените в настоящата работа количествени оценки могат да послужат предимно за степенуване на мащабите на отделните събития, тъй като спътниковите данни със средна пространствена разделителна способност са по-ползени за цели и задачи, както бе подробно пояснено по-горе.

4.4. Взаимовръзка между случаи на метанови емисии и емисии на други замърсители от избраните обекти.

Нещо много важно, което се установи в хода на настоящото изследване – винаги, когато се регистрират събития с високи нива на емисии на метан в област Кемерово- Русия, това е съпроводено от високи нива на емисии на въглероден оксид и азотни оксиди в същите зони – фиг.4.24 - фиг.4.26.



Фиг. 4.24. Емисии на CO и NO₂ - 13-02-2020 год. в обл.Кемерово, Русия.. Използвани данни - Sentinel-5P.



Фиг. 4.26 Емисии на CO и NO₂ - 17-10-2021 год. в обл. Кемерово, Русия.. Използвани данни - Sentinel-5P.

На фиг.4.24 ÷фиг.4.26 ясно се вижда, че емисиите на CO и NO₂ много точно съответстват на зоните с повишени емисии на метан за избраните дни. Това се дължи на вида източник на емисии в тези зони, а именно – въгледобивните мини. За област Кемерово тази констатация е в сила за всички случаи на регистрирани емисионни събития.

За разлика от въгледобивния район на област Кемерово, в Туркменистан всички свръхемитери са от петролния и газовия сектор. В резултат на настоящото изследване се установи, че там не се наблюдават емисионни събития с високи нива на азотни оксиди и въглероден окис в случаите, когато имаме събития с високи емисии на метан.

В България са налице и двата вида източници на метанови емисии – въгледобивен район (Маришки басейн) и петролно-газова инфраструктура (Нефтохим-Бургас и газопрепосни трасета). Тази

констатация за едновременно регистриране на метанови емисии и емисии на CO и NO₂ над въгледобивния район и липсата на такъв синхрон над другите зони също е в сила. Но тъй като интензитета на емисиите тук е значително по-нисък, както и поради по-ниския процент от налични ежедневни данни, е трудно да се покаже това съответствие във всеки от случаите на емисионно събитие. За България много често се случва ситуация, в която се регистрира събитие с емисии на CO и NO₂, но липсват данни за CH₄. Този пример показва колко е важна необходимостта от по-всеобхватна методика за комплексен мониторинг на най-значимите атмосферни замърсители.

Това е и доказателство колко важни са сателитните данни със средна пространствена разделителна способност и многостранната информация, която може да се извлече от тях при добре структуриран и целенасочен анализ.

Изводи

Представените в настоящия дисертационен труд резултати от изследвания посредством спътникови данни със средна разделителна способност в три области на интерес:

- територията на България, с акцент две зони с най-големи концентрации на метан;
- територията на Туркменистан;
- област Кемеровска – най-големият въгледобивен район в Русия,

показват, че методите за обработка на получените данни са ключов фактор при използването на спътниците.

По отношение на метана един от основните показатели, който трябва да се следи, са фоновите нива. Познаването на техните стойности дава възможност да се проследяват сезонните и годишните тенденции, бързо да се откриват периодични или случайни емисии от нерегламентирани източници и т.н. Поради високата степен на значимост на този показател е предложен иновативен метод за неговото изчисляване за избрана област на интерес. Този метод изключва субективния фактор и е със сравнително ниско машинно натоварване. Прилагането му позволява относително бързо откриване и локализиране на съответните източници на метанови емисии. Процесът може да бъде автоматизиран и по този начин да се разширят времевия и пространствения обхват за анализ и оценка.

В настоящия дисертационен труд цялостната методика за откриването и проследяването на пространственото и времевото поведение на емисиите на метан е приложена едновременно и по отношение на още два газови замърсители – CO и NO₂. Това дава възможност да се получи по-пълноценна информация за вида източник, например въглищна мина или газова инфраструктура, и др. Към момента в научната литература не са установени докладвани работи за интегрално проучване за CH₄, NO₂ и CO с подобен характер.

За България е констатирана тенденцията към трайно повишаване на фоновите нива на метан на годишна база. Не се забелязва ясно изразена сезонност в изменението на тези нива, като амплитудите в месечните вариации са относително малки, което се дължи на липсата на значими свръхизточници на метан на територията на страната. Резултатите от изследването показват, че по отношение на въгледобива България е с относително нисък принос към наблюдаваната тенденция в повишаване на нивата на метан в атмосферата както на местно, така и на континентално ниво.

Доказва се, че въпреки съответния процент на липсващи данните, проследяването на годишните тенденции в концентрациите на метан е възможно.

За другите две области на интерес също се наблюдава тенденция към устойчиво нарастване на фоновите нива на метан, като са регистрирани значително по-големите амплитуди в месечните вариации на концентрациите. Регистрирани са значителен брой емисионни събития, като в Туркменистан всички те се дължат на петролния и газовия сектор, а в област Кемерово, Русия – на въгледобив.

Приноси

1. Разработена и приложена е единна методика за регистриране и анализ на атмосферни замърсявания с метан и други газови компоненти над различни обекти на базата на спътникови данни.
2. Разработена и приложена е методика за определяне на фоновото наличие на метан в атмосферата при голям брой липсващи пиксели.
3. Определяне на типа източник на замърсяване с метан на базата на създадената методика чрез сравняване на едновременно наблюдавани различни газови замърсители, включително откриване и изследване на обекти с ограничен достъп.
4. Установена е трайна тенденция на покачване на метановите емисии над България за периода от 2009 г. до средата на 2022 г. по данни от GOSAT и Sentinel-5P, както и при други избрани области за периода от края на 2018 г. до средата на 2022 г.

Статии на автора по темата на дисертационния труд

Trenchev P., Dimitrova M., Gochev D. Емисии метан над България за периода май 2018 – април 2022 г. по данни от Sentinel-5P. Сб. доклади от годишна университетска научна конференция, 30.06-01.07.2022 г., Велико Търново, том 7, стр. 103-110, 2022 г., ISSN 1314-1937

Trenchev P., Dimitrova M., Gochev D. Проследяване и анализ на емисиите на NO₂, CO, CH₄ над България по сателитни данни от TROPOMI. Сб. доклади от годишна университетска научна конференция, 30.06-01.07.2022 г., Велико Търново, том 7, стр. 111-118, 2022 г., ISSN 1314-1937

Dimitrova M., Trenchev P., Gochev G. Spatial and Seasonal Distribution of NO₂ Pollution over Bulgaria Based on Tropomi Measurements. SES 2020, Sixteenth International Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 04-06 November 2020, Sofia, Bulgaria, p. 279-282, p-ISSN 2603-3313

Gochev G., Dimitrova M., Trenchev P. Поведение на NO₂ в атмосферата над София по спътникови данни от Sentinel-5P и наземни данни за периода февруари 2018 – февруари 2020 г. Сб. доклади от годишна университетска научна конференция, 28-29 май, 2020 г., електронно издание, Велико Търново, стр. 559-565, 2020 г., ISSN 2367-7481

ЛИТЕРАТУРА

- Aben Isabel, 2021, The world chasing methane – <https://www.euronews.com/green/2021/06/30/the-world-is-chasing-methane>
- Alvarez R., D. Zavala-Araiza, D. R. Lyon, D. T. Allen, Z. R. Barkley, A. R. Brandt, et al., Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain, *Science*, 2018, 361(6398), 186
- Anthony, K.W., von Deimling, T.S., Nitze, I., Frohking, S., Emond, A., Daanen, R., Anthony, P., Lindgren, P., Jones, B. and Grosse, G. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications*, 9, 1-11
- Bertin E., Arnouts S., 1996, *A&AS*, 117, 393
- Brown P.F., S. Saunier, M. Simon and B. H. Cruz, Overview of methane detection and measurement technologies for offshore applications, Carbon Limits AS for the Norwegian Oil and Gas Association, Oslo, NO, 2020, available, <https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2020/08/>
- Bruggers James, Amy Green, Phil McKenna, and Robert Benincasa, 2021. EPA Struggles to Track Methane Emissions From Landfills. Here’s Why It Matters. <https://insideclimatenews.org/news/13072021/epa-struggles-to-track-methane-emissions-from-landfills-heres-why-it-matters/>
- CAMS - <https://atmosphere.copernicus.eu/>
- CCAC, Climate and Clean Air Coalition (CCAC), United Nations Environment Programme (UNEP) Global Methane Assessment (full report), 2021, <https://www.ccacoalition.org/en/resources/global-methane-assessment-full-report>
- Chen T-M, Gokhale J, Shofer S, Kuschner WG. Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *Am J Med Sci.* (2007) 333:249–56. doi: 10.1097/MAJ.0b013e31803b900f
- Cheung K, Daher N, Kam W, Shafer MM, Ning Z, Schauer JJ, et al. Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient coarse particulate matter (PM10–2.5) in the Los Angeles area. *Atmos Environ.* (2011) 45:2651–62. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.066
- Christensen, T.R., Arora, V.K., Gauss, M. et al. Tracing the climate signal: mitigation of anthropogenic methane emissions can outweigh a large Arctic natural emission increase. *Sci Rep* 9, 1146 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37719-9>
- CMCC – Methane: emissions increase and it’s not a good news - <https://www.cmcc.it/article/methane-emissions-increase-and-its-not-a-good-news>
- Cooper, M.D., Estop-Aragonés, C., Fisher, J.P., Thierry, A., Garnett, M.H., Charman, D.J., Murton, J.B., Phoenix, G.K., Treharne, R., Kokelj, S.V. and Wolfe, S.A. (2017). Limited contribution of permafrost carbon to methane release from thawing peatlands. *Nature Climate Change*, 7, 507-511
- 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, 2022. DOI: 10.1039/d1ea00046b (*Environ. Sci.: Atmos.*, 2022, 2,9)
- Cusworth D. H., D. J. Jacob, J.-X. Sheng, J. Benmergui, A. J. Turner, J. Brandman, L. White, C. A. Randles, Detecting high-emitting methane sources in oil/gas fields using satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 16885–16896 (2018)
- Cusworth D. H., D. J. Jacob, D. J. Varon, C. Chan Miller, X. Liu, K. Chance, A. K. Thorpe, R. M. Duren, C. E. Miller, D. R. Thompson, C. Frankenberg, L. Guanter, C. A. Randles, Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space. *Atmos. Meas. Tech.* 12, 5655–5668 (2019)
- Dean, J.F., Middelburg, J.J., Röckmann, T., Aerts, R., Blauw, L.G., Egger, M., Jetten, M.S., de Jong, A.E., Meisel, O.H., Rasigraf, O. and Slomp, C.P. (2018). Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Reviews of Geophysics*, 56, 207-250
- de Gouw J. A., J. P. Veefkind, E. Roosenbrand, B. Dix, J. C. Lin, J. Landgraf, P. F. Levelt, Daily satellite observations of methane from oil and gas production regions in the United States. *Sci. Rep.* 10, 1379 (2020)
- Dimitrova M., Gochev G., Trenchev P. Избор на спътникови данни за регистриране и изследване на пясъчни бури от Африка, насочени към Балканския полуостров. SES 2018, Fourteenth Internationation

Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 07-09 November 2018, Sofia, Bulgaria, p. 258-261, p-ISSN 2603-3313

- Dimitrova M., Trenchev P., Georgieva E., Neykova N., Neykova R., Nedkov R., Gochev D., Syrakov D., Veleva Bl., Atanassov D., Spassova T. Seasonal changes of aerosol pollutants over Bulgaria. SES 2019, Fifteenth International Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 06-08 November 2019, Sofia, Bulgaria, p. 241-252, p-ISSN 2603-3313
- Dimitrova M., Nedkov R., Syrakov D., Georgieva E., Gochev D., Trenchev P., Veleva Bl., Atanassov D., Spassova T., Bachvarova E. Identification of Optimal Satellite Data for Use in the Air Quality Modeling System BgCWFS. SES 2019, Fifteenth International Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 06-08 November 2019, Sofia, Bulgaria, p. 253-260, p-ISSN 2603-3313
- Dimitrova M., Trenchev P., Gochev G. Spatial and Seasonal Distribution of NO₂ Pollution over Bulgaria, Based on Tropomi Measurements. SES 2020, Sixteenth International Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 04-06 November 2020, Sofia, Bulgaria, p. 279-282, p-ISSN 2603-3313
- Dimitrova M. SEASONAL CHANGES OF SAHARA DESERT DUST TRANSPORT OVER BALKANS, Aerospace Research in Bulgaria. 33, 2021, Sofia, pp 79-86
- Ebersviller S, Lichtveld K, Sexton KG, Zavala J, Lin Y-H, Jaspers I, et al. Gaseous VOCs rapidly modify particulate matter and its biological effects – Part 1: simple VOCs and model PM. Atmos Chem Phys Discuss. (2012) 12:5065–105. doi: 10.5194/acpd-12-5065-2012
- EEA. European Environmental Agency. 2020. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/intro>
- Elkind J., E. Blanton, H. D. V. D. Gon, R. L. Kleinberg and A. Leemhus, Nowhere to hide: the implications of satellite-based methane detection for policy, industry, and finance, Columbia University SIPA and Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), NY, USA, 2020, <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/nowhere-hide-implications-policy-industry-and-finance-satellite-based-methane-detection>
- Emberson LD, Pleijel H, Ainsworth EA, den Berg M, Ren W, Osborne S, et al. Ozone effects on crops and consideration in crop models. Eur J Agron. (2018) 100:19–34. doi:10.1016/j.eja.2018.06.002
- EPA 2015, United States Environmental Protection Agency (2015) Climate Change in the United States: Benefits of Global Action. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, Washington, DC, US. EPA 430-R-15-001
- Ershadi A., M. F. McCabe, J. P. Evans, G. Mariethoz and D. A. Kavetski, Bayesian analysis of sensible heat flux estimation: Quantifying uncertainty in meteorological forcing to improve model prediction, Water Resour. Res., 2013, 49(5), 2343 – 2358
- ESA, Sentinel-5P TROPOMI User Guide, European Space Agency (ESA), Sentinel, 2021, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>
- ESA, Orbit Prediction Tool, European Space Agency (ESA), 2021, ESA orbit, 2021
- ESA – Copernicus, Sentinel-5P, March 2021. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Monitoring_methane_emissions_from_gas_pipelines
- EUMETSAT – The Global Ozone Monitoring Experiment–2 GOME 2 instrument - <https://www.eumetsat.int/gome-2>
- EUROPEAN AIR QUALITY - Copernicus - http://macc-raq-op.meteo.fr/index.php?category=ensemble&subensemble=hourly_ensemble&date=LAST&calculation-model=ENSEMBLE&species=o3&level=SFC&offset=000
- EUROPEAN AIR QUALITY PORTAL - European Environment Agency - <http://discomap.eea.europa.eu/map/fme/AirQualityExport.htm>
- European Commission, EU Methane Strategy, European Union (EU), Brussels, BE, 2020, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_methane_strategy.pdf
- Froitzheim Nikolaus, Jaroslaw Majka, Dmitry Zastrozhnov. Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. Proceedings of the National Academy of Sciences Aug 2021, 118 (32) e2107632118; DOI: 10.1073/pnas.2107632118
- Gabbatiss Josh, Methane emissions from coal mines could be more than double previous estimates, according to a new study, 2020, <https://www.carbonbrief.org/coal-mines-emit-more-methane-than-oil-and-gas-sector-study-finds>

- Gedney, N., Cox, P.M. and Huntingford, C. (2004). Climate feedback from wetland methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 31(20)
- Ganesan Anita L. et al, Advancing scientific understanding of the global methane budget in support of the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019; DOI: 10.1029/2018GB006065)
- GCP – Global Carbon Project - <https://www.globalcarbonproject.org/>
- Georgieva Emilia, Dimiter Atanasov, Tatiana Spassova, Ekaterina Batchvarova, Dimiter Syrakov, Maria Dimitrova, Roumen Nedkov, Blagorodka Veleva, Satellite Information Downscaled to Urban Air Quality in Bulgaria - Project description, *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 2019, volume 23, number 2 (print ISSN 0861-0762; online ISSN 2535-0595), <http://meteorology.meteo.bg/global-change/content-en-23-2.html>
- Gibb T. Indoor Air Quality May be Hazardous to Your Health. MSU Extension. https://www.canr.msu.edu/news/indoor_air_quality_may_be_hazardous_to_your_health
- GMA - GLOBAL METHANE ASSESSMENT. Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. 2021, ISBN: 978-92-807-3854-4, <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>
- Gochev G., Dimitrova M., Trenchev P. СРАВНЯВАНЕ НА МОДЕЛИ ЗА ВРЪЗКИТЕ МЕЖДУ ААИ (AOD) И PM2.5, PM10. SES 2018, Fourteenth International Scientific Conference, SPACE, ECOLOGY AND SAFETY, 07-09 November 2018, Sofia, Bulgaria, p. 258-261, p-ISSN 2603-3313
- Gochev G., Dimitrova M., Trenchev P. Поведение на NO2 в атмосферата над София по спътникови данни от Sentinel 5P и наземни данни за периода февруари 2018 - февруари 2020 година. Сб. доклади от годишна университетска научна конференция, 28-29 май, 2020 г., електронно издание, Велико Търново, стр. 559-565, 2020 г., ISSN 2367-7481
- Haugland T., Best Practice Guidance for Effective Methane Management in the Oil and Gas Sector: Monitoring, Reporting and Verification (MRV) and Mitigation, Carbon Limits for the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Geneva, CH, 2019, available, <https://unece.org/sustainable-energymethane-management/best-practice-guidance-effective-methane-management-oil-and>
- Heath G., E. Warner, D. Steinberg and A. Brandt, Estimating U.S. Methane Emissions from the Natural Gas Supply Chain, Approaches, Uncertainties, Current Estimates and Future Studies. Golden, CO, USA, The Joint Institute for Strategic Energy Analysis, the U.S. Department of Energy 's National Renewable Energy Laboratory, the University of Colorado-Boulder, the Colorado School of Mines, the Colorado State University, the Massachusetts Institute of Technology, and Stanford University; , 2015, available, <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/62820.pdf>
- Hester, R., Harrison, R. Air Quality in Urban Environments. Royal Society of Chemistry. Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF. UK. 2009. pp. 163
- Hmiel, B., Petrenko, V.V., Dyonisius, M.N., Buizert, C., Smith, A.M., Place, P.F., Harth, C., Beaudette, R., Hua, Q., Yang, B., Vimont, I., Michel, S.E., Severinghaus, J.P., Etheridge, D., Bromley, T., Schmitt, J., Faïn, X., Weiss, R.F. and Dlugokencky, E. (2020). Preindustrial 14 CH4 indicates greater anthropogenic fossil CH4 emissions. *Nature*, 578, 409–412
- Höglund-Isaksson Lena et al, 2020 a, Containing methane and its contribution to global warming, <https://phys.org/news/2020-02-methane-contribution-global.html>
- Höglund-Isaksson Lena, Adriana Gómez-Sanabria, Zbigniew Klimont, Peter Rafaj and Wolfgang Schöpp, 2020b, Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the GAINS model, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab7457>
- IEA – Global Energy Report 2019, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>
- IEA – Methane Tracker. <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021>
- IIASA - International Institute for Applied Systems Analysis, Defusing the methane bomb—we can still make a difference, 2019, <https://phys.org/news/2019-02-diffusing-methane-bombwe-difference.html>
- IIASA - International Institute for Applied Systems Analysis, Containing methane and its contribution to global warming, 2020, <https://phys.org/news/2020-02-methane-contribution-global.html>
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change - <https://www.ipcc.ch/>

- IPCC report 2021 – Code red for human driven global heating warns UN chief - <https://news.un.org/en/story/2021/08/1097362>
- IPCC Guidelines, Chapter 4, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4: Fugitive emissions. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>
- Irakulis-Loitxate Itziar, Luis Guanter, Yin-Nian Liu, Daniel J. Varon, Joannes D. Maasackers, Yuzhong Zhang, Apisada Chulakadabba, Steven C. Wofsy, Andrew K. Thorpe, Riley M. Duren, Christian Frankenberg, David R. Lyon, Benjamin Hmiel, Daniel H. Cusworth, Yongguang Zhang, Karl Segl, Javier Gorroño, Elena Sánchez-García, Melissa P. Sulprizio, Kaiqin Cao, Haijian Zhu, Jian Liang, Xun Li, Ilse Aben, Daniel J. Jacob. Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian basin. *SCIENCE ADVANCES* •30 Jun 2021• Vol 7, Issue 27• DOI: 10.1126/sciadv.abf4507
- Jacob D. J., A. J. Turner, J. D. Maasackers, J. Sheng, K. Sun, X. Liu, K. Chance, I. Aben, J. McKeever, C. Frankenberg, Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 14371–14396 (2016)
- Jackson R B et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 2020; 15 (7): 071002 DOI: 10.1088/1748-9326/ab9ed2
- Jackson R.B., Solomon E.I., Canadell J.G., Cargnello M., Field C.B. and Abernethy S. (2020). Reply to: Practical constraints on atmospheric methane removal. *Nature Sustainability*, 3, 358–359
- Judith A. Rosentreter, Alberto V. Borges, Bridget R. Deemer, Meredith A. Holgerson, Shaoda Liu, Chunlin Song, John Melack, Peter A. Raymond, Carlos M. Duarte, George H. Allen, David Olefeldt, Benjamin Poulter, Tom I. Battin, Bradley D. Eyre. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 2021; DOI: 10.1038/s41561-021-00715-2
- Kelishadi R, Poursafa P. Air pollution and non-respiratory health hazards for children. *Arch Med Sci.* (2010) 6:483–95. doi: 10.5114/aoms.2010.14458
- Kendall M., Stuart A., 1977, *The Advanced Theory of Statistics*. Vol. 1: Distribution Theory, 4th edn. Griffin, London
- Kholod, N. et al. (2020), Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production, *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
- Kort, E. A. *et al.* Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82 degrees north. *Nature Geoscience* 5, 318–321, 2012, <https://doi.org/10.1038/NGEO1452>
- Kretschmer, K., Biastoch, A., Rüpke, L. & Burwicz, E. Modeling the fate of methane hydrates under global warming. *Global Biogeochemical Cycles* 29, 610–625, <https://doi.org/10.1002/2014GB005011>, 2015
- Kumar A, Singh BP, Punia M, Singh D, Kumar K, Jain VK. Assessment of indoor air concentrations of VOCs and their associated health risks in the library of Jawaharlal Nehru University, New Delhi. *Environ Sci Pollut Res Int.* (2014) 21:2240–8. doi: 10.1007/s11356-013-2150-7
- Lazzati D., Campana S., Rosati P., Panzera M., Tagliaferri G., 1999, *ApJ*, 524, 414
- Legere Laura 2021, Gassy cows, leaking wells and other adventures in measuring methane, <https://phys.org/news/2021-08-qa-gassy-cows-leaking-wells.html>
- Mackenzie J., Turrentine J. Air Pollution: Everything You Need to Know. 2021, <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know>
- MacMillan A., Turrentine J. Everything you wanted to know about our changing climate but were too afraid to ask. 2021, <https://www.nrdc.org/stories/global-warming-101>
- Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A and Bezirtzoglou E. 2020, Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front. Public Health* 8:14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014
- Marcogaz, Guidance for using the MARCOGAZ methane emissions reporting template, MARCOGAZ, Brussels, BE, 2020, available, https://www.marcogaz.org/wp-content/uploads/2021/04/WG_ME-710.pdf Manisalidis I., Elisavet Stavropoulou, Agathangelos Stavropoulos and Eugenia Bezirtzoglou, Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Fron.Public Health*, 20 February 2020 <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Masias M., Freixenet J., Lladó X., Peracaula M., 2012, *MNRAS*, 422, 1674

- Methane Guiding Principles, Reducing Methane Emissions: Best Practice Guide Identification, Detection, Measurement and Quantification, Methane Guiding Principles, 2020, <https://methaneguidingprinciples.org/best-practice-guides>
- Mondal Puja. 2021. Air Pollutants: Types, Sources, Effects and Control of Air Pollutants. <https://www.yourarticlelibrary.com/environment/air-pollutants-types-sources-effects-and-control-of-air-pollutants/9964>
- Morgan T. 2021 Complex ecosystem changes cause more greenhouse gases to be emitted from peatlands, <https://phys.org/news/2021-06-complex-ecosystem-greenhouse-gases-emitted.html>
- National Academies of Sciences E. and Medicine, Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States, The National Academies Press, Washington, DC, 2018, p. 250
- NRC (National Research Council). <https://www.nap.edu/read/10728/chapter/1,2014>
- Oh, Y., Zhuang, Q., Liu, L., Welp, L.R., Lau, M.C.Y., Onstott, T.C., Medvigy, D., Bruhwiler, L., Dlugokencky, E.J., Hugelius, G., D'Imperio, L and Elberling, B. (2020). Reduced net methane emissions due to microbial methane oxidation in a warmer Arctic, *Nat. Clim. Chang.* 10, 317–321, 2020
- Pandey S., R. Gautam, S. Houweling, H. D. van der Gon, P. Sadavarte, T. Borsdorff, O. Hasekamp, J. Landgraf, P. Tol, T. van Kempen, R. Hoogeveen, R. van Hees, S. P. Hamburg, J. D. Maasackers, I. Aben, Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 26376–26381 (2019)
- Pendergrass W., Evaluation of NOAA/NCEP's North America Mesoscale (NAM) 12-km and 4-km High-Resolution Nest (NAM4) Forecast for a typical Southern Temperate Deciduous Forest, 2017, conference proceedings
- REMEDY – Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year - <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/remedy>
- Perret B., Lefevre S., Collet C., 2009, *Pattern Recognit.*, 42, 2470
- Plant G., Eric A. Kort, Lee T. Murray, Joannes D. Maasackers, Ilse Aben. Evaluating urban methane emissions from space using TROPOMI methane and carbon monoxide observations. doi.org/10.1016/j.rse.2021.112756; *Remote Sensing of Environment* 268 (2022) 112756
- Richmont-Bryant J, Owen RC, Graham S, Snyder M, McDow S, Oakes M, et al. Estimation of on-road NO₂ concentrations, NO₂/NO_x ratios, and related roadway gradients from near-road monitoring data. *Air Qual Atm Health.* (2017) 10:611–25. doi: 10.1007/s11869-016-0455-7
- Rigby Matt, Technologies and scientific advances needed to track methane levels in atmosphere, www.sciencedaily.com/releases/2019/12/191210111804.htm
- Rochester University "Using machine learning to understand climate change: Researchers find global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters.", *ScienceDaily.* ScienceDaily, 8 October 2019, www.sciencedaily.com/releases/2019/10/191008115941.htm
- Rosentreter Judith A., Alberto V. Borges, Bridget R. Deemer, Meredith A. Holgerson, Shaoda Liu, Chunlin Song, John Melack, Peter A. Raymond, Carlos M. Duarte, George H. Allen, David Olefeldt, Benjamin Poulter, Tom I. Battin, Bradley D. Eyre. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 2021; DOI: 10.1038/s41561-021-00715-2)
- Saunio Marielle, Philippe Bousquet, Ben Poulter, Anna Peregon, Philippe Ciais, Josep G. Canadell, Edward J. Dlugokencky, Giuseppe Etiope, David Bastviken, Sander Houweling, Greet Janssens-Maenhout, Francesco N. Tubiello, Simona Castaldi, Robert B. Jackson, Mihai Alexe, Vivek K. Arora, David J. Beerling, Peter Bergamaschi, Donald R. Blake, Gordon Brailsford, Victor Brovkin, Lori Bruhwiler, Cyril Crevoisier, Patrick Crill, Kristofer Covey, Charles Curry, Christian Frankenberg, Nicola Gedney, Lena Höglund-Isaksson, Misa Ishizawa, Akihiko Ito, Fortunat Joos, Heon-Sook Kim, Thomas Kleinen, Paul Krümmel, Jean-François Lamarque, Ray Langenfelds, Robin Locatelli, Toshinobu Machida, Shamil Maksyutov, Kyle C. McDonald, Julia Marshall, Joe R. Melton, Isamu Morino, Vaishali Naik, Simon O'Doherty, Frans-Jan W. Parmentier, Prabir K. Patra, Changhui Peng, Shushi Peng, Glen P. Peters, Isabelle Pison, Catherine Prigent, Ronald Prinn, Michel Ramonet, William J. Riley, Makoto Saito, Monia Santini, Ronny Schroeder, Isobel J. Simpson, Renato Spahni, Paul Steele, Atsushi Takizawa, Brett F. Thornton, Hanqin Tian, Yasunori Tohjima, Nicolas Viovy, Apostolos Voulgarakis, Michiel van Weele, Guido R. van der Werf, Ray Weiss, Christine Wiedinmyer, David J. Wilton, Andy Wiltshire, Doug Worthy, Debra Wunch, Xiyan

- Xu, Yukio Yoshida, Bowen Zhang, Zhen Zhang, and Qiuhan Zhu, The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data* 8, 697–751, <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>
- Saunois, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregón, A., Ciais, P., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., Janssens-Maenhout, G., Tubiello, F.N., Castaldi, S., Jackson, R.B., Alexe, M., Arora, V.K., Beerling, D.J., Bergamaschi, P., Blake, D.R., Brailsford, G., Brovkin, V., Bruhwiler, L., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Frankenberg, C., Gedney, N., Höglund-Isaksson, L., Ishizawa, M., Ito, A., Joos, F., Kim, H-S., Kleinen, T., Krummel, P., Lamarque, J-F., Langenfelds, R., Locatelli, R., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K.C., Marshall, J., Melton, J.R., Morino, I., Naik, V., O’Doherty, S., Parmentier, F-J,W, Patra, P.K., Peng, C., Peng, S., Peters, G.P., Pison, I., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Riley, W.J., Saito, M., Santini, M., Schroeder, R., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, P., Takizawa, A., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Viovy, N., Voulgarakis, A., van Weele, M., van der Werf, G.R., Weiss, R., Wiedinmyer, C., Wilton, D.J., Wiltshire, A., Worthy, D., Wunch, D., Xu, X., Yoshida, Y., Zhang, B., Zhang, Z. and Zhu, Q. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, 8, 2
 - Saunois, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., Ciais, P., Arora, V.K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D.R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K.M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P.M., Covey, K., Curry, C.L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M.I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K.M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P.B., Langenfelds, R.L., Laruelle, G.G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., McNorton, J., Miller, P. A., Melton, J. R., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O’Doherty, S., Parker, R.J., Peng, C., Peng, S., Peters, G.P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W.J., Rosentretter, J.A., Segers, A., Simpson, I.J., Shi, H., Smith, S.J., Steele, L.P., Thornton, B.F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F.N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T.S., van Weele, M., van der Werf, G.R., Weiss, R.F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q., and Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623.
 - Sentinel-5P Pre-Operations Data Hub - <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>
 - Sentinel-5P: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P
 - Schwela DH, Köth-Jahr I. Leitfaden für die Aufstellung von Luftreinhalteplänen [Guidelines for the Implementation of Clean Air Implementation Plans]. Landesumweltamt des Landes Nordrhein Westfalen. State Environmental Service of the State of North Rhine-Westphalia (1994).
 - Schneising O., M. Buchwitz, M. Reuter, S. Vanselow, H. Bovensmann, J. P. Burrows, Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited. *Atmos. Chem. Phys.* 20, 9169–9182 (2020)
 - Shakhova, N. *et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience* 7, 64-70, 2014, <https://doi.org/10.1038/ngeo2007>
 - Shindell Drew et al., Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions, 2021, ISBN: 978-92-807-3854-4
 - SEI, Global methane assessment: benefits and costs of mitigating methane emissions, 2021, <https://www.sei.org/publications/global-methane-assessment/>
 - Silveanu F. Aquatic ecosystems source of half of global methane emissions, 2021, <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210407093231.htm>
 - Sjögersten, S., Siegenthaler, A., Lopez, O.R., Aplin, P., Turner, B. and Gauci, V. (2020). Methane emissions from tree stems in neotropical peatlands. *The New Phytologist*, 225,2, 769–781
 - Stetson P. B., 1987, *PASP*, 99, 191
 - Syrakov, D., Prodanova, M., Slavov, K., Etropolska, I., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov, T. (2013): Bulgarian System for Air Pollution Forecast, *Journal of International Scientific Publications ECOLOGY & SAFETY*, Vol. 7, Part 1, ISSN: 1313–2563, pp.325-334 <http://www.science-journals.eu>
 - Syrakov, D., Prodanova, M., Etropolska, I., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov, T. (2014): A MultyDomain Operational Chemical Weather Forecast System, in I. Lirkov et al. (Eds.): *LSSC 2013*, LNCS 8353, pp. 413–420, DOI:10.1007/978-3-662-43880-0 55, Springer-Verlag Berlin Heid. 2014.
 - TEMIS - Tropospheric Emission Monitoring Internet Service ESA - <https://www.temis.nl/index.php>

- Thompson D. R., A. K. Thorpe, C. Frankenberg, R. O. Green, R. Duren, L. Guanter, A. Hollstein, E. Middleton, L. Ong, S. Ungar, Space-based remote imaging spectroscopy of the Aliso Canyon CH₄ superemitter. *Geophys. Res. Lett.* 43, 6571–6578 (2016)
- van Dingener R, Crippa M., Janssens-Maenhout G., Guizzardi D., Dentener F. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations, JNC Science for Policy report, 2018, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c40e6fc4-dbf9-11e8-afb3-01aa75ed71a1/language-en>
- Varon, D. J.; McKeever, J.; Jervis, D.; Maasackers, J. D.; Pandey, S.; Houweling, S.; Aben, I.; Scarpelli, T.; Jacob, D. J. Satellite discovery of anomalously large methane point sources from oil/gas production. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, 46, 13507–13516
- Vellinga Theun 2021, Fact check: Just how harmful is methane? <https://phys.org/news/2021-09-fact-methane.html>
- Vikhlinin A., Forman W., Jones C., Murray S., 1995, *ApJ*, 451, 542
- Weber Thomas, Nicola A. Wiseman, Annette Kock. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communications*, 2019; 10 (1) DOI: 10.1038/s41467-019-12541-7
- Wilson Rachel M., Malak M. Tfaily, Kolton, Eric R. Johnston, Caitlin Petro, Cassandra A. Zalman, J. Hanson, Heino M. Heyman, E. Kyle, W. Hoyt, Elizabeth K. Eder, Samuel O. Purvine, Randall K. Kolka, Stephen D. Sebestyen, Natalie A. Griffiths, Christopher W. Schadt, Jason K. Keller, Scott D. Bridgham, Jeffrey P. Chanton, and Joel E. Kostka, Soil metabolome response to whole-ecosystem warming at the Spruce and Peatland Responses under Changing Environments experiment, *PNAS* June 22, 2021 118 (25) e2004192118; <https://doi.org/10.1073/pnas.2004192118>
- Wilson, Rachel. 2021. Complex ecosystem changes cause more greenhouse gases to be emitted from peatlands. <https://phys.org/news/2021-06-complex-ecosystem-greenhouse-gases-emitted.html>
- Wilson W.E., Suh H.H. Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *J Air Waste Manag Assoc.* (1997) 47:1238–49. doi:10.1080/10473289.1997.10464074
- Wolfe Glenn M., Julie M. Nicely, Jason M. St. Clair, Thomas F. Hanisco, Jin Liao, Luke D. Oman, William B. Brune, David Miller, Alexander Thames, Gonzalo González Abad, Thomas B. Ryerson, Chelsea R. Thompson, Jeff Peischl, Kathryn McCain, Colm Sweeney, Paul O. Wennberg, Michelle Kim, John D. Crouse, Samuel R. Hall, Kirk Ullmann, Glenn Diskin, Paul Bui, Cecilia Chang, and Jonathan Dean-Day, Mapping hydroxyl variability throughout the global remote troposphere via synthesis of airborne and satellite formaldehyde observations 2019; 10.1073/pnas.1821661116 (*Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116**, 11171–11180)
- Zhang Y., R. Gautam, D. Zavala-Araiza, D. J. Jacob, R. Zhang, L. Zhu, et al., Satellite-Observed Changes in Mexico's Offshore Gas Flaring Activity Linked to Oil/Gas Regulations, *Geophys. Res. Lett.*, 2019, 46(3), 1879 – 1888
- Zhang Y., R. Gautam, S. Pandey, M. Omara, J. D. Maasackers, P. Sadavarte, et al., Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space, *Sci. Adv.*, 2020, 6(17), eaaz5120
- Zehner Claus, Methane leak visible from space, 2019, <https://phys.org/news/2019-12-methane-leak-visible-space.html>
- Бокрис, 1982
- Яблански Ц., Петков Г. Наръчник по приложна екология. Ст. Загора 2011, <http://uni-sz.bg/truni2/wp-content/uploads/af/file/ArhivProekti/NarachnikPoPrilojnaEkologiq.pdf>