

УДК 551.2+550.46

Андрэй Петровіч Гусев*канд. геол.-минерал. наук, доц., зав. каф. геологіі і географіі
Гомельскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Франціска Скарыны***Andrei Gusev***Candidate of Geological and Mineralogical Science, Associate Professor,
Dean of the Faculty of Geology and Geography of Francisk Skorina Gomel State University
e-mail: gusev@gsu.by*

ПОТОКИ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ КАК ИНДИКАТОР СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОКА БЕЛАРУСИ)*

На основе съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI изучено содержание метана в тропосфере над территорией юго-востока Беларуси. Исследована пространственная структура и колебания во времени потоков метана в зависимости от тектонического строения. Определен региональный фон тропосферного метана в летний, осенний и зимние периоды. Фоновое содержание метана в тропосфере изменялось от 1824,9 (лето 2021 г.) до 1891,3 (зима 2023 г.). Выявлено, что изменения потока метана имеют сезонный характер (повышение зимой, снижение летом). Изучена динамика содержания метана в тропосфере над узлами космолинеаментов. Предложены критерии и выполнена оценка геодинамической активности узлов космолинеаментов. Установлено, что наиболее высокая геодинамическая активность характерна для узла «Добруш» (расположен в Клинецовском грабене Воронежской антеклизы).

Ключевые слова: метан, Sentinel-5P, TROPOMI, космолинеаменты, геодинамическая активность, Беларусь.

The Tropospheric Methane Flows as an Indicator of Contemporary Geodynamic Activity (on the Example of the South-East of Belarus)

Based on the imagery of the Sentinel-5P TROPOMI satellite, the content of methane in the troposphere over the territory of the south-east of Belarus was studied. The spatial structure and fluctuations in time of methane fluxes depending on the tectonic structure have been studied. The regional background of tropospheric methane in summer, autumn and winter periods has been determined. The background content of methane in the troposphere varied from 1824,9 (summer 2021) to 1891,3 (winter 2023). It is revealed that changes in the methane flux are seasonal (increase in winter, decrease in summer). The dynamics of methane content in the troposphere above the nodes of cosmolineaments has been studied. Criteria are proposed and an assessment is made of the geodynamic activity of cosmolineament nodes. It has been established that the highest geodynamic activity is characteristic of the Dobrush node (located in the Klintsovsky graben of the Voronezh antecline).

Key words: methane, Sentinel-5P, TROPOMI, cosmolineaments, geodynamic activity, Belarus.

Введение

Метан – газ, играющий важную роль в биосфере и являющийся одним из парниковых газов, содержания которых определяют климат Земли. Время жизни метана составляет $9,7 \pm 1,1$ года. Парниковый эффект от метана примерно в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа. В индустриальную эпоху (с 1750 г.) концентрация метана в атмосфере Земли увеличилась с 600–700 до 1 800 ppb и более [1]. Естественные потоки метана составляют от 183 до 248 млн т в год с наиболее вероятной оценкой 215 млн т/год. Среди природных источников метана доминируют: болота и переувлажненные земли (177–284 млн т/год), пресноводные водоемы (8–73 млн т/год), термиты (2–22 млн т/год). На геологические источники приходится 33–75 млн т/год. Антропогенные потоки метана в атмосферу оцениваются в 357 (336–375) млн т/год [1]. Среди антропогенных источников метана доминируют: крупный рогатый скот (87–94 млн т/год), рисоводство (33–44 млн т/год), мусор (67–90 млн т/год), сжигание биомассы (29–36 млн т/год).

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X23КИ-022).*

Метан выделяется в атмосферу в результате таких процессов, как деятельность микроорганизмов на заболоченных территориях, деятельность микроорганизмов в водоемах (реках, озерах), пожары, пищеварение жвачных животных (бактериальная ферментация в желудочно-кишечном тракте), жизнедеятельность насекомых, анаэробное бактериальное разложение органики на дне морей и океанов, таяние многолетней мерзлоты (метан здесь содержится в виде пузырьков и гидратов, в среднем 2,3 мг/кг породы), выделения из месторождений нефти и газа, выделения из угольных месторождений, холодная и горячая дегазация земных недр. Определенный вклад вносят антропогенные процессы выделения метана: пищеварение домашних жвачных животных, рисоводство (деятельность анаэробных метаногенных бактерий), выделения из мест складирования отходов – свалок (деятельность анаэробных метаногенных бактерий), выделения из сточных вод, выбросы при добыче угля, горение биомассы и топлива, выбросы при добыче, переработке, транспортировке, использовании природного газа, выбросы попутного нефтяного газа [1–3].

По другим оценкам [4], ежегодный поток метана составляет 1 000–5 000 млн т. Изотопный состав углерода метана атмосферы близок к изотопному составу углерода метана из эндогенных источников. В составе глубинных газов содержание метана изменяется от 0,1 до 98 %. Метановая дегазация приурочена преимущественно к рифтовым зонам, а также к зонам разломов, узлам пересечения разломов, районам развития кимберлитовых трубок. Максимальные значения фиксируются в грязевых вулканах Альпийско-Гималайского складчатого пояса. В рифтовых зонах содержание метана в газах составляет 20–75 %. Так, В. Л. Сывороткин считает, что существующие оценки эндогенного метана занижены (около 200 млн т в год) и оценивает поток метана в 4 500 млн т. Повышенная эмиссия метана из рек и озер объясняется тем, что практически все реки и часть озер так или иначе связаны с тектоническими нарушениями, т. е. с каналами глубинной дегазации [4].

Таким образом, в качестве гипотезы мы предполагаем, что пространственно-временная структура поля тропосферного метана отражает как поверхностные природные и антропогенные источники, так и глубинные. Отфильтровав поверхностные источники («шум»), мы можем использовать потоки метана как индикатор современной геодинамической активности тектонических структур земной коры. Актуальность изучения метана как индикатора современной геодинамической активности обусловлена тем, что, согласно А. В. Матвееву [5], последняя может оказывать существенное влияние на экологическое состояние окружающей среды. В последнее время для исследования тропосферного метана на региональном и глобальном уровнях стало возможным использовать космическую съемку, в т. ч. с помощью специализированного спутника Sentinel-5P TROPOMI [6; 7].

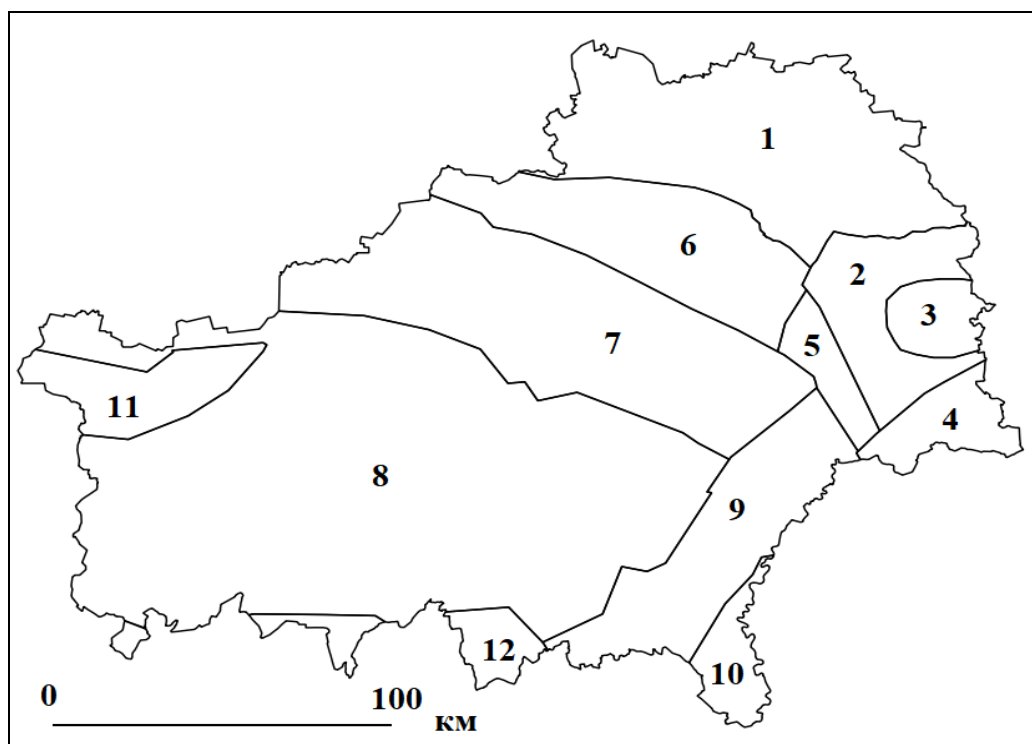
Цель исследования – выяснить связь потоков метана, измеряемых с помощью спутника Sentinel-5P TROPOMI, с тектоническим строением и современной геодинамической активностью.

Задачи исследования:

- 1) обработка и преобразование данных дистанционного зондирования (съемка сенсора TROPOMI спутника Sentinel-5P);
- 2) определение регионального фона метана в тропосфере и его временной динамики;
- 3) изучение пространственно-временной динамики метана в тропосфере над тектоническими структурами юго-востока Беларуси;
- 4) изучение потоков метана узлах космолинементов;
- 5) анализ пространственной связи между содержаниями метана и тектоническими структурами.

Материалы и методика исследований

Район исследований занимает юго-восток Беларуси (в границах Гомельской области). В его пределах находятся такие тектонические структуры, как Припятский прогиб, Воронежская антеклиза, Жлобинская седловина, Брагинско-Лоевская седловина, Украинский щит (рисунок 1).



- 1 – Жлобинская седловина; 2 – Клинцовский грабен Воронежской антеклизы;
 3 – Купревский выступ Воронежской антеклизы;
 4 – Гремячский выступ Воронежской антеклизы; 5 – Гомельская перемычка;
 6 – Северо-Припятское плечо; 7 – Припятский прогиб (северная ступень);
 8 – Припятский прогиб (центральный грабен); 9 – Брагинско-Лоевская седловина;
 10 – Днепровско-Донецкий прогиб; 11 – Микашевичско-Житковичский выступ;
 12 – Украинский щит

Рисунок 1 – Тектонические структуры юго-востока Беларуси

В работе использованы данные космической съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), который определяет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) озона, метана, формальдегида, угарного газа, диоксида серы, диоксида азота. Измерения ведутся ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение $7 \times 5,5$ км.

Данные были преобразованы с помощью модуля Sentinel-5P data explorer для QGIS. Величина случайной ошибки определения метана составляет не более 1 %. Продукт содержит значения концентрации сухого метана в толще атмосферы в миллиардных долях от объема (ppb).

Поскольку атмосферные циркуляции на разных высотах рассеивают и перемешивают по горизонтали поток метана, то использовался метод осреднения измерений в заданном временном отрезке, что позволяет сгладить случайные колебания и выделить регулярную составляющую потока метана от земной поверхности. Временные

срезы, на которых определялась усредненная концентрация тропосферного метана: лето 2021 г.; зима 2022 г.; лето 2022 г.; осень 2022 г.; зима 2023 г.

При анализе качества съемки отбраковывались точки, в которых содержание метана было равно нулю (земная поверхность скрыта облаками). Если количество бракованных точек превышало 50 % от их общего количества, то отбраковывался весь снимок. В результате от 45 до 70 % снимков в зависимости от времени года было отбраковано.

С помощью геоинформационной системы QGIS выделялись операционные территориальные единицы (ОТЕ) 3 типов: тектонические структуры земной коры; зоны разломов, представленные на земной поверхности полосами, имеющими ширину 5 км; узлы космолинеаментов (области пересечения 3 и более суперрегиональных, региональных и субрегиональных космолинеаментов). Использованы тектоническая карта Беларуси масштаба 1 : 500000 и космогенная карта Беларуси масштаба 1 : 500000 [8].

Группировка суточных содержаний CH_4 по месяцам и по периодам в пределах ареала соответствующих ОТЕ выполнялась в программе MS Excel, статистическая обработка данных – в MS Excel и STATISTICA. Статистическая обработка содержания метана включала определение среднего, медианного, минимального, максимального значений, стандартного отклонения, среднеквадратичной ошибки, дисперсии.

В качестве потенциальных антропогенных источников метана рассматривались животноводческие комплексы, полигоны твердых коммунальных отходов, предприятия химической и нефтехимической промышленности, железнодорожные узлы, газораспределительные станции магистральных газопроводов; разрабатываемые месторождения нефти.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты изучения регионального фона приведены в таблице 1. Видно, что содержание метана в тропосфере испытывает сезонные колебания: снижается летом и повышается зимой, что соответствует данным по другим регионам мира и объясняется снижением стока метана за счет фотохимических реакций, т. к. поток солнечной радиации летом увеличивается [3]. Так, летом 2021 г. среднее содержание метана составляло 1 824,9 ppb, а зимой 2022 г. оно увеличилось до 1 890,2 ppb, летом 2022 г. снова снизилось до 1 845,4 ppb и т. д. Аналогичные изменения наблюдаются для медианного содержания метана. Стандартное отклонение также зависит от сезона. Зимой этот показатель минимален (2022 г. – 21,8, 2023 г. – 21,2), а летом максимален (2021 г. – 65,5, 2022 г. – 77,8). Наименьший диапазон колебаний отмечен зимой (соответственно 215,2 и 166,7), наибольший – летом и осенью 2022 г. (соответственно 611,8 и 729,6). Максимальные суточные значения составили 2 307,6 (осень 2022 г.) и 2 118,3 (лето 2023 г.).

Таблица 1 – Фоновые содержания метана в тропосфере юго-востока Беларуси, в ppb

Статистика	Период				
	Лето 2021 г.	Зима 2022 г.	Лето 2022 г.	Осень 2022 г.	Зима 2023 г.
Среднее значение	1 824,9	1 890,2	1 845,4	1 887,6	1 891,3
Ошибка среднего значения	1,5	0,4	1,0	0,9	0,5
Медианное значение	1 845,9	1 889,4	1 878,3	1 891,8	1 894,7
Стандартное отклонение	65,5	21,8	77,8	34,1	21,2
Диапазон колебаний	333,1	215,2	611,8	729,6	166,7
Минимальное значение	1 582,2	1 763,6	1 506,5	1 578,0	1 802,3
Максимальное значение	1 915,3	1 978,8	2 118,3	2 307,6	1 969,1

Можно предположить, что различия в концентрациях тропосферного метана над различными тектоническими структурами могут быть обусловлены их современной геодинамической активностью: над геодинамически активными структурами поток метана будет выше. Потоки метана в тропосфере над тектоническими структурами юго-востока Беларуси характеризуются в таблице 2. Видно, что над некоторыми структурами содержание метана превышает региональный фон. Так, летом 2021 г. среднее содержание метана выше регионального фона над Днепровско-Донецким прогибом (на 29,7 ppb), над Гремячским выступом Воронежской антеклизы (на 35,9 ppb), над Купреевским выступом Воронежской антеклизы (на 21,9 ppb), над Клинецовским грабеном и Гомельской перемышкой (соответственно на 14,7 и 14,8 ppb). Минимум – над центральным грабеном Припятского прогиба. Зимой 2022 г. существенных различий между тектоническими структурами по среднему содержанию метана не наблюдается. Превышения над региональным фоном – до 5 ppb. Максимальная концентрация отмечена над Микашевичско-Житковичским выступом, минимальная – над Днепровско-Донецким прогибом.

Летом 2022 г. наибольшие значения характерны для Гремячского выступа Воронежской антеклизы (среднее – 1 859,0, медианное – 1 880,7 ppb), Северо-Припятского плеча (соответственно 1 857,1 и 1 880,1 ppb), Жлобинской седловины (соответственно 1 850,1 и 1 879,8 ppb). Максимальные разовые концентрации (выше 2 000 ppb) наблюдались только над Припятским прогибом: над северной ступенью (31.07.2022 г.) – 2 118,3, над центральным грабеном (14.08.2022 г.) – 2 015,8 ppb. Над Украинским щитом максимальная концентрация тропосферного метана составила 1 978,9, над Брагинско-Лоевской седловиной – 1 970,8, над Клинецовским грабеном Воронежской антеклизы – 1 928,7 ppb.

Таблица 2 – Динамика потоков метана в тектонических структурах юго-востока Беларуси (среднее содержание и его ошибка), в ppb

Тектоническая структура	Период				
	Лето 2021	Зима 2022	Лето 2022	Осень 2022	Зима 2023
Днепровско-Донецкий прогиб	1 854,6 ± 3,8	1 877,9 ± 2,3	1 843,1 ± 5,6	1 896,0 ± 7,1	1 877,8 ± 3,4
Брагинско-Лоевская седловина	1 834,1 ± 3,5	1 885,4 ± 1,1	1 828,6 ± 3,9	1 886,0 ± 2,2	1 883,8 ± 1,8
Украинский щит	1 814,6 ± 7,0	1 886,3 ± 1,6	1 827,1 ± 7,8	1 857,3 ± 6,5	1 894,1 ± 3,2
Микашевичско-Житковичский выступ	1 810,4 ± 12,1	1 896,0 ± 1,7	1 830,5 ± 5,8	1 880,6 ± 5,3	1 896,4 ± 2,3
Гремячский выступ Воронежской антеклизы	1 860,8 ± 3,9	1 893,7 ± 1,9	1 859,0 ± 4,6	1 887,1 ± 3,5	1 889,4 ± 4,2
Клинецовский грабен Воронежской антеклизы	1 839,6 ± 3,9	1 890,7 ± 1,3	1 834,6 ± 4,0	1 895,8 ± 4,3	1 885,2 ± 2,5
Купреевский выступ Воронежской антеклизы	1 846,8 ± 7,1	1 889,0 ± 2,7	1 830,3 ± 6,8	1 887,1 ± 3,5	1 882,8 ± 3,9
Гомельская перемышка	1 839,1 ± 7,2	1 892,8 ± 2,4	1 836,1 ± 6,3	1 897,9 ± 2,9	1 891,4 ± 3,9
Жлобинская седловина	1 824,2 ± 3,7	1 890,9 ± 1,0	1 850,1 ± 2,2	1 883,2 ± 2,0	1 879,8 ± 1,7
Северо-Припятское плечо	1 825,2 ± 5,4	1 892,8 ± 1,3	1 857,1 ± 2,4	1 894,6 ± 1,4	1 886,5 ± 2,2
Припятский прогиб (северная ступень)	1 816,6 ± 3,6	1 892,2 ± 0,8	1 847,2 ± 2,0	1 893,4 ± 1,3	1 890,3 ± 1,0
Припятский прогиб (центральный грабен)	1 807,6 ± 2,6	1 889,4 ± 0,6	1 835,9 ± 1,4	1 886,1 ± 1,5	1 895,9 ± 0,7
Регион	1 824,9 ± 1,5	1 890,2 ± 0,4	1 845,4 ± 1,0	1 887,6 ± 0,9	1 891,3 ± 0,5

Наименьшие концентрации метана приурочены к Украинскому щиту (соответственно 1 827,1 и 1 862,7 ppb), Брагинско-Лоевской седловине (соответственно 1 828,6 и 1 866,8 ppb), Микашевичско-Житковичскому выступу (соответственно 1 830,5 и 1 876,3 ppb).

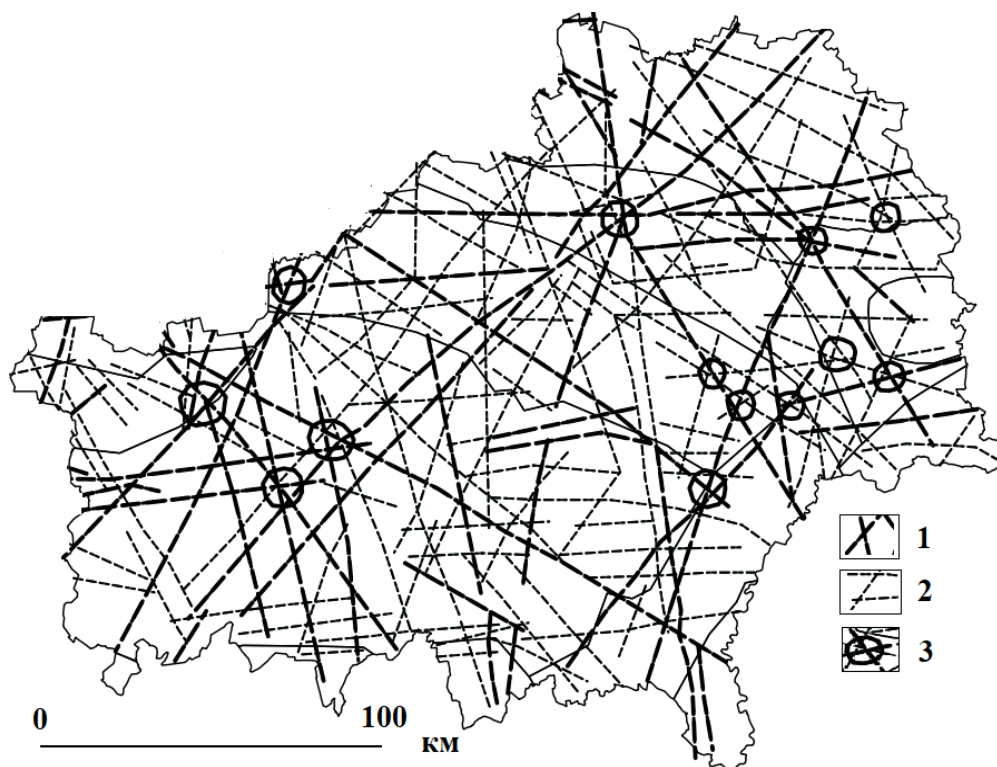
Величина стандартной ошибки среднего содержания метана изменяется от 1,4 (центральный грабен Припятского прогиба) до 7,8 (Украинский щит) ppb. Средняя величина для юго-востока составляет 4,4 ppb. Величина стандартного отклонения колеблется от 57,4 (Гремячский выступ Воронежской антеклизы) до 91,3 (Микашевичско-Житковичский выступ) ppb. Амплитуда колебаний концентрации тропосферного метана составляет от 245 (Гомельская структурная перемычка) до 593,3 (северная ступень Припятского прогиба) ppb. В среднем по тектоническим структурам амплитуда колебаний концентрации метана составила 372,2 ppb.

Было изучено содержание тропосферного метана над зонами тектонических разломов (Северо-Припятский краевой разлом, Лоевский разлом, Южно-Припятский разлом, Жлобинский разлом, Оземлинско-Первомайский разлом). Установлено, что над зонами тектонических разломов усредненная за летний период 2022 г. величина содержания метана в столбе тропосферы составила 1 849,4, а медианное значение – 1 882,0 ppb (отличия от фона статистически недостоверны). Однако над некоторым разломными структурами поток метана проявляется сильнее. Над восточной частью Северо-Припятского краевого разлома (отделяет Припятский прогиб от Северо-Припятского плеча) среднее содержание метана составило 1 857,3, а над западной частью этого же разлома (отделяет прогиб от Белорусской антеклизы) – 1 867,1 ppb. Над Лоевским разломом (отделяет Брагинско-Лоевскую седловину от Припятского прогиба) среднее содержание метана составило 1 867,7, а медианное – 1 884,2 ppb. Над Жлобинским разломом (отделяет Жлобинскую седловину от Северо-Припятского плеча) среднее содержание метана составило 1 856,1, медианное – 1 886,3 ppb. Над Южно-Припятским разломом (отделяет Украинский щит от Припятского прогиба) – соответственно 1 832,9 и 1 875,3 ppb. Таким образом, средние и медианные значения содержания метана в столбе тропосферы в летние периоды в рассмотренных надразломных зонах, как правило, выше фоновых (исключение – Южно-Припятский разлом). Средние содержания метана в этих надразломных зонах превышают фон на 9,7, медианные – на 11,5 ppb. Однако данные отличия также статистически недостоверны.

Таким образом, отличия содержаний метана между разными тектоническими структурами статистически недостоверны, что, вероятно, обусловлено влиянием биогенных и антропогенных источников метана, которые в данной работе не рассматриваются. Можно предположить, что совокупное влияние разных источников маскирует тектонические эффекты в поле концентраций тропосферного метана.

Согласно работам И. С. Копылова современная геодинамическая активность концентрируется в узлах пересечения линеаментов [9–10]. На основе космогенной карты Беларуси [8], нами в регионе выделено 20 узлов космолинеаментов (пересечение трех и более космолинеаментов).

В пределах каждого узла были определены средние концентрации метана по пять временным срезам (сезонам) 2021–2023 гг. В связи со значительной облачностью и небольшой площадью объектов только для 13 узлов (рисунок 2) получилось определить концентрации метана по всем 5 сезонам.



- 1 – суперрэгіянальныя і рэгіянальныя касмолінеаменты;
 2 – субрэгіянальныя і лакальныя касмолінеаменты;
 3 – узлы касмолінеаментов, в которых изучались потоки метана

Рисунок 2 – Карта-схема касмолінеаментов юго-востока Беларуси

Среднее содержание метана над узлами касмолінеаментов оказалось выше фоновых значений на протяжении всех 5 временных срезов (рисунок 3). Однако, отличия в зимние периоды статистически недостоверны. Наиболее сильно содержание метана над узлами касмолінеаментов отличается от фонового в летние периоды. Если анализировать динамику содержания метана над каждым узлом в отдельности, то можно разделить последние на три группы: 1) узлы, над которыми содержание метана в течение всех 5 временных срезов превышает региональный фон (2 узла); 2) узлы, над которыми содержание метана превышает региональный фон на отдельных временных срезах (9 узлов); 3) узлы, над которыми содержание метана не превышает региональный фон (2 узла).

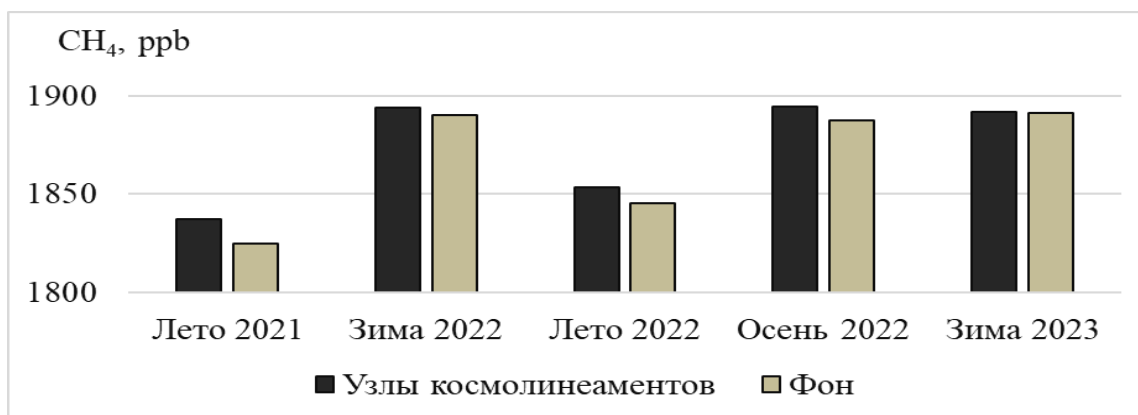


Рисунок 3 – Динамика среднего содержания метана над узлами касмолінеаментов в сравнении с региональным фоном

К первой группе относится узел космолинеаментов «Добруш», расположенный в районе города Добруш, населенных пунктов Жгунь и Жгуно-Буда (пересечение 2 региональных и 2 субрегиональных космолинеаментов), который находится в пределах Воронежской антеклизы. Здесь содержание метана превышает фон в течение всего периода наблюдений, вне зависимости от сезона года (рисунок 4). Летом 2021 г. фон превышен на 27,8 ppb, зимой 2022 г. – на 10,5 ppb, летом 2022 г. – 6,2 ppb, осенью 2022 г. – на 9,4 ppb, зимой 2023 г. – на 17,5 ppb. Максимальные содержания составляли по периодам: лето 2021 г. – 1 881,7 (фон превышен на 56,8); зима 2022 г. – 1 925,6 (фон превышен на 35,4); лето 2022 г. – 1 912,3 (фон превышен на 66,9); осень 2022 г. – 1 908,0 (фон превышен на 20,4); зима 2023 г. – 1 926,3 (фон превышен на 35,0) ppb (т. е. максимальные значения содержания метана выходят за пределы стандартного отклонения). При этом возможные антропогенные источники метана на территории данного узла отсутствуют.

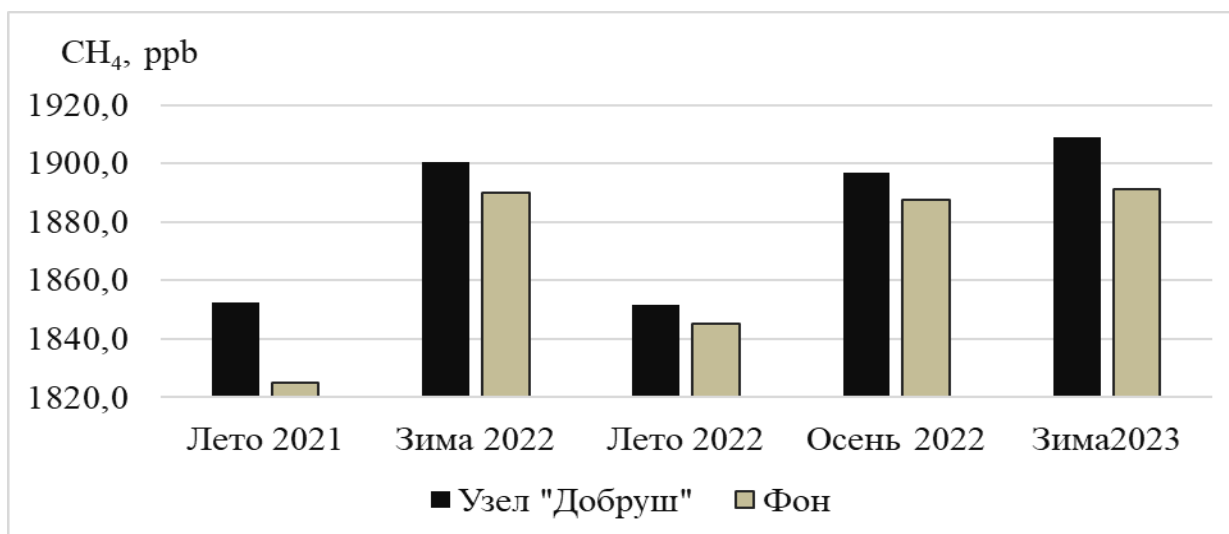


Рисунок 4 – Динамика среднего содержания метана над узлом космолинеаментов «Добруш» в сравнении с региональным фоном

На основе выполненного анализа пространственно-временной динамики потока метана в регионе нами предлагаются следующие признаки оценки геодинимической активности узлов космолинеаментов:

- 1) превышение среднего (медианного) содержания метана в тропосфере фоновых значений вне зависимости от сезона (на 10 и более ppb);
- 2) превышение максимальным содержанием метана фоновое значение в соответствующий сезон (лето, осень, зима) не менее, чем на величину стандартного отклонения ($\max \pm \sigma$);
- 3) отсутствие потенциальных антропогенных источников.

Все три критерия выполняются в случае узла «Добруш».

Узел космолинеаментов «Гомель» (пересечение 4 субрегиональных космолинеаментов, находится в пределах Воронежской антеклизы) характеризуется превышением регионального фона летом 2021 г. – на 21,2 ppb, осенью 2022 г. – на 8,0 ppb и зимой 2023 г. – на 16,0 ppb. Максимальные содержания составляли по периодам: лето 2021 г. – 1 883,5 (фон превышен на 58,6); зима 2022 г. – 1 911,7 (фон превышен на 21,5); лето 2022 г. – 1 926,5 (фон превышен на 81,1); осень 2022 г. – 1 913,0 (фон превышен на 25,4); зима 2023 г. – 1 907,6 (фон превышен на 16,3) ppb. Максимальные значения, также, как и в предыдущем случае, выходят за пределы стандартного отклонения ($> 1\sigma$) в каждом из рассматриваемых временных интервалов. Однако на территории данного

узла, вероятно, могут иметься антропогенные источники выбросов метана (утечки метана на железнодорожных станциях, промышленных и агропромышленных предприятиях, в жилой застройке). Схожая ситуация наблюдается в узлах «Грановка» (пересечение двух региональных и двух субрегиональных космолинеаментов), «Чкалово» (пересечение трех региональных и двух субрегиональных космолинеаментов). В узлах «Светиловичи» (пересечение пяти субрегиональных и локальных космолинеаментов) и «Уборок» (пересечение трех региональных космолинеаментов) содержание метана не превышает региональный фон в течение всего времени наблюдений. Таким образом, рассмотренные узлы космолинеаментов различаются по динамике потоков метана, что может быть проявлением их различий в степени геодинамической активности.

Заклучение

Проведенные исследования показали следующее:

1. Изменения среднего содержания метана имеют сезонный характер (повышение зимой, снижение летом), что обусловлено особенностями стока метана в связи фотохимическими реакциями в атмосфере.

2. Региональный фон составил: летом 2021 г. – $1\,824,9 \pm 1,5$; зимой 2022 г. – $1\,890,2 \pm 0,4$; летом 2022 г. – $1\,845,4 \pm 1,0$; осенью 2022 г. – $1\,887,6 \pm 0,9$; зимой 2023 г. – $1\,891,3 \pm 0,5$ ppb.

3. Летом 2021 г. максимальные потоки метана отмечены над Днепровско-Донецким прогибом, Гремячским выступом Воронежской антеклизы, Купреевским выступом Воронежской антеклизы, Клинцовским грабеном и Гомельской перемычкой; летом 2022 г. – над Гремячским выступом Воронежской антеклизы, Северо-Припятским плечом, Жлобинской седловиной; осенью 2022 г. – над Северо-Припятский плечом, Днепровско-Донецким прогибом, Клинцовским грабеном, Гомельской перемычкой, северной ступенью Припятского прогиба; в зимние периоды отличия по среднему содержанию метана в тропосфере между тектоническими структурами и региональным фоном отсутствуют.

4. Проведено изучение динамики потока метана над узлами космолинеаментов: среднее содержание метана над узлами космолинеаментов оказалось выше фоновых значений на протяжении всех пяти временных срезов.

5. Разработаны критерии оценки геодинамической активности узлов космолинеаментов по потокам метана: 1) превышение среднего (медианного) содержания метана в тропосфере фоновых значений вне зависимости от сезона (на 10 и более ppb); 2) превышение максимальным содержанием метана фонового значения в соответствующий сезон (лето, осень, зима) не менее, чем на величину стандартного отклонения ($\max \pm \sigma$); 3) отсутствие потенциальных антропогенных источников.

6. Выполнена оценка геодинамической активности узлов космолинеаментов юго-востока Беларуси, согласно которой высокая геодинамическая активность характерна для узла «Добруш» (Клинцовский грабен Воронежской антеклизы).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / под ред. В. Г. Бондура, И. И. Мохова, А. А. Макоско. – М. : РАН, 2022. – 388 с.

2. Киселев, А. А. С метаном по жизни / А. А. Киселев, И. Л. Кароль. – СПб. : Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова, 2019. – 73 с.

3. Семенов, С. М. Роль метана в современном изменении климата / С. М. Семенов, И. Л. Говор, Н. Е. Уварова. – М. : НИИПЭ, 2018. – 106 с.

4. Сывороткин, В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / В. Л. Сывороткин. – М. : Геоинформцентр, 2002. – 250 с.
5. Матвеев, А. В. Классификация природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 98–106.
6. Черепанова, Е. В. Анализ по космическим данным TROPOMI аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири / Е. В. Черепанова, Н. В. Феоктистова, М. А. Чудакова // Исслед. Земли из космоса. – 2020. – № 5. – С. 63–77.
7. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019–2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI / В. И. Богоявленский [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 304–319.
8. Космотектоническая карта Беларуси масштаба [Карта] : 1 : 50 0000 / Р. Г. Горещкий [и др.] // Літасфера. – 2013. – № 1 (38). – С. 3–29.
9. Копылов, И. С. Линеаментно-блоковое строение и геодинамические активные зоны Среднего Урала / И. С. Копылов // Вестн. Перм. ун-та. Геология. – 2011. – Вып. 3 (12). – С. 18–32.
10. Копылов, И. С. Геодинамические активные зоны Приуралья, их проявления в геофизических, геохимических, гидрогеологических полях / И. С. Копылов // Успехи соврем. естествознания. – 2014. – № 4. – С. 69–74.

REFERENCES

1. Mietan i klimatichieskije izmienenija: nauchnyje problemy i tiekhnologichieskije aspiekty / pod ried. V. G. Bondura, I. I. Mokhova, A. A. Makosko. – M. : RAN, 2022. – 388 s.
2. Kisieliiov, A. A. S mietanom po zhizni / A. A. Kisieliiov, I. L. Karol'. – SPb. : GI. gieofizich. obsiervatorija im. A. I. Vozejkova, 2019. – 73 s.
3. Siemionov, S. M. Rol' mietana v sovriemennom izmenenii klimata / S. M. Siemionov, I. L. Govor, N. Ye. Uvarova. M. : NIPE, 2018. – 106 s.
4. Syvorotkin, V. L. Glubinnaja diegazacija Ziemli i global'nyje katastrofy / V. L. Syvorotkin. – M. : Geoinformcentr, 2002. – 250 s.
5. Matviejev, A. V. Klassifikacija prirodnykh i prirodno-antropogiennykh opasnostiej litosfiernogo klassa na tierritorii Bielarusi / A. V. Matviejev // Litasfiera. – 2017. – №1 (46). – S. 98–106.
6. Chieriepanova, Ye. V. Analiz po kosmichieskim dannym TROPOMI anomalij koncentracij mietana nad vygorievshimi v 2018–2019 gg. tierritorijami borieal'no-arktichieskoj zony Vostochnoj Sibiri / Ye. V. Chieriepanova, N. V. Fieoktistova, M. A. Chudakova // Isslied. Ziemli iz kosmosa. – 2020. – № 5. – S. 63–77.
7. Bogojavlenskij, V. I. Monitoring izmienenij koncentracii mietana v atmosferie Arktiki v 2019–2021 gg. po dannym spiektrometra TROPOMI / V. I. Bogojavlenskij, O. S. Sizov, R. A. Nikonov, I. V. Bogojavlenskij // Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2022. – T. 12, № 3. – S. 304–319.
8. Kosmotiektonichieskaja karta Bielarusi [Karta] : 1 : 50 0000 / R. G. Goreckiy [i dr.] // Litasfiera. – 2013. – № 1 (38). – S. 3–29.
9. Kopylov, I. S. Linieamientno-blokoivoje strojenije i gieodinamichieskije aktivnyje zony Sriedniego Urala / I. S. Kopylov // Viestn. Pierm. un-ta. Gieologija. – 2011. – Vyp. 3 (12). – S. 18–32.
10. Kopylov, I. S. Gieodinamichieskije aktivnyje zony Priural'ja, ikh projavlienija v gieofizichieskikh, gieokhimichieskikh, gidrogieologichieskikh poliakh / I. S. Kopylov // Uspiekhii sovriem. jestiestvoznaniya. – 2014. – № 4. – S. 69–74.