

## ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОН

А. П. Гусев

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Беларусь  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru

Цель работы – оценка современной геодинамической активности разломных зон с помощью газогеохимических индикаторов. Обобщены результаты многолетних геофизических и газогеохимических исследований современной геодинамической активности на территории Гомельской структурной перемычки и сопредельной территории Припятского прогиба. В качестве индикаторов геодинамической активности рассматриваются пространственно-временные аномалии водорода в почвенном газе, гелия в подземных водах и тропосферного метана. Исследования включали: площадную съемку водорода в почвенном газе и гелия в подземных водах (грунтовой и первый напорный водоносные горизонты); изучение временной динамики водорода в стационарных пунктах наблюдения; изучение пространственно-временных изменений концентраций тропосферного метана. Для изучения поля тропосферного метана использованы данные космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI (2019–2024). В качестве дополнительного метода выявления аномалий метана использовался спектральный индекс NDMI (рассчитывался на основе съемки спутников Landsat 8–9 и Sentinel-2). На основе проведенных работ предложен комплекс газогеохимических индикаторов современной геодинамической активности тектонических структур в условиях древних платформ, включающий гелий (в подземных водах), водород (в почвенном газе) и метан (в тропосфере). Представленные в статье примеры показывают, что газогеохимические методы могут эффективно решать задачи мониторинга геодинамической активности.

**Ключевые слова:** геодинамически активные зоны, разломы, метан, водород, гелий, индикаторы.

## ВВЕДЕНИЕ

Геодинамически активные зоны – локализованные в пространстве участки земной коры различного масштаба, в которых возникают условия для концентрации и разрядки тектонических напряжений, изменений деформированности земной коры [7; 8; 10; 13]. К геодинамически активным зонам относят тектонические разломы (зоны повышенной трещиноватости), над которыми наблюдаются: интенсивные локальные аномалии вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности, характеризующиеся высокой амплитудой (50–70 мм/год), коротким периодом (0,1–1,0 года), пространственной локализацией (0,1–1 км), пульсационным и знакопеременным характером [9]; аномальные вариации геофизических полей [8; 9]; геохимические аномалии [2; 3]. Изменения флюидно-газового режима в геодинамически активных зонах отражаются в колебаниях состава газов, влажности и температуры почвогрунтов, приземного слоя атмосферы, что может фиксироваться как наземными, так и дистанционными исследованиями [1].

Изучение геодинамически активных зон представляется актуальной геоэкологической задачей. Это обусловлено тем, что современная геодинами-

ческая активность влияет на развитие экзогенных геологических процессов; защищенность подземных вод к техногенным загрязнениям; процессы коррозии подземных технических систем; аномальные деформации земной поверхности; сейсмичность [7; 8]. Геоэкологический аспект современной геодинамической активности выражается в риске аварий технических систем, сопряженных с загрязнением компонентов ландшафта, в снижении устойчивости природных геосистем к техногенным воздействиям. Таким образом, современная геодинамическая активность является важным фактором, который может оказывать прямое или косвенное влияние на геоэкологическую ситуацию. Риск негативных последствий современной геодинамической активности следует учитывать при геоэкологическом прогнозировании. Однако современная геодинамическая активность, как правило, редко рассматривается при геоэкологической оценке территории. Одной из методических проблем являются различия в оцениваемых территориальных единицах: геоэкологическая оценка проводится по административным или ландшафтным территориальным единицам, а оценка геодинамической активности – по тектоническим структурам.

Актуальной проблемой является применение методов дистанционного зондирования Земли

(ДДЗ) для оперативного выявления и оценки опасности геодинамически активных зон.

Цель работы: выявление геодинамически активных зон на основе применения газогеохимических индикаторов. Решаемые задачи: обобщение данных о современной геодинамической активности на юго-востоке Беларуси; изучение водорода в почвенном газе и гелия в подземных водах (грунтовых и первый напорный водоносные горизонты); изучение пространственно-временных изменений концентрации тропосферного метана (по данным космической съемки); оценка современной геодинамической активности тестовых участков; разработка системы газогеохимических индикаторов геодинамически активных зон.

## РАЙОН И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований – Гомельская структурная перемычка и сопредельные участки (рис. 1). Гомельская структурная перемычка представляет собой тектоническую структуру, соединяющую Воронежскую антеклизу с Припятским прогибом и Брагинско-Лоевской седловиной и расположен-

ную на юго-востоке Беларуси. Юго-западной границей Гомельской структурной перемычки является Северо-Припятский суперрегиональный разлом (мантийного заложения), северо-западной границей – Малиновско-Глазовский региональный разлом, восточной границей – Гомельский субрегиональный разлом, южной границей – Верхнеднепровский региональный разлом [14].

Исследования проводились на 5 тестовых участках (рис. 1):

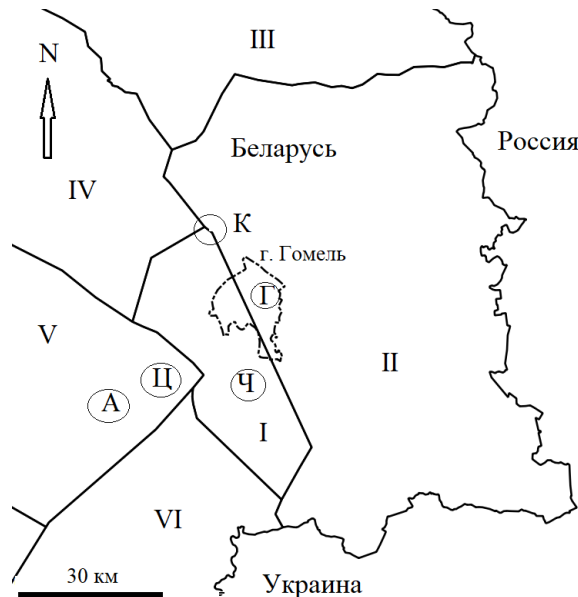
участок «Костюковка» – зона пересечения Гомельского, Костюковского, Жлобинского и Белицкого разломов; глубина залегания кристаллического фундамента 0,6–0,9 км;

участок «Цыкуны» – зона пересечения Северо-Припятского и Первомайского разломов; глубина залегания фундамента 2,8–3,2 км;

участок «Александровка» – зона Александровского разлома; глубина залегания фундамента 3,6–4,2 км;

участок «Гомель» – вне известных разломов; глубина залегания фундамента 0,5–0,6 км;

участок «Ченки» – вне известных разломов; глубина залегания фундамента 0,7–0,8 км.



Тектонические структуры: I – Гомельская структурная перемычка; II – Воронежская антеклиза; III – Жлобинская седловина; IV – Северо-Припятское плечо; V – северная ступень Припятского грабена; VI – Брагинско-Лоевская седловина. Тестовые участки: А – «Александровка»; Г – «Гомель»; К – «Костюковка»; Ц – «Цыкуны»; Ч – «Ченки»

Рисунок 1 – Тектоническая схема района исследований

Исследования включали: площадную съемку водорода в почвенном газе и гелия в подземных водах (грунтовых и первый напорный водоносные горизонты); изучение временной динамики водорода в стационарных пунктах наблюдения; изучение пространственно-временных изменений concentra-

ций тропосферного метана. Временная динамика водорода регистрировалась на 4 пунктах («Костюковка», «Цыкуны», «ГГУ», «Ченки»), расположенных на различном удалении от разломных структур. Площадная водородная съемка проводилась путем отбора проб из шпуров 0,5–1 м и последующего из-

мерения в лаборатории с помощью водородного газоанализатора с предельной чувствительностью 10–6 % об. [2; 3]. Отбор проб воды производился специальным пробоотборником из придонного слоя колодцев и скважин. Для определения содержания гелия использовался ИНГЕМ-1.

Изучение тропосферного метана проводилось с помощью космической съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument). Сенсор TROPOMI определяет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) метана [17; 19]. Измерения ведутся ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение  $3,5 \times 5,5$  км. Величина случайной ошибки определения метана составляет не более 1 %. Архивированный продукт съемки TROPOMI содержит значения концентрации сухого метана в толще атмосферы в миллиардных долях от объема (ppb). Регулярная составляющая потока метана определялась с помощью осреднения измерений на заданном временном отрезке.

Для выявления локальных источников метана использована съемка спутников Sentinel-2 и семейства Landsat в каналах зонах коротковолнового инфракрасного излучения: SWIR1 и SWIR2. Как показано в работах С. М. Webber и J. P. Kerekes [20], D. J. Varon et al. [18], эти каналы чувствительны к содержанию метана в атмосфере. Как индикатор метана предлагается индекс NDMI (Normalized Difference Methane Index):  $NDMI = (SWIR2 - SWIR1) / (SWIR2 + SWIR1)$ . Величина NDMI изменяется от –1 до +1. Совместное использование снимков нескольких спутников позволяет увеличить временное разрешение и снизить влияние неблагоприятных метеоусловий.

Для обработки данных Sentinel-5P TROPOMI, Landsat-8, Landsat-9, Sentinel-2, построения картосхем использовалась геоинформационная система QGIS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проводимые в 1980–1990-е гг. на территории юго-востока Беларуси газогеохимические и геофизические исследования выявили высокую геодинамическую активность ряда тектонических структур [2; 3; 4; 11; 12; 16]. На участке «Александровка» зафиксированы высокоградиентные аномалии вертикальных движений земной поверхности (10–20 и более мм/км в год), локализованные вблизи разрывных нарушений. Причиной формирования аномалий вертикальных движений предполагаются автоколебательные процессы в разломной зоне [9; 13]. Над Александровским разломом также наблюдались

аномальные короткопериодные колебания геомагнитного поля. Амплитуда колебаний полного вектора напряженности геомагнитного поля  $\Delta T$  составила 10–20 нТл (вне разлома – до 5 нТл).

Комплексные геофизические исследования зафиксировали в зоне Александровского разлома сопряженные в пространстве аномалии водорода, радона и торона в подпочвенном воздухе и поля атмосферного электричества. Предполагалось, что схожее поведение указанных параметров обусловлено единым источником миграцией газов в разрывных структурах [16].

Были обнаружены аномалии гелия в подземных водах [11]. Интенсивные аномалии гелия в грунтовых водах и водах первого напорного горизонта приурочены к Александровскому разлому (колодцы в населенных пунктах Остров, Грановка, Александровка, Некрасово). В грунтовых водах содержание гелия составляло от  $7 \cdot 10^{-5}$  до  $19 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup> (фоновые значения – до  $7 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>). В водах первого напорного горизонта – от  $66 \cdot 10^{-5}$  до  $1940 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup> (фоновые значения – до  $10 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>). Здесь же обнаружена гидрохимическая аномалия – высокая минерализация (до 12 г/дм<sup>3</sup>) воды первого напорного горизонта в населенном пункте Остров [13].

Изучение содержания гелия в подземных водах более глубоких водоносных горизонтов проводилось на участках «Костюковка», «Ченки» и «Гомель». Содержание водорастворенного гелия в скважине на участке «Костюковка» (интервал опробования 576–603 м) изменялось в пределах от 2,6 до 4,0 ( $3,25 \pm 0,12$ ) мг/дм<sup>3</sup>. Здесь же содержание водорода в выделяющемся газе при первом опробовании составило 1058 ppm, при последующих опробованиях оно колебалось в пределах от 2 до 80 ppm. В скважине (интервал опробования 468–499 м) «Ченки» содержание водорастворенного гелия составляло от 0,085 до 0,128 ( $0,106 \pm 0,006$ ) мг/дм<sup>3</sup>. Содержание водорода было в пределах его атмосферных концентраций – 0,5–1 ppm (в пределах погрешности измерений  $10^{-6}$  %). На территории города Гомеля были опробованы 4 скважины, вскрывающие нижнюю часть осадочного чехла и кристаллический фундамент. Содержание водорастворенного гелия изменялось от 0,026 до 2,79 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание водорода во всех случаях составляло 0,5–1 ppm. По результатам этих исследований установлено: на участке Костюковка имеет место 1) аномально высокая гелиенасыщенность подземных вод нижней части осадочного чехла, которая превышает в несколько раз таковую для вод кристаллического фундамента на территории Гомеля; 2) высокое содержание водорода в выделяющемся при самоизливе газе. Как в случае гелия, так и водорода здесь были

зафиксированы их максимальные концентрации для района исследований.

Кроме того, в двух колодцах на участке «Костюковка» обнаружена гидрохимическая аномалия – повышенная минерализация грунтовых вод (3 г/дм<sup>3</sup>).

Содержание гелия в грунтовых водах и водах первого водоносного горизонта на участках «Чен-

ки» и «Гомель» находились в пределах фоновых величин [11].

Водородная съемка с помощью шпуров (до 0,5 м) выявила аномалии повышенного содержания водорода в подпочвенном воздухе на участке «Костюковка» [2; 3] и «Александровка» [16]. На участках «Гомель» и «Ченки» содержание водорода не превышала его фоновую концентрацию (рис. 2).

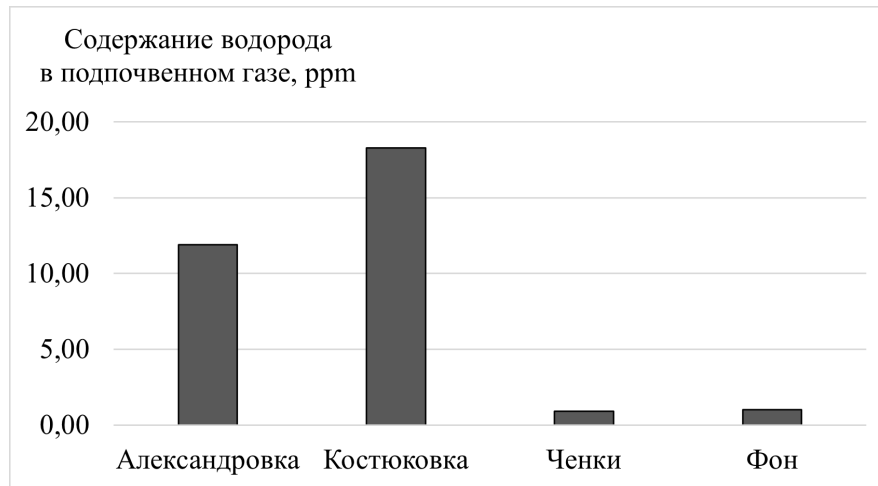


Рисунок 2 – Содержание водорода в подпочвенном газе тестовых участков

Изучение короткопериодных колебаний концентрации подпочвенного водорода с помощью стационарных наблюдений на 4 участках (кроме участка «Александровка») позволило выявить следующие закономерности. На участках «Костюковка» и «Цыкуны» в спектре колебаний четко выделяются суточная и полусуточная гармоника, которые имеют высокую степень корреляции (коэффициент корреляции от +0,68 до +0,75) с расчетными приливными деформациями (с некоторым запаздыванием). Амплитуда суточных вариаций 1–3, полусуточных вариаций – 1–2 ppm. Это объясняется тензочувствительностью зон разломов к приливным деформациям, что обуславливает изменения условий миграции водорода в трещинах. Внутри-блоковые участки («Гомель» и «Ченки») обладают низкой тензочувствительностью и здесь водородное поле на приливные деформации не реагирует. Имеется только слабовыраженная суточная гармоника с амплитудой менее 0,5 ppm [2; 3].

Таким образом, на основе всех выше указанных исследований участки «Александровка» и «Костюковка» представляют собой геодинамически активные зоны; на участках «Гомель» и «Ченки» проявления современной геодинамической активности отсутствуют.

Развитие дистанционных методов зондирования Земли привело к созданию спутниковых систем, позволяющих с высокой точностью фик-

сировать выбросы метана, что открывает новые возможности для выявления геодинамически активных зон и оперативного мониторинга процессов газифлюидопереноса в разломных зонах [5; 15]. Среди разнообразных источников эмиссии метана в атмосферу дегазация недр занимает видное место [6; 15]. Так, наибольшие концентрации тропосферного метана отмечаются над странами, расположенными в областях повышенной сейсмической активности и нефтегазоносности недр, приуроченных к зонам столкновения литосферных плит [15].

Динамика содержаний тропосферного метана над территорией Беларуси в 2019–2024 гг. имела следующие особенности. В зимний период средние концентрации изменялись от 1818 до 1898,3 ppb; в летний – от 1793,2 до 1872,4 ppb. Зимой концентрация метана, как правило, выше, чем летом (исключение 2024 г.). Различия между зимним и летним сезонами составляют от 5,0 (2020 г.) до 89,3 (2023 г.) ppb. Единичные максимальные концентрации, наблюдаемые в отдельных точках, в рассматриваемый период составляли: 2257,2 (зима 2023 г.), 2210,7 (зима 2021 г.), 2202,9 (зима 2024 г.) ppb. Для выяснения влияния на пространственную неоднородность содержаний метана поверхностных природных (болота, водоемы) и антропогенных факторов были выбраны две группы объектов: города и особо ох-

раняемые природные территории (ООПТ). Как правило, среднее содержание метана над городами выше среднего содержания метана над территорией Беларуси в целом, однако это различие не всегда статистически достоверно (например, зимой 2019 г., летом 2021 г., зимой 2024 г.). Так, статистически значимые различия в содержании метана между городами и ООПТ наблюдались летом 2020 г., зимой 2021 г., зимой 2022 г., летом 2023 г., зимой 2024 г. В остальные периоды наблюдений достоверные отличия между городами и ООПТ отсутствовали. Эти результаты показывают, что антропогенные источники, которые концентрируются в городах, вероятно, формируют более мощные потоки метана, чем природные экосистемы ООПТ.

Таким образом, содержание тропосферного метана отличается крайней изменчивостью во времени, подвержено значительным сезонным колебаниям. В зимний период концентрация метана увеличивается за счет снижения активности реакций его фотохимического разрушения в атмосфере, а также, вероятно, за счет увеличения техногенных выбросов (в связи с отопительным сезоном). Возрастает влияние колебаний метеорологических условий (облачности) на результаты космической съемки. Оптимальным сезоном для выявления геодинимических эффектов в поле тропосферного метана является лето.

Для летних сезонов 2019–2024 гг. были получены усредненные содержания метана над изучаемыми участками (табл. 1).

**Таблица 1** – Динамика содержания тропосферного метана (среднее и ошибка среднего) над тестовыми участками, в ppb

| Год  | Участок        |                 |                |                 |                 | Беларусь (фон) |
|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
|      | «Костюковка»   | «Александровка» | «Цыкуны»       | «Гомель»        | «Ченки»         |                |
| 2019 | 1846,4<br>2,5± | 1833,0<br>3,8±  | 1826,8<br>4,1± | 1830,1<br>9,5±  | 1791,7<br>21,2± | 1812,5<br>0,2± |
| 2020 | 1846,5<br>4,7± | 1830,4<br>4,0±  | 1828,5<br>5,3± | 1836,8<br>10,2± | 1830,2<br>9,3±  | 1817,5<br>0,3± |
| 2021 | 1878,0<br>4,0± | 1858,3<br>6,7±  | 1848,6<br>9,3± | 1813,8<br>13,1± | 1766,7<br>32,7± | 1830,2<br>0,7± |
| 2022 | 1873,5<br>6,7± | 1856,8<br>7,9±  | 1850,2<br>7,8± | 1808,5<br>24,7± | 1820,1<br>28,5± | 1843,0<br>±0,5 |
| 2023 | 1873,5<br>8,6± | 1853,3<br>9,0±  | 1852,5<br>7,3± | 1830,1<br>15,5± | 1812,3<br>11,5± | 1793,2<br>0,5± |
| 2024 | 1886,2<br>3,7± | 1887,7<br>±3,9  | 1882,5<br>0,3± | 1871,6<br>5,5±  | 1877,9<br>4,7±  | 1878,7<br>1,0± |

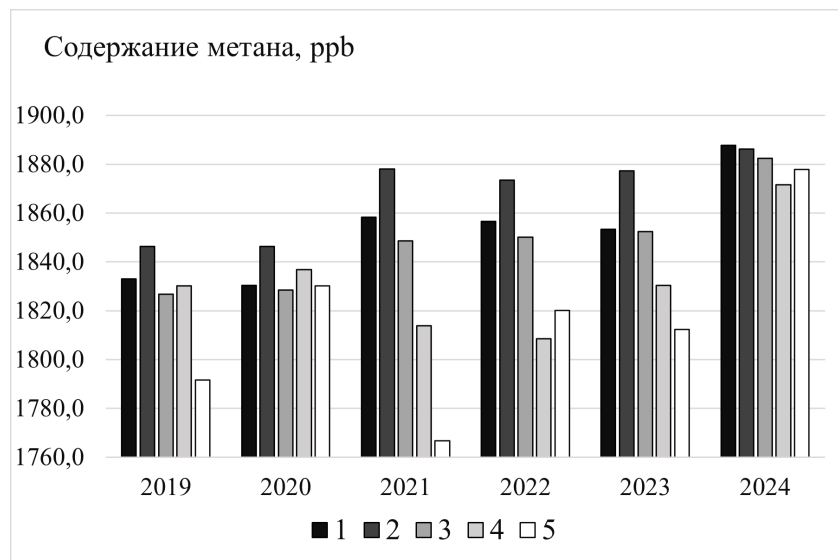
Выделены значения, статистически достоверно ( $p < 0,05$ ) отличающиеся от фона

Видно, что над участками «Костюковка» и «Александровка» содержание тропосферного метана в течение всего интервала наблюдений выше, чем над участками «Ченки» и «Гомель». Среднее содержание метана над участком «Костюковка» статистически достоверно превышало региональный фон в течение всего периода наблюдений (исключение – 2024 г.). Аналогично, среднее содержание метана над участком «Александровка» достоверно выше фона в течение всего времени наблюдений (исключение 2022 г.). Менее выражена метановая аномалия над участком «Цыкуны» (достоверное превышение фона в 2019, 2020 и 2023 гг.). Содержание метана над участком «Гомель» было достоверно выше фона только в 2020 г. Содержание метана над участком

«Ченки» от регионального фона достоверных отличий не имело. Над участком «Костюковка» среднее содержание метана было выше фона на 7,5–80,3 (в среднем на 38,2) ppb. Над участком «Александровка» соответственно – на 9,0–60,1 (в среднем на 24,1) ppb.

Таким образом, изучение динамики тропосферного метана по данным съемки Sentinel-5P TROPOMI показало, что над участками, где фиксируется современная геодинимическая активность, концентрации метана всегда выше, чем над стабильными участками (рис. 3). Повышение содержания метана над участком «Гомель» может объясняться влиянием техногенных источников эмиссии метана (утечки из газопроводов и газораспределительных станций, систем отопления и т.д.).

ГЕОХИМ



1 – «Костюковка»; 2 – «Александровка»; 3 – «Цыкуны»; 4 – «Гомель»; 5 – «Ченки»  
**Рисунок 3** – Изменения средних содержаний тропосферного метана по данным Sentinel-5P TROPOMI над участками, различающимися по геодинамической активности (июнь – август)

Измерения содержания тропосферного метана спутником Sentinel-5P TROPOMI осуществляются в масштабе  $3,5 \times 5,5$  км, поэтому могут выявлять только достаточно крупные источники эмиссии. Для выявления меньших по размеру источников метана предлагается использовать съемку спутников Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м) или Landsat (пространственное разрешение 30 м). Сенсоры этих аппаратов ведут измерения в 2 зонах коротковолнового инфракрасного излучения: SWIR1 (Landsat-8 – 1,566–1,651 мкм) и SWIR2 (Landsat-8 – 2,107–2,94 мкм). По нормированному соотношению коэффициентов спектральной яркости в этих диапазонах (индекс NDMI) можно судить о концентрации метана в атмосфере [18; 20].

Совместное использование снимков нескольких спутников позволяет увеличить временное разрешение и снизить влияние неблагоприятных метеословий. Метановые выбросы диагностируются при величине  $NDMI > 0$ . Наибольшие помехи при использовании данного индекса создают водные объекты, поскольку для них  $NDMI = 0$ . Поэтому водные объекты из анализа исключаются. Для вычленения аномалий метана, обусловленных флюидопереносом в разломных зонах, необходимо выяснить вклад техногенных источников метана. Возможны следующие варианты: аномалия метана формируется техногенными выбросами; аномалия метана формируется глубинным флюидопереносом в разломной зоне; аномалия метана имеет как техногенную, так и геодинамическую составляющую; аномалия метана отсутствует.

Для определения индекса NDMI использованы 23 космических снимка: 17 снимков – Landsat 8–9, 6 снимков – Sentinel-2. Время съемки – с 2015 по 2024 г. Для тестовых участков на каждом снимке определились средние, медианные и максимальные значения NDMI. Наиболее выраженные аномалии NDMI были приурочены к разным объектам на городской территории: предприятие «Гомельагрокомплект» и сопредельная застройка, железнодорожная станция Центролит, площадка «Гомельоблдорстрой» и деревообрабатывающего предприятия «ЭкоЕвроПласт». Вероятно, в пределах городского ландшафта в масштабе, соответствующем пространственному разрешению каналов 20–30 м, техногенный фактор оказывает наибольшее влияние на поле метана. Поэтому использовать NDMI для выявления геодинамически активных зон в условиях наличия техногенных эмиссий метана сложно. В случае участков «Костюковка», «Александровка» и «Ченки» влияние техногенных источников метана, вероятно, существенно меньше (большая часть территории – сельскохозяйственные или лесные земли). На участках «Костюковка» и «Александровка» аномалии с  $NDMI > 0$  периодически отмечаются на большей части космических снимков, однако занимают небольшие площади относительной общего размера участков (до 10–20 %). Максимальные значения NDMI в отдельных пикселях могут достигать 0,42 («Костюковка») и 0,54 («Александровка»). Для трех участков составлены ряды NDMI в течение 2020 и 2024 гг. Динамика максимальных значений NDMI представлена на рисунках 4 и 5.

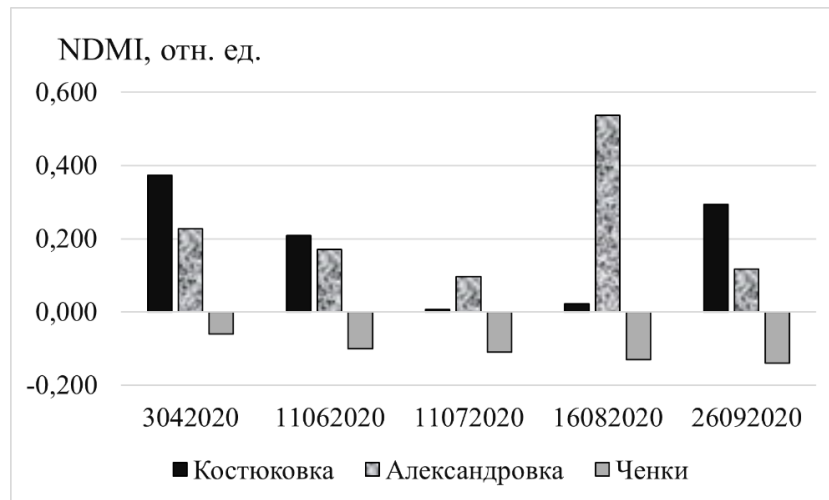


Рисунок 4 – Динамика максимальных значений NDMI в 2020 г.

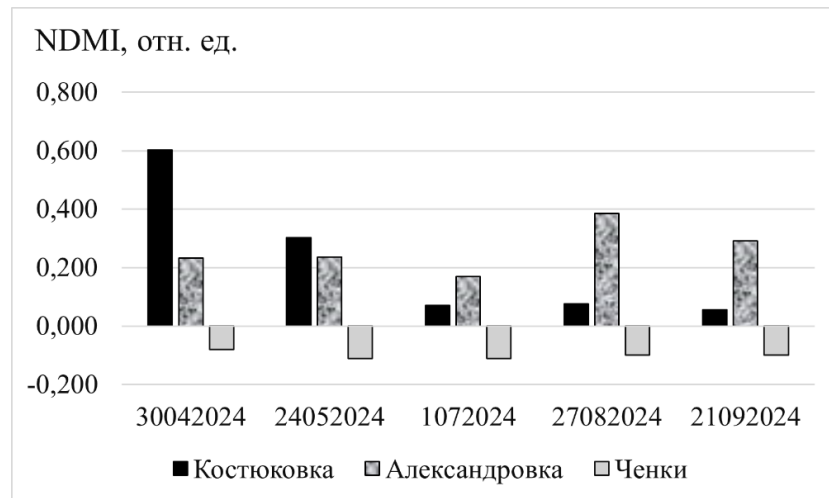


Рисунок 5 – Динамика максимальных значений NDMI в 2024 г.

Из рисунков 4 и 5 видно, что максимальные значения NDMI для участков «Костюковка» и «Александровка» в течение всего времени наблюдений выше 0 (что указывает на эмиссию метана с поверхности в атмосферу). Для участка «Ченки» максимальные значения NDMI всегда отрицательные (эмиссия метана отсутствует).

Таким образом, результаты изучения тропосферного метана по данным космической съемки как низкого разрешения (Sentinel 5P TROPOMI), так и среднего разрешения (Sentinel-2, Landsat-8, Landsat-9) показывают, что участки «Костюковка» и «Александровка» отличаются повышенным потоком метана. Участок «Ченки» характеризуется концентрациями метана близкими к региональному фону. На участке «Гомель» по данным Sentinel-5P TROPOMI концентрации метана близки к фоновым; по индексу NDMI отмечены локальные аномалии,

связанные с техногенными источниками. Пространственно-временные колебания концентраций тропосферного метана испытывают влияние со стороны глубинных потоков этого газа в зонах высокой трещиноватости, что подтверждается их сопряжением в пространстве с водородными и гелиевыми аномалиями.

Результаты космической съемки метана могут стать дополнительным критерием для выявления геодинамически активных зон. Для слабосейсмических регионов древних платформ в качестве газогеохимических индикаторов современной геодинамической активности тектонических структур можно предложить показатели, приведенные в таблице 2. Геохимические поля гелия, водорода и метана в разных компонентах геологической среды взаимно дополняют друг друга, что позволяет отличать геодинамические эффекты от техногенных и биогенных.

Таблица 2 – Газогеохимические индикаторы геодинамические активных зон (для платформенных условий)

| Показатель                                                           | Стабильная зона                                   | Геодинамически активная зона                     |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Содержание гелия в грунтовых водах, мг/дм <sup>3</sup>               | <7·10 <sup>-5</sup>                               | >7·10 <sup>-5</sup>                              |
| Содержание водорода в подпочвенном газе, ppm                         | <1                                                | >1                                               |
| Временная динамика водорода в подпочвенном газа                      | Суточная гармоника                                | Суточная и полусуточная гармоника                |
| Содержание тропосферного метана (по данным Sentinel-5P TROPOMI), ppb | Статистически не отличается от регионального фона | Статистически достоверно выше регионального фона |
| Спектральный индекс NDMI                                             | <0,1                                              | >0,1                                             |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполненных исследований:

обобщены результаты многолетних геофизических и газогеохимических исследований современной геодинамической активности на территории Гомельской структурной перемычки и сопредельной территории Припятского прогиба;

изучена динамика концентраций тропосферного метана, регистрируемых спутником Sentinel-5P TROPOMI, над территорией Беларуси, выявлены сезонные колебания фоновых концентраций тропосферного метана в регионе;

изучена динамика концентраций метана в 2019–2024 гг. над участками, различающимися по степени геодинамической активности; установлено, что над участками «Костюковка» и «Александровка» средние концентрации метана достоверно превышают фоновые значения;

впервые для Беларуси апробировано использование индекса NDMI (определяется по данным съемки среднего разрешения спутников Landsat и Sentinel-2) как индикатора эмиссии метана от локальных источников;

аномалии NDMI, обнаруженные на участках «Костюковка» и «Александровка», предположительно обусловлены газофлюидопереносом в разломных зонах, аномалия NDMI на участке «Гомель» имеет техногенную природу.

На основе проведенных работ предложен комплекс газогеохимических индикаторов современной геодинамической активности тектонических структур в условиях древних платформ, включающий гелий (в подземных водах), водород (в подпочвенном газе) и метан (в тропосфере).

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X25Y3B-079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондур, В. Г.** Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – № 3. – Т. 2. – С. 177–183.

2. **Гумен, А. М.** Газогеохимические индикаторы геодинамической активности глубинных разломов на юго-востоке Беларуси / А. М. Гумен, А. П. Гусев // Літасфера. – 1997. – № 6. – С. 140–149.

3. **Гумен, А. М.** Подпочвенный водород – индикатор изменений напряженно-деформированного состояния земной коры асейсмичных регионов / А. М. Гумен, А. П. Гусев, В. П. Рудаков // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 359. – № 3. – С. 390.

4. **Гусев, А. П.** Индикаторы активных разломов (на примере Гомельской структурной перемычки) / А. П. Гусев // Изв. высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66. – № 1. – С. 35–44.

5. **Гусев, А. П.** Оценка современной геодинамической активности территории (на примере юго-востока Беларуси) / А. П. Гусев // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2024. – № 1. – С. 105–144.

6. **Гусев, А. П.** Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI) // Региональные геосистемы. – 2023. – Т. 47. – № 4. – С. 580–592.

7. **Касьянова, Н. А.** Экологические риски и геодинамика / Н. А. Касьянова. – М. : Научный мир, 2003. – 332 с.

8. **Копылов, И. С.** Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности / И. С. Копылов. – Пермь : ПГНИУ, 2019. – 131 с.

ГЕАХІМІЯ

9. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87–101.
10. Матвеев, А. В. Геоактивные зоны на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2015. – № 1 (42). – С. 64–70.
11. Результаты водногелиевых исследований на северо-востоке Припятского прогиба и сопредельной территории / А. М. Гумен [и др.] // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. тр. – Гомель : БелНИПИнефть, 1997. – Вып. 2. – С. 64–69.
12. Современная геодинамика и нефтегазоносность / под ред. Н. А. Крылова и В. А. Сидорова. – М. : Наука, 1989. – 200 с.
13. Современные геодинамически активные зоны платформ / В. И. Макаров [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2007. – № 2. – С. 99–110.
14. Структура поверхности кристаллического фундамента Гомельской структурной перемычки и сопредельных территорий / Р. Г. Гарецкий [и др.] // Літасфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 19–29.
15. Сывороткин, В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / В. Л. Сывороткин. – М. : ООО «Геоинформцентр», 2002. – 250 с.
16. Эманионные и электрические эффекты над сложно построенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) / Г. И. Войтов [и др.] // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 370. – № 1. – С. 105–108.
17. Automated detection and monitoring of methane super-emitters using satellite data / B. J. Schuit [et al.] // Atmos. Chem. Phys. – 2023. – Vol. 23. – P. 9071–9098.
18. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations / D. J. Varon [et al.] // Atmos. Meas. Tech. – 2021. – Vol. 14. – P. 2771–2785.
19. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements / A. Lorente [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2021. – Vol. 14. – P. 665–684.
20. Webber, C. M. An examination of enhanced atmospheric methane detection methods for predicting performance of a novel multiband uncooled radiometer imager / C. M. Webber, J. P. Kerekes // Atmos. Meas. Tech. – 2020. – Vol. 13. – P. 5359–5367.

Артыкул паступіў у рэдакцыю 14.03.2025

Рэцэнзент А. М. Галкін

## ГАЗАГЕАХІМІЧНЫЯ ІНДЫКАТАРЫ ГЕАДЫНАМІЧНА АКТЫЎНЫХ ЗОН

А. П. Гусеў

Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Ф. Скарыны  
вул. Савецкая, 104, 246028, Гомель, Беларусь  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru

Мэта работы – ацэнка сучаснай геадынамічнай актыўнасці разломных зон з дапамогай газагеахімічных індыхатараў. Абагульнены вынікі шматгадовых геафізічных і газагеахімічных даследаванняў сучаснай геадынамічнай актыўнасці на тэрыторыі Гомельскай структурнай перамячкі і сумежнай тэрыторыі Прыпяцкага прагіну. У якасці індыхатараў геадынамічнай актыўнасці разглядаюцца прасторава-часавыя анамаліі вадароду ў падглебавым газе, гелію ў падземных водах і трапасфернага метану. Даследаванні ўключалі: плячовачную здымку вадароду ў падглебавым газе і гелію ў падземных водах (грунтавы і першы напорны ваданосныя гарызонты); вывучэнне часовай дынамікі вадароду ў стацыянарных пунктах назірання; вывучэнне прасторава-часавых змяненняў канцэнтрацыі трапасфернага метану. Для вывучэння поля трапасфернага метану выкарыстаны даныя касмічнай здымкі спадарожніка Sentinel-5P TROPOMI (2019–2024). У якасці дадатковага метаду выяўлення анамалій метану выкарыстоўваўся спектральны індэкс NDMI (разлічваўся на аснове здымкі спадарожнікаў Landsat 8–9 і Sentinel-2). На аснове праведзеных работ прапанаваны комплекс газагеахімічных індыхатараў сучаснай геадынамічнай актыўнасці тэктанічных структур ва ўмовах старажытных платформ, які ўключае гелій (у падземных водах), вадарод (у падглебавым газе) і метан (у трапасферы). Прадстаўлены ў артыкуле прыклады паказваюць, што газагеахімічныя метады могуць эфектыўна вырашаць задачы маніторынгу геадынамічнай актыўнасці.

**Ключавыя словы:** геадынамічна актыўныя зоны, разломы, метан, вадарод, гелій, індыхатары.

## GAS-GEOCHEMICAL INDICATORS OF GEODYNAMICALLY ACTIVE ZONES

**A. Gusev**

F. Skorina Gomel State University  
104 Sovetskaya St, 246028, Gomel, Belarus  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru

*The aim of the work is to assess the modern geodynamic activity of fault zones using gas-geochemical indicators. The results of long-term geophysical and gas-geochemical studies of modern geodynamic activity in the territory of the Gomel structural isthmus and the adjacent territory of the Pripyat Trough are summarized. Spatio-temporal anomalies of hydrogen in subsurface gas, helium in groundwater and tropospheric methane are considered as indicators of geodynamic activity. The studies included: an areal survey of hydrogen in subsurface gas and helium in groundwater (groundwater and the first confined aquifers); a study of the temporal dynamics of hydrogen at stationary observation points; a study of spatio-temporal changes in the concentration of tropospheric methane. To study the tropospheric methane field, space imaging data from the Sentinel-5P TROPOMI satellite (2019–2024) were used. As an additional method for detecting methane anomalies, the NDMI spectral index was used (calculated based on Landsat 8–9 and Sentinel-2 satellite images). Based on the work carried out, a set of gas-geochemical indicators of modern geodynamic activity of tectonic structures in the conditions of ancient platforms was proposed, including helium (in groundwater), hydrogen (in subsurface gas) and methane (in the troposphere). The examples presented in the article show that gas-geochemical methods can effectively solve the problems of monitoring geodynamic activity.*

**Keywords:** geodynamically active zones, faults, methane, hydrogen, helium, indicators.