

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
PROBLEMS OF ECOLOGYУДК 504.3.064-034
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-334-344>Поступила в редакцию 11.04.2022
Received 11.04.2022**Ю. Г. Кокош, С. В. Какарека***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ
СОДЕРЖАНИЯ ФОРМАЛЬДЕГИДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Аннотация. Формальдегид (НСНО) является ключевым веществом в химии атмосферы, предшественником озона (O₃) и важным индикатором фотохимической активности атмосферы. Он также известен как канцероген для человека и животных. Для оценки пространственно-временной изменчивости содержания формальдегида проанализированы многолетние данные (2003–2016 гг.) измерений спектрометра ОМІ, размещенного на спутнике Aura. Результаты анализа показали, что тропосферное содержание формальдегида над большей частью территории Беларуси за 2003–2016 гг. имело неравномерное пространственное распределение: наблюдается сокращение концентраций в направлении с юго-запада на северо-восток. Крупные города и промышленные центры образуют зоны повышенного загрязнения тропосферы. Содержание формальдегида в ячейках над территорией Беларуси за период исследования находилось в диапазоне до $30,8 \times 10^{15}$ мол./см² и в среднем составило $6,5 \times 10^{15}$ мол./см². В большинстве полученных значений (84,1 %) концентрации формальдегида фиксировались в пределах $2,0$ – $10,0 \times 10^{15}$ мол./см² и только 0,6 % превысили $15,0 \times 10^{15}$ мол./см². Полученные данные сопоставлены с данными наземной системы мониторинга атмосферного воздуха. Содержание формальдегида в тропосфере над территорией Беларуси, как и в приземном слое атмосферы, носит выраженную сезонную динамику с максимумом в теплый период года с наиболее высокими концентрациями в июле и августе. Анализ внутригодовой динамики содержания формальдегида в приземном слое и в столбе тропосферы свидетельствует о наличии общих тенденций как в целом для Беларуси, так и по отдельным городам.

Ключевые слова: формальдегид, спектрометр ОМІ, атмосферный воздух, мониторинг

Для цитирования. Кокош, Ю. Г. Пространственная и временная вариабельность содержания формальдегида в атмосферном воздухе по данным спутниковых измерений / Ю. Г. Кокош, С. В. Какарека // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 334–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-334-344>

Yu. G. Kokosh, S. V. Kakareka*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF FORMALDEHYDE CONTENT
IN ATMOSPHERIC AIR ACCORDING TO SATELLITE MEASUREMENTS**

Abstract. Formaldehyde (НСНО) is a key ingredient in atmospheric chemistry, a precursor to ozone (O₃) and an important indicator of atmospheric photochemical activity. It is also known to be a human and animal carcinogen. To assess the spatial and temporal variability of the formaldehyde content, the article analyzes long-term data (2003–2016) of measurements of the OMI spectrometer located on the Aura satellite. The results of the analysis showed that the tropospheric content of formaldehyde over most of the territory of Belarus for 2003–2016 had an uneven spatial distribution: there is a decrease in concentrations in the direction from the southwest to the northeast. Large cities and industrial centers form zones of increased troposphere pollution. The content of formaldehyde in the cells over the territory of Belarus during the study period was in the range of up to 30.8×10^{15} mol/cm² and averaged 6.5×10^{15} molec./cm². In most of the obtained values (84.1 %), the formaldehyde concentrations were fixed within the range of 2.0 – 10.0×10^{15} molec./cm², and only 0.6 % exceeded 15.0×10^{15} molec./cm². The obtained data are compared with the data of the ground-based atmospheric air monitoring system. The content of formaldehyde in the troposphere over the territory of Belarus, as well as in the surface layer of the atmosphere, has a pronounced seasonal dynamics with a maximum in the warm season with the highest concentrations in July and August. An analysis of the intra-annual dynamics of formaldehyde content in the surface layer and in the troposphere column indicates the presence of general trends, both for Belarus as a whole and for individual cities.

Keywords: formaldehyde, OMI spectrometer, atmospheric air, monitoring

For citation. Kokosh Yu. G., Kakareka S. V. Spatiotemporal variability of formaldehyde content in atmospheric air according to satellite measurements. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 334–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-334-344>

Введение. Получение полных и детальных данных о загрязнении атмосферного воздуха необходимо для управления его качеством с целью обеспечения благоприятных условий окружающей среды и сокращения рисков для здоровья человека. В настоящее время в Беларуси мониторинг загрязнения атмосферного воздуха в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) является основным источником информации о состоянии воздушного бассейна в городах и других населенных пунктах. Содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе определяется в 19 городах на 67 стационарных станциях мониторинга [1]. Концентрации формальдегида измеряются в 17 городах (Бобруйск, Борисов, Брест, Витебск, Гомель, Гродно, Жлобин, Лида, Минск, Могилев, Мозырь, Новополоцк, Орша, Пинск, Полоцк, Речица, Светлогорск).

В качестве анализируемого вещества выбран формальдегид (H_2CO), как один из приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха городов Беларуси. Это органическое соединение с коротким периодом полураспада, которое является промежуточным продуктом окисления многих классов летучих органических соединений, может служить индикатором интенсивности фотохимических процессов и загрязнения атмосферы летучими органическими соединениями.

Формальдегид характеризуется высокой токсичностью и относится к высокоопасным соединениям. Даже находясь в относительно небольших концентрациях, НСНО способен привести к существенным изменениям в организме человека. Он оказывает сильное действие на центральную нервную систему, дыхательные пути, печень, почки и органы зрения, а также обладает сенсибилизирующим, канцерогенным, тератогенным, эмбриотоксическим и мутагенным действием. В целях уменьшения риска заболеваемости в Беларуси установлены предельно допустимые концентрации формальдегида на уровне $0,012 \text{ мг/м}^3$ (среднесуточная) и $0,030 \text{ мг/м}^3$ (максимально разовая) [2].

Известно, что прямые эмиссии формальдегида невелики и в основном связаны с процессами неполного сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания. Наибольшая доля формальдегида в атмосферном воздухе образуется за счет фотохимических реакций и процессов трансформации многих типов органических соединений, в том числе естественных, таких как метан и изопрен, и загрязняющих веществ от передвижных и стационарных источников, таких как алканы, алкены, альдегиды и спирты [3, 4]. Одновременно с процессом фотоокисления активно идет процесс распада формальдегида (фотодиссоциация) [5].

С 1991 г. отбор проб и определение концентраций формальдегида в атмосферном воздухе городов осуществлялось ежедневно 2–3 раза в сутки. Однако начиная с 2013 г. наблюдения за содержанием формальдегида на станциях мониторинга проводятся только в летний сезон (июнь–август) [6]. Измеренные на стационарных станциях сети НСМОС концентрации формальдегида характеризуются отсутствием единой однонаправленной динамики. Наблюдаются тенденции как к сокращению, так и к увеличению его среднегодовых концентраций в городах Беларуси [7].

Редкая сеть наблюдений существенно осложняет выявление пространственной структуры загрязнения атмосферного воздуха, в особенности на территориях вне городов, а это большая часть Беларуси. В то же время существует значительная потребность в такой информации. Существенно дополнить результаты наземного мониторинга атмосферного воздуха позволяют дистанционные методы и в первую очередь измерения с помощью приборов, установленных на космических аппаратах.

В настоящее время спутниковая информация в Беларуси практически не используется в регулярной практике для характеристики загрязнения атмосферного воздуха, не разработана для этого нормативная и методическая база. Исследования позволят создать научную основу для последующей разработки нормативных технических актов, которые помогут применить данные спутникового зондирования для целей мониторинга воздушной среды.

Дистанционные спутниковые методы контроля открывают новые возможности в изучении газового состава атмосферы и его динамики, мониторинга окружающей среды, прогнозирования техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, связанных с поступлением загрязняющих

веществ в атмосферу, а также упрощают изучение климатических изменений. Дистанционные методы позволяют исследовать экосистемы, подверженные воздействию выбросов загрязняющих веществ антропогенного и природного происхождения, а также рационально и оперативно реагировать на различные изменения. Эти методы дают возможность экономически целесообразно получать необходимые данные для наблюдения, изучения и отслеживания состава атмосферы [8].

Методы и исходные данные. В настоящее время для изучения содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе используются данные спектрометров SCIAMACHY (на борту спутника ENVISAT), OMI (на борту спутника AURA), GOME (спутник ERS-2) и GOME-2 (на борту спутников серии METOP), TROPOMI (спутник Sentinel-5p). Спутниковые приборы способны определять количество молекул некоторых газов между прибором и поверхностью Земли; эта величина обычно называется «плотностью вертикального столба» в единицах молекул на единицу площади поверхности Земли (мол./см²) [9]. Данные, получаемые OMI (Ozone Monitoring Instrument), имеют наиболее длинный ряд и использованы при подготовке статьи.

Метод оценки концентрации загрязняющих веществ основан на измерении спектральных характеристик света, рассеянного в атмосфере [10]. Сравнение спектральной интенсивности исходного и рассеянного в атмосфере «назад» излучения в ультрафиолетовом диапазоне дает информацию о распределении и концентрациях примесей, так как они поглощают часть приходящего солнечного излучения.

Спутник Aura был запущен в июле 2004 г. Это третий основной компонент системы наблюдения Земли (EOS) НАСА после Terra (запущен в 1999 г.) и Aqua (запущен в 2002 г.). OMI (прибор для мониторинга озона) представляет собой направленный в надир спектрометр, предназначенный для регистрации солнечного излучения, отраженного атмосферой и поверхностью Земли, в диапазоне от 270 до 500 нм со спектральным разрешением порядка 0,5 нм [11]. Ширина снимаемой полосы поверхности при угле обзора камеры в 114° составляет порядка 2600 км, что позволяет вести измерения в глобальных масштабах. В нормальном режиме работы OMI (предназначенном для съемки в глобальных масштабах) размер пикселя (при съемке в направлении надира) составляет 13×24 км² вдоль и поперек полосы съемки соответственно. Размер наземного пикселя OMI на краях полосы может достигать 28×150 км².

OMI является результатом дальнейшего развития разработанных в европейском космическом агентстве (ESA) инструментов GOME и SCIAMACHY, на которых отработана технология измерений с высоким спектральным разрешением, ведущихся в широкой полосе спектра, включающей одновременно видимый, УФ- и ИК-диапазоны, что, например, позволяло получать данные о наличии сразу нескольких незначительных газовых примесей («следовых» количеств) по результатам одного измерения [12].

Для картирования пространственной структуры загрязнения атмосферного воздуха Беларуси формальдегидом по данным дистанционного зондирования использовались результаты наблюдений OMI с сайта проекта Temis [13].

Содержание H₂CO в тропосферных колоннах (<http://h2co.aeronomie.be/>) получено в рамках проекта Temis в бельгийском институте аэрономии BIRA-IASB на основе данных наблюдений GOME, SCIAMACHY, GOME-2 и OMI с использованием метода DOAS в сочетании с расчетами радиационного переноса, а также с использованием результатов модели химического транспорта IMAGES в качестве априорной информации [13].

Месячные данные наблюдений OMI в формате Ascii GRD с разрешением 0,25×0,25 град. после предварительной обработки загружались в ГИС ArcGIS, где проводились обрезка по прямоугольной рамке, охватывающей Беларусь, пространственный анализ и наложение со слоями другой информации. Были рассчитаны среднемесячные значения концентраций формальдегида в столбе атмосферы по Беларуси в целом и ячейках расположения городов, в которых ведется постоянный мониторинг содержания формальдегида в атмосферном воздухе. По ним были вычислены среднегодовые значения содержания формальдегида за 2003–2016 гг.

Результаты и их обсуждение. *Глобальное содержание формальдегида в атмосфере по данным дистанционного зондирования.* Измерения интегрального содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы из космоса с горизонтальным разрешением в несколько десятков км

инструментами GOME, SCIAMACHY, OMI и GOME показывают локальное превышение содержания формальдегида (достигающее 20×10^{15} мол./см²) в некоторых индустриальных районах и летом в тропических лесах [14, 15]. Локальные наземные измерения фиксируют эпизоды с содержанием формальдегида в пограничном столбе атмосферы до $40\text{--}100 \times 10^{15}$ мол./см² [12].

Области повышенного содержания формальдегида расположены в основном в тропиках, в частности над Амазонией, Африкой и Индонезией. Восток Соединенных Штатов и Юго-Восточная Азия также являются регионом со значительными концентрациями. На юго-востоке Соединенных Штатов тропосферное содержание формальдегида демонстрирует сильные сезонные колебания, в основном связанные с биогенными выбросами ЛОС (главным образом изопрена), выделяемых в течение летнего сезона. Среднемесячное значение колеблется от $3,0 \times 10^{15}$ мол./см² зимой до максимум около $13,0 \times 10^{15}$ мол./см² в летние месяцы. Как и в восточной части Соединенных Штатов, столбцы CH₂O над Южным Китаем показывают сильные сезонные колебания со значениями от $5,0 \times 10^{15}$ мол./см² зимой до $12,0 \times 10^{15}$ мол./см² летом [14]. Над Амазонией содержание CH₂O находится в диапазоне между $8,0 \times 10^{15}$ мол./см² в течение влажного сезона и $20,0 \times 10^{15}$ мол./см² во время сезона пожаров, продолжающегося в основном с августа по ноябрь. Содержание формальдегида в экваториальной Африке составляет от 10,0 до $20,0 \times 10^{15}$ мол./см². В Индии наибольшие средние значения (около $12,0 \times 10^{15}$ мол./см²) фиксируются в период с мая по июль. Они связаны со сжиганием биомассы [14]. Второй максимум меньшей амплитуды ($10,0 \times 10^{15}$ мол./см²) обнаружен в сентябре–октябре и относится к биогенным выбросам. Минимальные значения составляют порядка $6,5 \times 10^{15}$ мол./см². В Западной Европе содержание формальдегида в атмосфере обычно составляет от $3,5 \times 10^{15}$ мол./см² в холодный сезон года и до $7,0 \times 10^{15}$ мол./см² в теплый сезон в период измерений GOME [11].

По данным [15] в период наблюдений с 2007 по 2013 г. регионы с наиболее высокими концентрациями формальдегида приурочены к Центральной Африке, юго-востоку США, центру Южной Америки, Индии и Китаю. В наблюдениях GOME-2 и OMI выделяются одни и те же регионы с эквивалентными сезонными колебаниями. Однако по данным наблюдений GOME-2 максимальными концентрациями формальдегида характеризуются тропики (Конго, Гана, Сьера-Леоне и Того в Африке и Бразилия, Боливия в Южной Америке), в то время как по данным OMI максимальные концентрации приходятся на такие мегаполисы, как Гонконг/Гуандун в Китае или Дели, Пенджаб и Харьяна в Индии. OMI показывает повышенные значения содержания формальдегида в средних широтах и над регионами с умеренными концентрациями H₂CO, но более низкие – в тропиках, где содержания H₂CO самые высокие [11].

Согласно [9], большая часть горизонтального градиента в данных о содержании формальдегида (в мол./см²) коррелирует с распределением его поверхностных источников, что связано с его относительно коротким временем жизни в атмосфере.

В исследовании [16], основанном на данных наблюдений OMI, выявлено, что на концентрации формальдегида в атмосфере существенное влияние оказали пожары 2010 г. над Европейской частью России и 2012 г. над Западной Сибирью. Так, согласно данным исследований, концентрации формальдегида за 2004–2015 гг., за исключением рядов данных в периоды пожаров, составили в среднем $10,1 \times 10^{15}$ мол./см² над Европейской частью России и $9,0 \times 10^{15}$ мол./см² над Западной Сибирью. В то время как 2010 г. над Европейской частью России средние концентрации составили $17,4 \times 10^{15}$ мол./см² (максимальные значения достигали 93×10^{15} мол./см²) и в 2012 г. над Западной Сибирью – $14,0 \times 10^{15}$ мол./см² (максимум – 101×10^{15} мол./см²). Отмечается, что увеличение содержания формальдегида в Европейской части России наблюдается в наиболее населенном и промышленно развитом регионе между Москвой и Нижним Новгородом, а также в промышленно развитом регионе вдоль реки Дон.

Результаты исследования [17] содержания формальдегида и диоксида азота в атмосфере над европейской территорией России и Западной Сибирью спутниковым спектрометром OMI свидетельствуют о наличии недельной цикличности в изменчивости регионального их содержания.

Содержание формальдегида в атмосферном воздухе в Беларуси по данным спектрометра OMI. По данным спектрометра OMI в Беларуси содержание формальдегида в атмосферном

столбе регистрируется с марта–апреля по октябрь. Проанализирован ряд за период с 2003 по 2016 г. Среднегодовое содержание формальдегида в тропосфере (осредненное по всей территории) характеризуется неустойчивым ростом за рассматриваемый период исследования. Среднегодовые концентрации формальдегида для домена за этот период варьировали от $4,9 \times 10^{15}$ мол./см² до $7,8 \times 10^{15}$ мол./см², что соответствует данным, полученным для территории Западной Европы и Европейской части России [11]. В 2016 г. среднегодовое содержание формальдегида над территорией Беларуси составляло $5,5$ мол./см², что на 16 % выше значений 2003 г.

Среднемесячные концентрации формальдегида в Беларуси по данным дистанционного зондирования варьировали от 2,1 (в мае 2003 и 2004 г.) до $12,2 \times 10^{15}$ мол./см² (в августе 2014 г.) (табл. 1). В годовом ходе наблюдается устойчивая тенденция к росту среднего содержания формальдегида в теплый период года и сокращению в холодный. Наиболее высокие среднемесячные концентрации чаще всего фиксируются в июле и августе. В отдельные годы минимальные и максимальные средние значения зафиксированы в другие месяцы.

Т а б л и ц а 1. Среднемесячные концентрации формальдегида в тропосфере на территории Беларуси по данным спектрометра ОМІ за период с 2003 по 2016 г., 10^{15} мол./см²

Table 1. Average monthly formaldehyde concentrations in the troposphere on the territory of Belarus according to the OMI spectrometer data for the period from 2003 to 2016, 10^{15} molec./cm²

Год	Месяц								Среднее	Медиана
	3	4	5	6	7	8	9	10		
2003	–	6,66	2,08	4,47	5,23	4,15	5,52	–	4,73	4,15
2004	6,93	4,13	2,08	3,70	4,11	5,23	5,69	4,79	4,65	4,18
2005	4,90	6,23	7,64	6,13	8,33	7,87	7,82	7,83	7,09	7,73
2006	5,18	6,54	5,24	7,16	7,53	6,71	7,23	5,87	6,43	6,67
2007	6,10	5,90	9,11	7,43	8,84	9,61	6,75	7,19	7,83	7,49
2008	4,63	5,16	4,24	6,14	7,02	7,74	10,93	7,28	6,93	6,41
2009	4,16	6,63	5,62	6,01	6,85	5,26	7,62	4,71	5,86	6,16
2010	6,94	5,26	5,65	8,02	10,19	10,22	5,59	6,85	7,34	7,29
2011	–	5,31	6,57	7,32	7,45	6,09	7,22	4,77	6,40	6,49
2012	–	5,74	7,15	6,56	8,72	5,72	6,28	4,83	6,44	6,51
2013	2,45	4,67	5,10	6,97	6,22	7,53	4,89	6,55	5,98	5,52
2014	4,79	5,17	5,99	4,79	6,58	12,17	5,06	4,23	5,73	5,34
2015	4,93	4,94	5,10	7,25	7,80	9,88	8,53	5,83	6,66	6,40
2016	5,48	7,95	4,98	9,14	7,86	8,23	7,53	6,57	5,48	6,89
За период	4,92	5,70	5,40	6,44	7,30	7,57	6,87	5,91	6,49	6,25

Содержание формальдегида за период исследования с 2003 по 2016 г. по результатам измерений спектрометра ОМІ над территорией Беларуси находилось в диапазоне до $30,8 \times 10^{15}$ мол./см² (зафиксировано в августе 2014 г. на юго-западе страны) и в среднем составило $6,5 \times 10^{15}$ мол./см². В большинстве полученных значений (84,1 %) концентрации формальдегида находились в пределах $2,0$ – $10,0 \times 10^{15}$ мол./см². В 4,9 % случаев концентрации формальдегида были ниже $2,0 \times 10^{15}$ мол./см², в 20,5 % фиксировались в диапазоне от 2,0 до $5,0 \times 10^{15}$ мол./см², в 63,6 % – от 5,0 до $10,0 \times 10^{15}$ мол./см², в 10,4 % – от $10,0$ до $15,0 \times 10^{15}$ мол./см² и только в 0,6 % превысили $15,0 \times 10^{15}$ мол./см².

По данным дистанционного мониторинга за период 2003–2016 гг. построены карты пространственной структуры загрязнения атмосферного воздуха в Беларуси формальдегидом. В территориальном распределении присутствует выраженная сезонность содержания НСНО в тропосфере.

Пространственная внутригодовая динамика содержания формальдегида за март–октябрь 2012 г. представлена на рис. 1. За указанный период наиболее высокие концентрации формальдегида наблюдались чаще всего в юго-западной части Беларуси. В 2012 г. наиболее высокие среднемесячные концентрации формальдегида по данным спутникового зондирования зафиксированы в июле и составило $8,7 \times 10^{15}$ мол./см². Максимальное содержание формальдегида на ячейку в этот год достигало $17,0 \times 10^{15}$ мол./см².

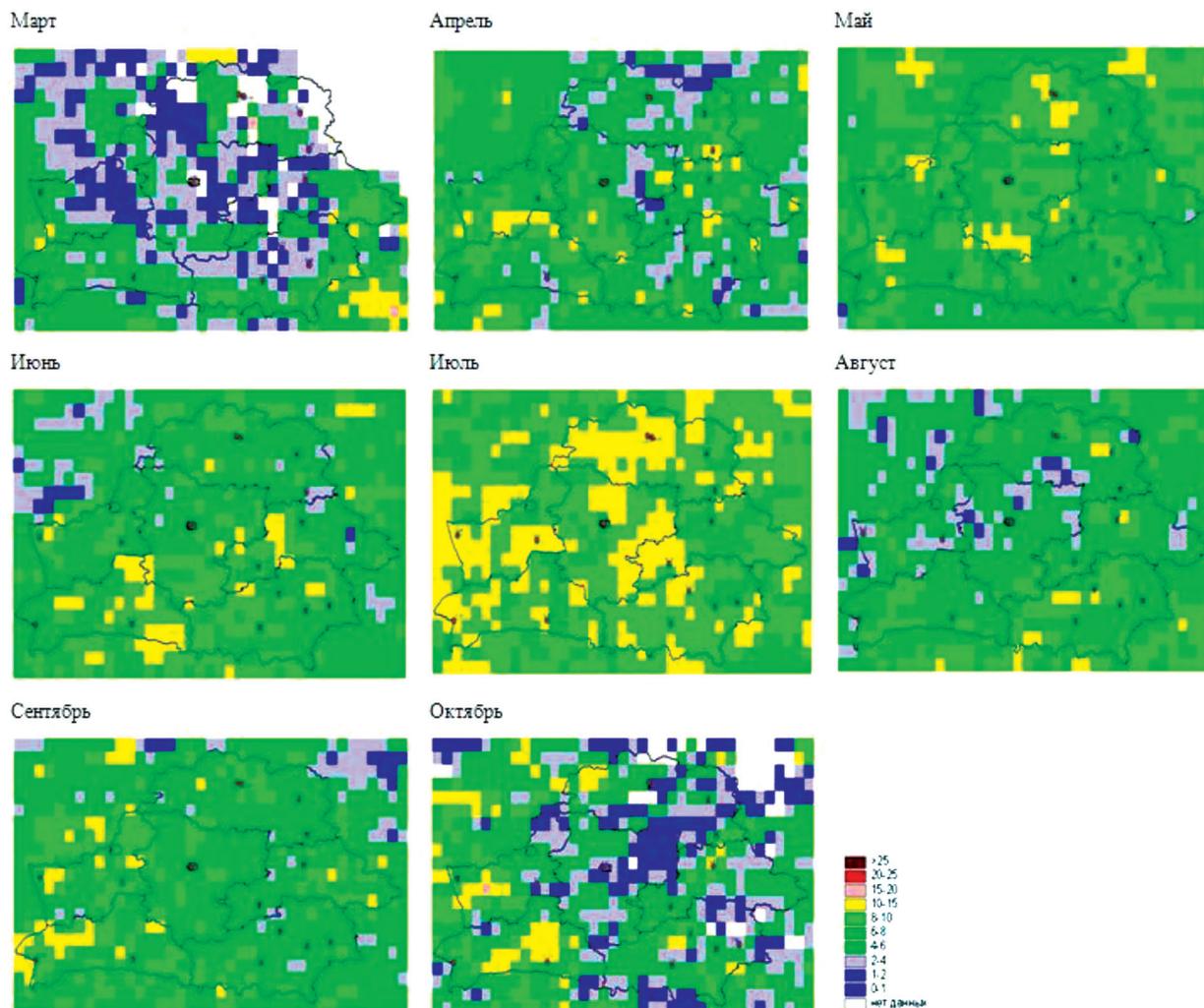


Рис. 1. Среднемесячное содержание формальдегида в столбе атмосферы в Беларуси в 2012 г. по данным спектрометра OMI, 10^{15} мол./см²

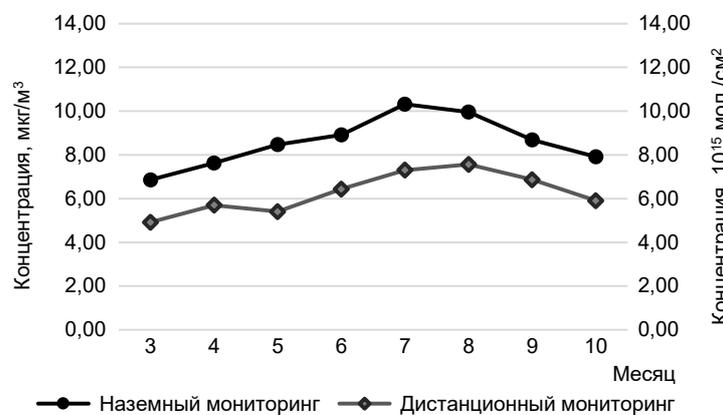
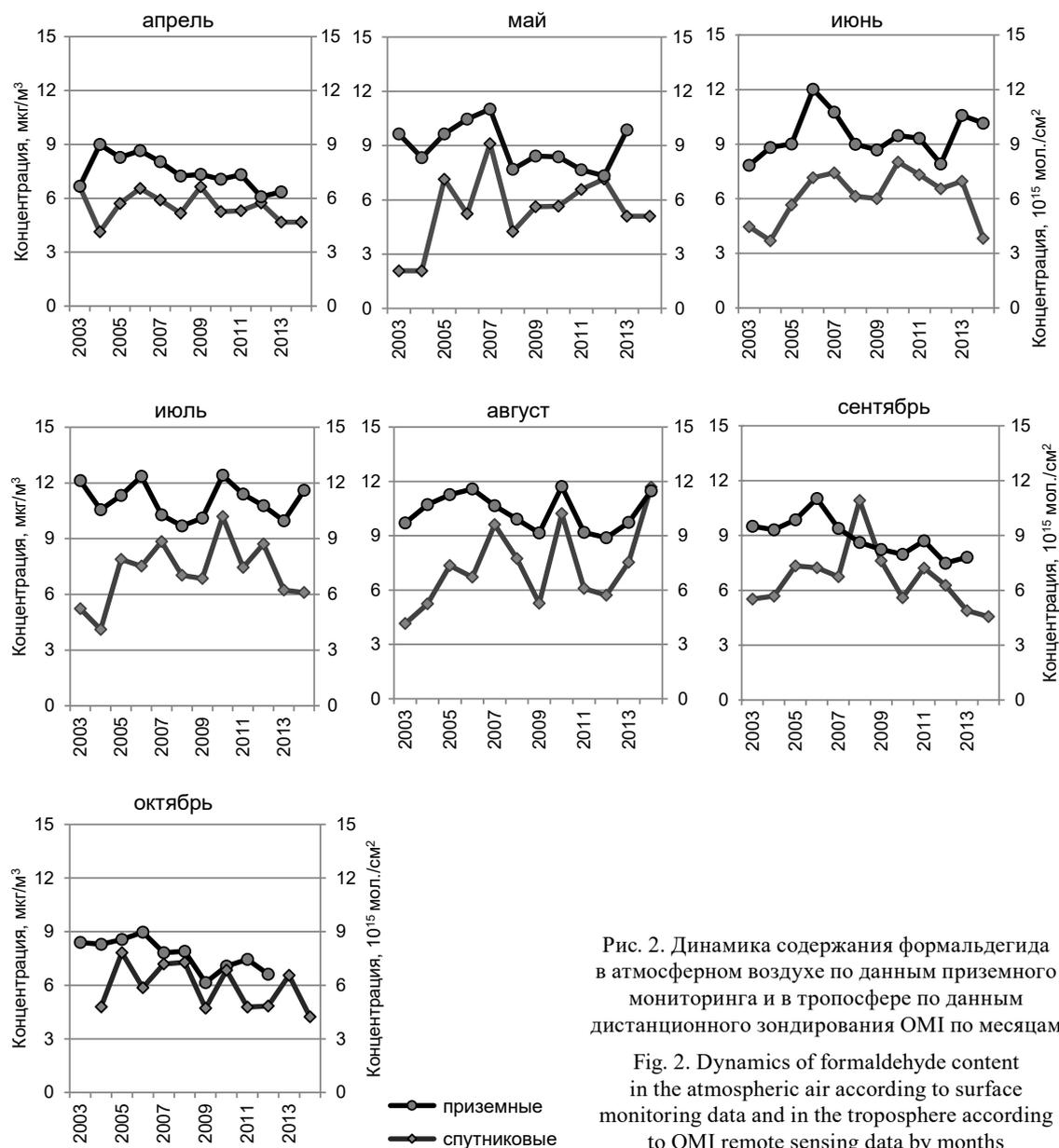
Fig. 1. The average monthly formaldehyde content in the atmospheric column in Belarus in 2012 according to the OMI spectrometer, 10^{15} molec./cm²

Связи результатов наземных измерений и дистанционного мониторинга загрязнения воздуха формальдегидом. Анализ динамики среднегодового содержания формальдегида в атмосферном воздухе Беларуси по данным наземного мониторинга и дистанционного зондирования не выявил устойчивой корреляции между этими показателями за рассмотренный период ($R^2 = 0,03$). Это может быть связано с неполнотой данных спутниковых измерений в течение года (охват спутниковых данных – март/апрель–октябрь). Кроме того, поскольку спектральные характеристики формальдегида перекрываются с другими газами, существует некоторая неопределенность в интерпретации значений его содержания по результатам спутниковых измерений [9].

По отдельным месяцам наиболее четкая связь в годовой динамике содержания формальдегида по данным приземных наблюдений и спектрометра OMI прослеживается в летний период (с коэффициентами корреляции от 0,25 до 0,63) (рис. 2).

Анализ внутригодовой динамики содержания формальдегида в приземном слое и в столбе атмосферы за период исследования показал наличие общих тенденций как в целом по Беларуси ($R^2 = 0,83$) (рис. 3), так и по отдельным городам.

Исследование показало достаточно хорошую сходимость среднемесячных приземных концентраций формальдегида и концентраций по данным дистанционного зондирования на территории Беларуси в 2003–2013 гг. (рис. 4). За исключением 2003 и 2004 гг., коэффициенты корреляции R^2 составили от 0,30 и 0,32 (в 2008 и 2009 гг. соответственно) до 0,86 (в 2010 г.).



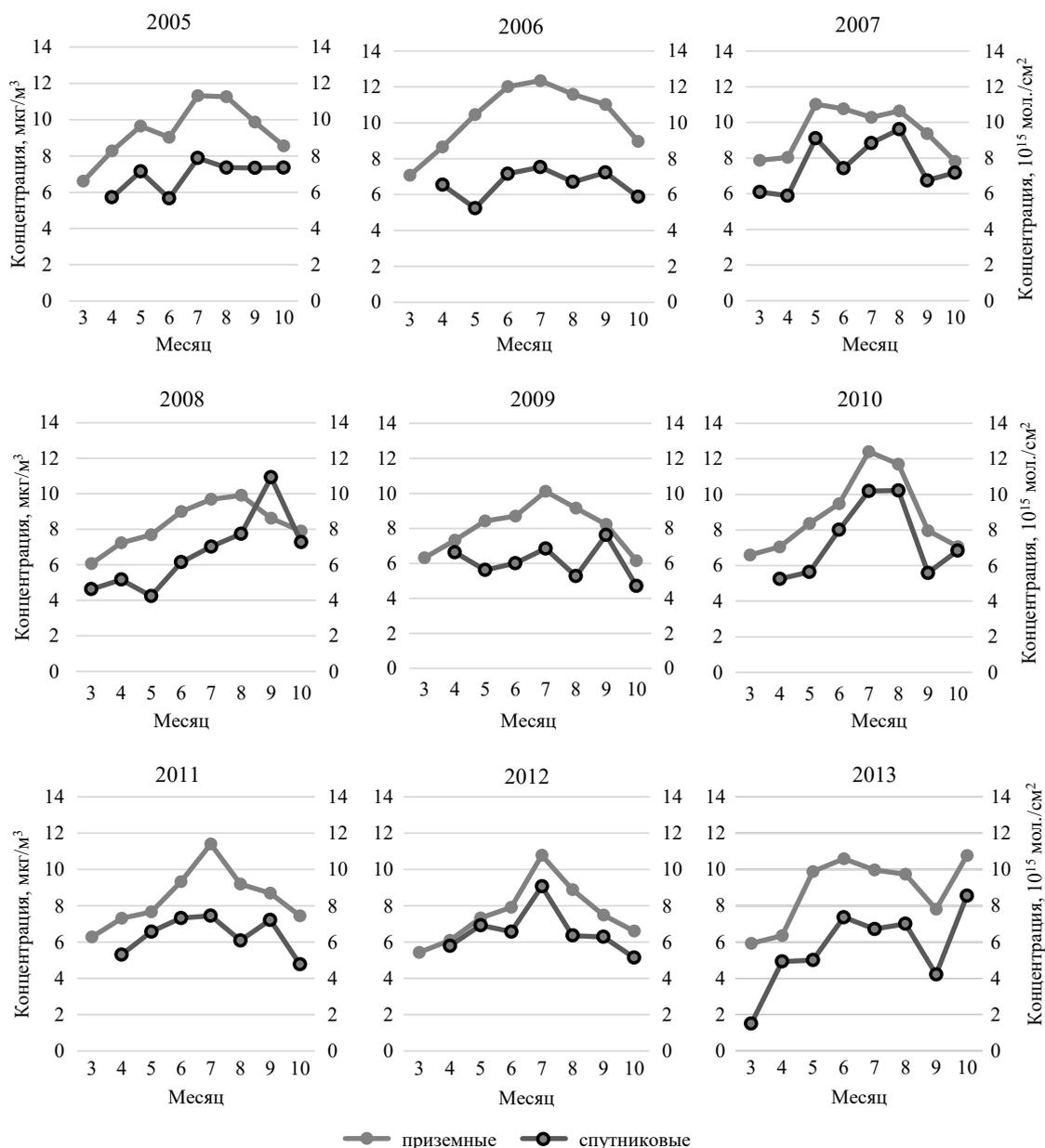


Рис. 4. Динамика среднемесячных приземных концентраций формальдегида по данным мониторинга и концентраций в тропосфере по данным спектрометра OMI в 2005–2013 гг. на территории Беларуси

Fig. 4. Dynamics of monthly average surface concentrations of formaldehyde according to monitoring data and concentrations in the troposphere according to the OMI spectrometer data in 2005–2013 on the territory of Belarus

Города Беларуси. Анализ среднегодового содержания формальдегида в атмосферном воздухе на станциях приземного мониторинга и по данным дистанционного зондирования по городам Беларуси выявил отсутствие устойчивой связи. В то же время как и в среднем по Беларуси, анализ внутригодовых изменений содержания формальдегида в атмосферном воздухе на станциях мониторинга и по данным дистанционного зондирования по городам Беларуси за период исследования с 2003 по 2013 г. показал, что в целом корреляция положительная. Теснота связи (R^2) среднемесячных концентраций формальдегида значительно различается по городам и в некоторые годы достигает 0,95.

В отдельные годы наблюдалась связь среднемесячного содержания формальдегида в атмосферном воздухе на станциях мониторинга и по данным дистанционного зондирования по городам Беларуси практически по всем городам. В наибольшей степени это выражено для 2010 и 2013 гг. (в 10 и 11 из 14 исследованных городов соответственно). Наиболее устойчивая связь среднемесячного содержания формальдегида в атмосферном воздухе на станциях мониторинга и по данным

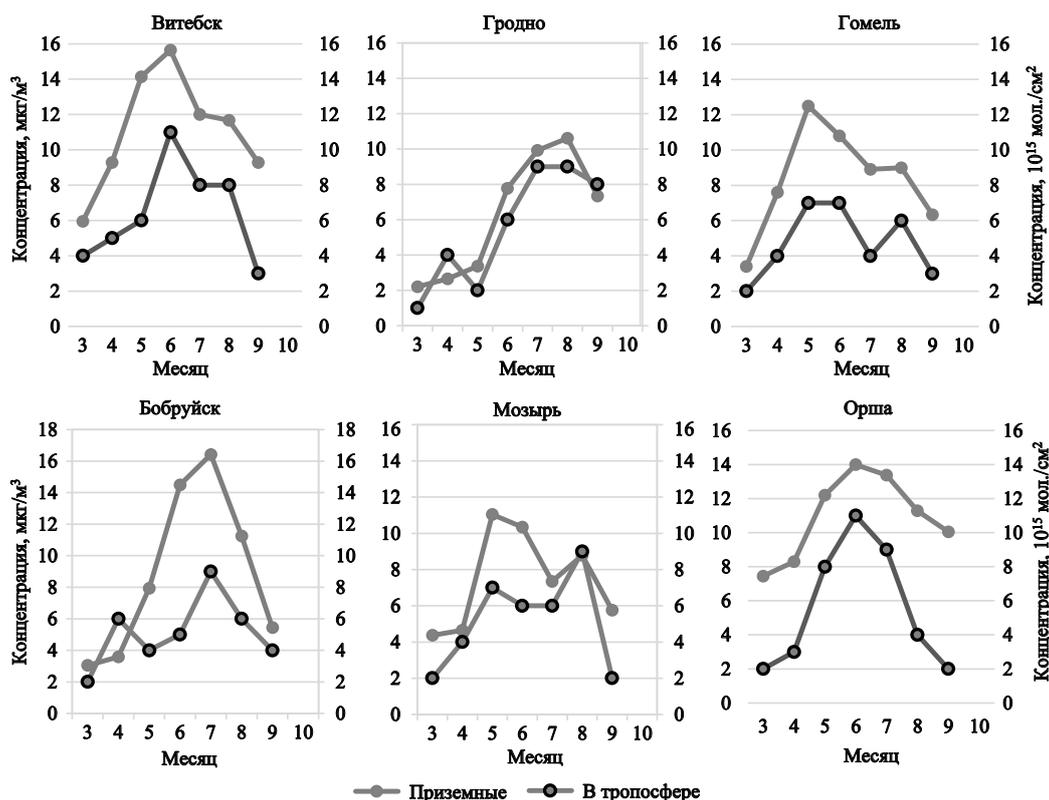


Рис. 5. Внутригодовая динамика содержания формальдегида по данным наземного мониторинга и дистанционного зондирования ОМІ в городах Витебске, Гродно, Гомеле, Бобруйске, Мозыре и Орше

Fig. 5. Intra-annual dynamics of formaldehyde content according to ground-based monitoring and remote sensing OMI in the cities of Vitebsk, Grodno, Gomel, Bobruisk, Mozyr and Orsha

дистанционного зондирования наблюдалась в Бресте, Витебске, Минске, Речице и Орше (по количеству лет). Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены для Речицы ($R^2 = 0,95$ в 2010 г.), Орши ($R^2 = 0,87$ в 2011 г. и $0,83$ в 2013 г.), Гомеля ($R^2 = 0,87$ в 2013 г.) и Гродно ($R^2 = 0,88$ в 2013 г.)

На рис. 5 представлена внутригодовая динамика содержания формальдегида в городах с наибольшим статистическим соответствием данных измерений приземных концентраций формальдегида и его тропосферного содержания по спутниковым данным (R^2 от $0,50$ до $0,88$) в 2013 г. (последний год с наиболее полным рядом данных о содержании формальдегида в приземном слое атмосферы).

Выводы. Результаты анализа показали, что тропосферное содержание формальдегида над большей частью территории Беларуси за 2003–2016 гг. имело весьма неравномерное пространственное распределение. Очагами повышенных концентраций являются главным образом крупные города. Прослеживается изменение содержания формальдегида в направлении преобладающего атмосферного переноса, для всех рассмотренных месяцев наблюдается сокращение концентраций в направлении с юго-запада на северо-восток.

Содержание формальдегида над территорией Беларуси за период исследования находилось в диапазоне до $30,8 \times 10^{15}$ мол./см² и в среднем составило $6,49 \times 10^{15}$ мол./см². В большинстве полученных значений (84,1 %) концентрации формальдегида фиксировались в пределах $2,0$ – $10,0 \times 10^{15}$ мол./см² и только 0,6 % превысили $15,0 \times 10^{15}$ мол./см².

Среднегодовое содержание формальдегида в тропосфере (осредненное по всей территории) характеризуется неустойчивым ростом за рассматриваемый период исследования. Среднегодовые концентрации формальдегида над территорией Беларуси за этот период варьировали от $4,7 \times 10^{15}$ мол./см² до $7,8 \times 10^{15}$ мол./см², среднемесячные концентрации – от $2,1$ до $12,2 \times 10^{15}$ мол./см². Хорошо выражен сезонный ход тропосферного содержания формальдегида; наиболее высокие среднемесячные концентрации, как и для приземных значений, чаще всего фиксируются в июле и августе. Анализ динамики среднегодового содержания формальдегида в атмосферном воздухе в целом для Беларуси по данным наземного мониторинга и дистанционного зондирования выявил сходство тенденций

этих показателей для большей части временного интервала. Анализ внутригодовой динамики содержания формальдегида в приземном слое и в столбе тропосферы свидетельствует о наличии общих тенденций как в целом для Беларуси, так и по отдельным городам. Наиболее четкая связь приземных концентраций формальдегида и содержания в тропосфере по спутниковым данным прослеживается в летние месяцы. В целом корреляция положительная; теснота связи (R^2) между приземной концентрацией формальдегида и содержанием в колонне достигает в некоторые годы 0,86.

Анализ показал, что определение концентрации формальдегида пока невозможно при наличии снежного покрова и высоких баллах облачности. Тем не менее спутниковые данные позволяют установить основные тенденции изменения содержания газа в тропосфере, а удовлетворительное статистическое соответствие данных измерений приземных концентраций формальдегида и его тропосферного содержания делает возможным использовать результаты спутниковых измерений в дальнейших исследованиях. Поскольку размерность результатов наблюдений содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, в том числе и формальдегида, с помощью традиционных методов и систем дистанционного зондирования различна ($\text{мкг}/\text{м}^3$ и $\text{мол.}/\text{см}^2$), и приведение их к одной размерности затруднительно, целесообразно использование данных дистанционных измерений в дополнение к наземным, что позволяет более полно выявить особенности пространственной структуры полей загрязнения атмосферного воздуха, многолетнего и внутригодового хода содержания загрязняющих веществ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология», подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность»; № госрегистрации 20160130 (2016–2018); № госрегистрации 20192480 (2019–2020).

Acknowledgements. The study has been performed within The State Program of Scientific Research «Nature management and ecology», subprogram «Natural resources and environmental safety»; state registration no. 20160130 (2016–2018); state registration no. 20192480 (2019–2020).

Список использованных источников

1. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Мониторинг атмосферного воздуха. Архив результатов наблюдений за 2005–2015 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nsmos.by/content/173.html>. – Дата доступа: 24.04.2021.
2. Нормативы предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ориентировочно-безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения [Электронный ресурс]: пост. Мин-ва здравоохранения РБ, 08.11.2016, № 113 // База нормативных правовых актов Министерства здравоохранения РБ. – Режим доступа: <http://www.svetlce.by/wp-content/uploads/2016/02/Постановление-МЗ-РБ-от-08.11.2016-№-113.pdf>. – Дата доступа: 10.10.2021.
3. Assessment report on formaldehyde for developing ambient air quality objectives. Edmonton: Alberta Environment, 2004. – 112 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.102043>
4. Какарека, С. В. Формальдегид в атмосферном воздухе городов / С. В. Какарека // Изв. РАН. Сер. Географическая. – 2012. – № 4. – С. 104–111.
5. Безуглая, Э. Ю. Воздух городов и его изменения / Э. Ю. Безуглая, Н. В. Смирнова. – СПб.: Астерион, 2008. – 254 с.
6. Кокош, Ю. Г. Сезонная динамика содержания формальдегида в атмосферном воздухе городов Беларуси / Ю. Г. Кокош, С. В. Какарека // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 28–36.
7. Какарека, С. В. Многолетняя динамика содержания формальдегида в атмосферном воздухе городов Беларуси / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош // Природопользование : сб. науч. тр. / Институт природопользования НАН Беларуси ; редкол.: А. К. Карабанов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 23. – С. 31–39.
8. Оценка состояния экосистемы на основе данных дистанционного зондирования атмосферы / Ф. П. Капсаргин [и др.] // Сибир. аэрокосм. журн. – 2012. – № 6 (46). – С. 73–77.
9. Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid / B. N. Duncan [et al.] // Atmospheric Environment. – 2014. – Vol. 94. – P. 647–662. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.061>
10. Twelve years of global observations of formaldehyde in the troposphere using GOME and SCIAMACHY sensors / J.-F. De Smedt [et al.] // Atmos. Chem. Phys. – 2008. – Vol. 8. – P. 4947–4963. <https://doi.org/10.5194/acp-8-4947-2008>
11. The ozone monitoring instrument. IEEE Trans / P. F. Levelt [et. al.] // Geosci. Remote Sens. – 2006. – Vol. 44, N 5. – P. 1092–1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
12. OMI Algorithm Theoretical – Basis Document / ed. K. Chance. – OMI, 2002. – Vol. IV: OMI Trace Gas Algorithms. – 78 с.
13. TEMIS – Tropospheric Emission Monitoring Internet Service [Electronic source]. – Mode of Access: <http://www.temis.nl/index.php>. – Date of Access: 20.04.2018.
14. Space-based formaldehyde measurements as constraints on volatile organic compound emissions in East and South Asia / T.-M. Fu [et al.] // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112, N D6. – P. 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006JD007853>
15. Diurnal, seasonal and long-term variations of global formaldehyde columns inferred from combined OMI and GOME-2 observations / De Smedt J.-F. [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – Vol. 15, № 21. – P. 12519–12545. <https://doi.org/10.5194/acp-15-12519-2015>

16. Sitnov, S. A. Formaldehyde and nitrogen dioxide in the atmosphere during summer weather extremes and wildfires in European Russia in 2010 and Western Siberia in 2012 / S. A. Sitnov, I. I. Mokhov // *International Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 38, N 14. – P. 4086–4106. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1312618>.

17. Ситнов, С. А. Недельная цикличность содержания CH_2O и NO_2 в атмосфере российских регионов (по спутниковым данным) [Электронный ресурс] / С. А. Ситнов, И. И. Мохов. – 2017. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/322420770_Nedelnaa_ciklicnost_soderzania_CH2O_i_NO2_v_atmosfere_rossijskih_regionov_po_sputnikovym_dannym. – Дата доступа: 06.12.2018.

References

1. *National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus. Monitoring of atmospheric air. Archive of observation results for 2005–2015*. Available at: <https://www.nsmos.by/content/173.html> (accessed 24 April 2021) (in Russian).

2. Norms of maximum permissible concentrations of pollutants in the atmospheric air and approximately safe levels of exposure to pollutants in the atmospheric air of settlements and places of mass recreation of the population: Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 08.11.2016, No. 113. *Base of regulatory legal acts of the Ministry of Health of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.svetlce.by/wp-content/uploads/2016/02/Postanovleniye-MZ-RB-ot-08.11.2016-№-113.pdf> (accessed 10 October 2021) (in Russian).

3. *Assessment report on formaldehyde for developing ambient air quality objectives*. Edmonton: Alberta Environment, 2004. 112 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.102043>

4. Kakareka S. V. Formaldehyde in urban air. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2012, no. 5, pp. 82–89 (in Russian).

5. Bezuglaya E. Y., Smirnova N. V. *Air of cities and its changes*. St. Petersburg, Asterion Publ., 2008. 254 p. (in Russian).

6. Kokosh Y. G., Kakareka S. V. Seasonal dynamics of formaldehyde concentrations in atmospheric air of Belarusian cities. *Prirodopol'zovaniye = Nature management*, 2019, no. 1, pp. 28–36 (in Russian).

7. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G. *The long-term dynamics of formaldehyde content in the atmospheric air of the cities of Belarus. Prirodopol'zovaniye: sb. nauch. tr.* [Nature management: a collection of articles]. Minsk, 2013, vol. 23, pp. 31–39 (in Russian).

8. Kapsargin F. P., Kashkin V. B., Simonov K. V., Zuev D. V. Assessment of ecosystem based on remote sensing of the atmosphere. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal*, 2012, no. 6 (46), pp. 73–77 (in Russian).

9. Duncan B. N., Prados A. I., Lamsal L. N., Liu Y., Streets D. G., Gupta P., Hilsenrath E., Kahn R. A., Nielsen J. E., Beyersdorf A. J., Burton S. P., Fiore A. M., Fishman J., Henze D. K., Hostetler C. A., Krotkov N. A., Lee P., Lin M., Pawson S., Pfister G., Pickering K. E., Pierce R. B., Yoshida Y., Ziemba L. D. Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 94, pp. 647–662. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.061>

10. De Smedt I., Müller J.-F., Stavrou T., van der A R., Eskes H., Van Roozendaal M. Twelve years of global observations of formaldehyde in the troposphere using GOME and SCIAMACHY sensors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, pp. 4947–4963. <https://doi.org/10.5194/acp-8-4947-2008>

11. Levelt, P., Oord, G. H. J., Dobber M., Mälkki Anssi, Visser, Harm, Vries, Johan, Stammes, Piet, Lundell, Jens, Saari, Heikki. The Ozone Monitoring Instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, vol. 44, no. 5, pp. 1093–1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>

12. Chance K. (ed.). *OMI Algorithm Theoretical – Basis Document. Vol. IV: OMI Trace Gas Algorithms*. OMI, 2002. 78 c.

13. *TEMIS – Tropospheric Emission Monitoring Internet Service*. Available at: <http://www.temis.nl/index.php> (accessed 20 April 2018).

14. Fu T.-M., Jacob D. J., Palmer P. I., Chance K., Wang Y. X., Barletta B., Blake D. R., Stanton J. C., Pilling M. J. Space-based formaldehyde measurements as constraints on volatile organic compound emissions in East and South Asia. *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, no. D6. <https://doi.org/10.1029/2006JD007853>

15. DeSmedt I., Stavrou T., Hendrick F., Danckaert T., Vlemmix T., Pinardi G., Theys N., Lerot C., Gielen C., Vigouroux C., Hermans C., Fayt C., Veeckind P., Müller J. F., Van Roozendaal M. *Diurnal*, seasonal and long-term variations of global formaldehyde columns inferred from combined OMI and GOME-2 observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, vol. 15, no. 21, pp. 12519–12545. <https://doi.org/10.5194/acp-15-12519-2015>

16. Sitnov S. A., Mokhov I. I. Formaldehyde and nitrogen dioxide in the atmosphere during summer weather extremes and wild-fires in European Russia in 2010 and Western Siberia in 2012. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, no. 14, pp. 4086–4106. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1312618>

17. Sitnov S. A., Mokhov I. I. *Weekly cyclicity of CH_2O and NO_2 content in the atmosphere of Russian regions (according to satellite data)*. 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322420770_Nedelnaa_ciklicnost_soderzania_CH2O_i_NO2_v_atmosfere_rossijskih_regionov_po_sputnikovym_dannym (accessed 6 December 2018). (in Russian).

Информация об авторах

Кокос Юлия Геннадьевна – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Какарека Сергей Витальевич – д-р техн. наук, профессор, зав. лаб. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

Information about the authors

Kokosh Yuliya G. – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skoriny str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Kakareka Sergey V. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skoriny str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru