

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-156-173>

УДК 504.3.054

## **Изменения кадастровых данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе**

***Д.В. Борисов, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
lbj23.98@mail.ru*

Для планируемой модификации технологии прогнозирования качества воздуха за счет перехода к новой версии ХТМ CHIMERE проведен сравнительный анализ эмиссий ЕМЕП-2020 с используемыми в настоящее время данными о выбросах загрязнителей в атмосферу ЕМЕП-2013. Выявлено снижение в последние годы суммарного объема эмиссий на территории московского региона на 40 %, установлено их пространственное перераспределение и изменение вкладов отраслевых источников в суммарный выброс. Больше всего в ЕМЕП-2020 по сравнению с ЕМЕП-2013 изменен вклад эмиссий автотранспорта (увеличен до 58 %) и вклад эмиссий от промышленного сжигания (увеличен до 27 %). Особый интерес представляет сравнение кадастровых эмиссий в 2019 и 2020 гг.; обнаружено небольшое уменьшение суммарных эмиссий (на 1–6 %) в 2020 г., что адекватно соотносится с ограничительными мероприятиями в период пандемии COVID-19.

Представлены и обсуждаются результаты сравнений данных о выбросах в атмосферу Росприроднадзора и ЕМЕП-2019 на территории Москвы; установлено совпадение суммарных эмиссий при отличиях в пространственном и отраслевом распределении. Разработанные алгоритмы сравнительного анализа данных ЕМЕП и Росприроднадзора универсальны, могут применяться для анализа обновленных данных на любых территориях.

*Ключевые слова:* эмиссии ЕМЕП, химическая транспортная модель, CHIMERE, данные Росприроднадзора, пандемия COVID-19

## **Changes in inventory data on pollutant emissions into the atmosphere over the Moscow region**

***D.V. Borisov, I.N. Kuznetsova, M.I. Nakhaev***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
lbj23.98@mail.ru*

For the planned modification of the air quality forecasting technology due to the transition to the new version of the CHIMERE chemical transport model, the updated EMEP-2020 emission data for the Moscow region were compared with the currently used EMEP-2013 data on emissions of priority pollutants into atmosphere. A 40 % decrease in the total volume of emissions has been revealed over the Moscow region in recent years, their spatial redistribution and changes in the contributions of industry sources to the total emission have been established. In EMEP-2020, as compared to EMEP-2013, the contribution of vehicle emissions and emissions from industrial combustion changed the most:

it increased up to 58 and 27%, respectively. The comparison of 2019 and 2020 emissions is of particular interest: the inventory data revealed a slight decrease in total emissions (by 1–6 %) in 2020, which adequately correlates with restrictive measures during the COVID-19 pandemic.

The results of comparisons of the data on emissions into the atmosphere on the territory of Moscow according to Rosprirodnadzor and EMEP-2019 are presented and discussed. The coincidence of total emissions was established, with differences in spatial and sectoral distributions. The developed algorithms for the comparative analysis of EMEP and Rosprirodnadzor data are universal and can be used to analyze updated information in any regions.

*Keywords:* EMEP emissions, chemical transport model, CHIMERE, Rosprirodnadzor, COVID-19 pandemic

## Введение

Действующая в ФГБУ «Гидрометцентр России» технология прогнозирования качества атмосферного воздуха для территории московского региона базируется на химической транспортной модели (XTM) CHIMERE и системе COSMO-Ru2ART [3, 5, 6]. Расчеты концентраций загрязняющих веществ проводятся с использованием прогностических метеорологических данных мезомасштабной модели COSMO-Ru с пространственным разрешением 2.2 км [<https://meteoinfo.ru/cosmo-maps>]. Одна из входящих в технологию моделей – XTM CHIMERE – включена в технологию благодаря открытому доступу к исходному коду [<https://www.lmd.polytechnique.fr/>], а также постоянному усовершенствованию разработчиками этой модели, дающему возможность пользователям применять различные настройки, в частности подключать данные различных атмосферных моделей, корректировать данные землепользования и эмиссий и др. [9–11]. К тому же авторы планируют переход на использование в технологии прогнозирования качества воздуха также находящейся в открытом доступе последней версии CHIMEREv2020 [12].

Для технологических расчетов используются данные антропогенных эмиссий кадастра ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) и биогенных эмиссий [<https://www.emep.int/>]. Данные ЕМЕП представлены на регулярной сетке, находятся в свободном доступе и, что важно для пользователей, позволяют проводить региональную коррекцию [13]. В ранее опубликованных авторами публикациях обсуждались способы и эффективность коррекции кадастровых данных, обнаруженной в уменьшении модельных ошибок величин концентраций загрязняющих веществ [1, 8]. Оценка качества модельных прогнозов концентраций загрязняющих веществ проводится путем сравнения модельных концентраций с данными измерений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>).

Появление новых данных эмиссий в ЕМЕП происходит с задержкой около двух лет. Сегодня доступна информация о выбросах в атмосферу в 2020 г. (ниже ЕМЕП-2020). В кадастре последних лет данные представлены в обновленном формате: увеличено разрешение сетки до  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,

расширена номенклатура отраслевых источников загрязнения. До обновления в ЕМЕР использовалась номенклатура 11 отраслевых источников SNAP (Selected Nomenclature for sources of Air Pollution), в обновленном формате представляются данные о выбросах уже 15 источников GNRF (General Nomenclature for Reporting).

В действующей технологии прогноза качества воздуха расчеты ХТМ пока выполняются с использованием данных об эмиссиях ЕМЕР 2013 года (далее ЕМЕР-2013), представленных на сетке  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Намерение перейти на усвоение эмиссий ЕМЕР последнего выпуска должно получить обоснование целесообразности этой процедуры по результатам сравнения данных используемого кадастра ЕМЕР-2013 с актуализированным кадастром ЕМЕР-2020. При этом необходимо принимать во внимание специфические особенности 2020 года в связи с сокращением выбросов в атмосферу в период пандемии COVID-19. Ограничения работы промышленных предприятий и транспорта с соответственным сокращением эмиссий в 2020 г. были характерны и для московского региона [2, 4]. Это обстоятельство послужило причиной проведения анализа данных ЕМЕР предшествующего 2019 года.

Представленное исследование посвящено сравнительному анализу данных об эмиссиях на территории московского региона, представленных в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020. Также проведен сравнительный анализ данных ЕМЕР-2019 с открытыми данными Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор, ниже РПН) о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ на территории Москвы в 2019 году [7].

### Данные и методы исследования

В рамках исследований выполнен сравнительный анализ отраслевых эмиссий шести приоритетных загрязнителей воздуха: оксид углерода (CO), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), неметановые летучие органические соединения (NMVOC), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), взвешенные частицы ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{\text{coarse}}$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ).

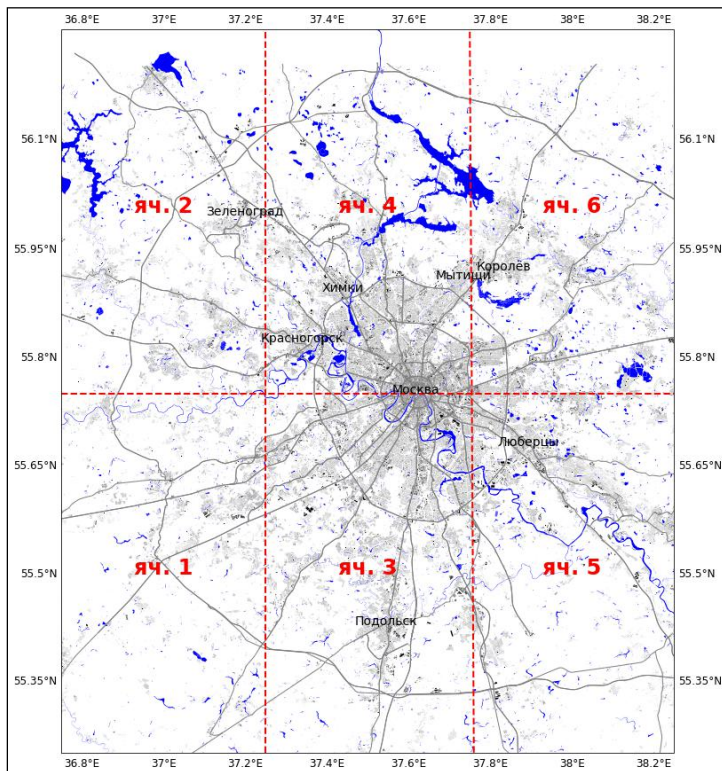
Необходимо отметить, что на сайте ЕМЕР доступны данные о выбросах на территории московского региона 2013 года актуализации в обновленном формате, соответствующем формату данных ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020. Однако, поскольку ранее авторами проводился анализ эмиссий на территории московского региона кадастра ЕМЕР-2013, представленных по 11 отраслевым источникам (SNAP) на сетке  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  [8], с целью упрощения сравнительного анализа принято решение о переводе данных ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 на регулярную сетку  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Кроме того, данные отраслевых источников выбросов ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 перераспределены под номенклатуру SNAP кадастра ЕМЕР-2013 (табл. 1).

Анализ временной и пространственной динамики количества выбросов проводился по 6 ячейкам регулярной сетки  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , охватывающим территорию московского региона (рис. 1).

**Таблица 1.** Соответствие отраслевых источников выбросов в атмосферу в кадастрах ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2013**Table 1.** Correspondence of air emissions industry sources in the ЕМЕР-2019 and ЕМЕР-2013 inventories

ЕМЕР-2019 (GNRF)			ЕМЕР-2013 (SNAP)	
<b>A</b>	PublicPower	Энергетика	<b>S1</b>	Сжигание в энергетической промышленности
<b>C</b>	OtherStationary Comb	Другое стационарное сжигание	<b>S2</b>	Сжигание на непромышленных заводах
<b>B</b>	Industry	Промышленность	<b>S3</b>	Сжигание в обрабатывающей промышленности
<b>D</b>	Fugitive	Летучие вещества	<b>S5</b>	Извлечение и распределение ископаемого топлива и геотермической энергии
<b>E</b>	Solvents	Растворители	<b>S6</b>	Использование растворителей
<b>F</b>	RoadTransport	Дорожный транспорт	<b>S7</b>	Автомобильный транспорт
<b>I</b>	Offroad	Внедорожный транспорт		
<b>G</b>	Shipping	Судоходство	<b>S8</b>	Другие мобильные источники и механизмы
<b>H</b>	Aviation	Авиация		
<b>O</b>	AviCruise	Гражданская авиация		
<b>P</b>	IntShipping	Внутреннее судоходство		
<b>J</b>	Waste	Отходы	<b>S9</b>	Переработка отходов и утилизация
<b>K</b>	AgriLivestock	Животноводство	<b>S10</b>	Сельское хозяйство
<b>L</b>	AgriOther	Другое сельское хозяйство		
<b>N</b>	Natural	Природные отходы	<b>S11</b>	Другие источники (естественные и биогенные источники)

Следует отметить особенности представления имеющихся за 2019 г. (более поздних – нет) данных в РПН, учитывая поставленную цель сравнения их с данными ЕМЕР. В базе данных РПН-2019 имеется информация об антропогенных выбросах в атмосферу на территории Москвы приоритетных загрязнителей: CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, NO<sub>x</sub>, PM (сумма всех трех фракций), SO<sub>x</sub>. Здесь содержатся данные о выбросах от стационарных источников, полученные из отчетов формы 2ТП-воздух и распределенные по административным округам Москвы и видам экономической деятельности (ОКВЭД). Отдельно представлены данные о выбросах загрязняющих веществ автотранспортом на территории Москвы, но, в отличие от стационарных источников, суммарно для территории города.



**Рис. 1.** Ячейки кадастра ЕМЕР-2013, охватывающие территорию московского региона (красным цветом показана сетка ЕМЕР-2013 и условные номера ячеек).

**Fig. 1.** EMEP-2013 inventory cells covering the territory of the Moscow region (EMEP-2013 grid and cell numbers are shown in red).

На подготовительном этапе эмиссии стационарных источников в ячейках ЕМЕР-2019 ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ) были перераспределены по административным округам Москвы пропорционально доле пересечения территории ячейки и территории административного округа от площади ячейки.

Сравнение суммарных по территории Москвы эмиссий автотранспорта по данным РПН проводилось по представленным в ЕМЕР-2019 данным отраслевого источника F (RoadTransport, табл. 1). Разработанный алгоритм сравнения данных ЕМЕР в обновленном формате с данными РПН универсален, может применяться при анализе актуализированных данных РПН и для других территорий.

Подготовительная обработка представленных в кадастре ЕМЕР и РПН данных, последующий сравнительный анализ данных проводились с использованием языка программирования Python и подключаемых к нему библиотек Pandas, Numpy и Glob. Для построения визуализаций использовались библиотеки Matplotlib, Geopandas, Cartopy, Shapely.

### Обсуждение результатов

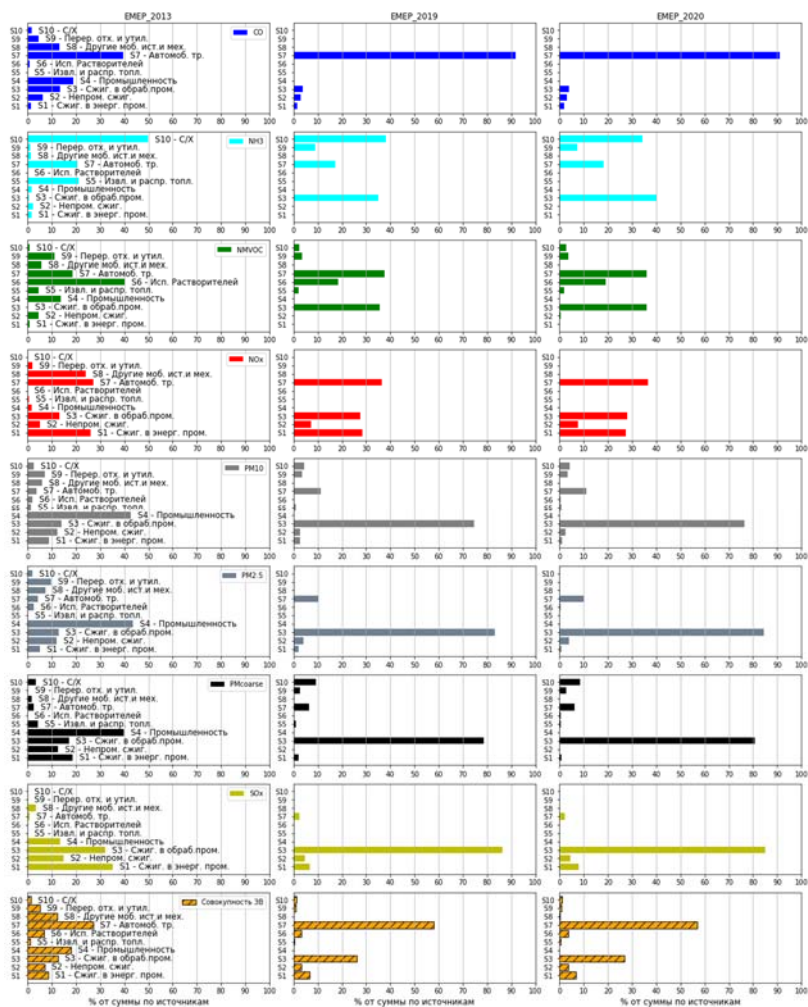
**Суммарные выбросы.** Анализ изменений суммарного объема выбросов по рассматриваемой территории (рис. 1) показал снижение объема выбросов в ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 на 37 % и 40 % соответственно (табл. 2). Основной вклад в снижение суммарного объема выбросов в обоих кадастрах внесли эмиссии РМ всех трех фракций. Также в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 суммарные эмиссии CO, NMVOC, NOx снижены на 30–40 % и увеличены эмиссии NH<sub>3</sub> на 25 % и 18 % соответственно. И только выбросы SOx практически не изменились.

**Таблица 2.** Суммарные объемы выбросов приоритетных загрязнителей на территории Москвы в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020  
**Table 2.** Total emissions of priority pollutants in the territory of Moscow region in the ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 and ЕМЕР-2020 inventories

	CO, Тыс. т	NH <sub>3</sub> , Тыс. т	NMVOC, Тыс. т	NOx, %	PM10, %	PM2.5, %	PMcoarse, %	SOx, %	Сумма
ЕМЕР-2013	622317	7653	200408	218020	86123	62907	23215	76199	1296842
ЕМЕР-2019	388577	9528	146516	150699	19434	15422	8088	78427	816691
ЕМЕР-2020	364829	9039	143525	145068	19641	15288	8478	75609	781476
Доля ЕМЕР-2013	48	1	15	17	7	5	2	6	100
Доля ЕМЕР-2019	48	1	18	18	2	2	1	10	100
Доля ЕМЕР-2020	47	1	18	19	3	2	1	10	100
Разница ЕМЕР-2013 ЕМЕР-2019	-38	+25	-27	-31	-77	-75	-65	+3	-37
Разница ЕМЕР-2013 ЕМЕР-2020	-41	+18	-28	-33	-77	-76	-63	-1	-40
Разница ЕМЕР-2019 ЕМЕР-2020	-6	-5	-2	-4	+1	-1	+5	-4	-4

Установлено небольшое уменьшение (на 1–6 %) суммарных эмиссий приоритетных загрязняющих веществ на территории региона в ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2019, что, по-видимому, отражает ограничительные мероприятия в период пандемии COVID-19 в Москве и области [4]. Можно также отметить незначительное уменьшение в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 доли выбросов PM10 и PM2.5 (на 2–3 %) на фоне увеличения доли выбросов NMVOC (на 3 %) и SOx (на 4 %).

**Структурные изменения эмиссий отраслевых источников.** Наиболее существенные изменения в последних версиях ЕМЕР по сравнению с ЕМЕР-2013 коснулись выбросов автотранспорта (SNAP7) и выбросов от сжигания в обрабатывающей промышленности (SNAP3). В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 вклад эмиссий SNAP7 в суммарный выброс увеличен почти в 2 раза – до 58 %, SNAP3 – до 27 % (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение эмиссий загрязняющих веществ CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>coarse</sub>, SO<sub>x</sub> (сверху вниз) и суммарных выбросов (нижние рисунки) отраслевых источников по территории Москвы в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020. Номенклатура отраслевых источников SNAP показана в табл. 1.

**Fig. 2.** Distribution of emissions of pollutants CO, NH<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>coarse</sub>, SO<sub>x</sub> (from top to bottom) and total emissions (bottom figures) from industry sources over the territory of Moscow region in the EMEP-2013, EMEP-2019 and EMEP-2020. The nomenclature of industry sources of SNAP is shown in table 1.

Отметим, источник SNAP4 (Промышленность) отсутствует в матрице конвертации номенклатур ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020, а источнику SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) по номенклатуре GNRF соответствует источник «Industry» (Промышленность). По-видимому, в кадастрах ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 выбросы SNAP4 были учтены в номенклатуре GNRF «Industry» и при конвертации перешли в SNAP3. Кроме того, в данных ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 практически отсутствуют выбросы источника SNAP8 (Другие мобильные источники и механизмы); сделано предположение, что выбросы этого источника перенесены в SNAP7. Такие преобразования можно связать с установленным существенным увеличением в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с данными ЕМЕР-2013 доли выбросов источников SNAP7 и SNAP3.

Сравнение суммарных эмиссий отраслевых источников загрязнителей ЕМЕР-2020 и ЕМЕР-2019 показало практически отсутствие разницы между ними (табл. 2, рис. 2).

Ниже перечислены особенности межгодовой динамики эмиссий приоритетных загрязнителей от отраслевых источников.

**СО.** В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 в суммарном объеме выбросов СО доля SNAP7 (Автомобильный транспорт) увеличена до 92 %, в ЕМЕР-2013 она составляла 40 % (рис. 2).

**NH<sub>3</sub>.** В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 отсутствует источник SNAP5 (Извлечение и распределение ископаемого топлива и геотермической энергии), а в ЕМЕР-2013 вклад SNAP5 составлял 21 % в суммарный объем выбросов. В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 значительно возрос вклад в суммарный выброс источника SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) до 35 % и 40 % соответственно. В ЕМЕР-2013 выбросы NH<sub>3</sub> источника SNAP3 отсутствуют.

**NM<sub>3</sub>OC.** В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 снижен вклад до 19 % источника SNAP6 (Использование растворителей); в ЕМЕР-2013 он составлял 40 %.

**NO<sub>x</sub>.** Изменения эмиссий отраслевых источников NO<sub>x</sub> соответствуют реальным тенденциям: в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 вклад источника SNAP7 (Автомобильный транспорт) увеличен до 37 %, что почти на 10 % больше по сравнению с ЕМЕР-2013; почти вдвое увеличена доля выбросов SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) – до 28 %.

**PM** (все три фракции). В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 существенно увеличен вклад источника SNAP3 до 75–84% при 13–17% в ЕМЕР-2013; резко снижены (до 1–4 %) вклады источников SNAP1 (Сжигание в энергетической промышленности) и SNAP2 (Сжигание на непромышленных заводах). Вклад источника SNAP7 в выбросах PM в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 увеличился до 6–11 % (рис. 2).

**SO<sub>x</sub>.** Как и по выбросам PM, в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 резко увеличен вклад выбросов SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) – до 85 %, в ЕМЕР-2013 доля этого источника в суммарном объеме выбросов SO<sub>x</sub> составляла 32 %. Обоснованность такого перераспределения, на наш



взгляд, не имеет практического обоснования. В последних версиях ЕМЕР, напротив, резко уменьшен вклад SNAP1 и SNAP2 (Сжигание) в суммарные выбросы SOx – до 4–8 %.

**Пространственное перераспределение суммарных по источникам эмиссий.** Анализ пространственного распределения суммарных эмиссий в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 показал существенные изменения в их распределении по территории московского региона по сравнению с ЕМЕР-2013. На рис. 3 в каждой из 6 ячеек ЕМЕР  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  представлены доли эмиссий загрязняющих веществ от суммарного по территории объема выбросов в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020.

Перед анализом пространственных преобразований эмиссий в последних версиях кадастров ЕМЕР заметим, что в ранее опубликованных авторами работах подчеркивалось наличие в данных ЕМЕР-2013 ярко выраженного максимума эмиссий автотранспорта в юго-западной части Москвы, также была показана целесообразность коррекции и выравнивания суммарных эмиссий в северной и южной частях московского домена [8]. По результатам проведенного анализа установлено, что в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 имеются существенные изменения в пространственном и количественном распределении эмиссий загрязняющих веществ; отметим наиболее заметные:

- в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 на юго-западе Москвы (ячейка 1) суммарные эмиссии сокращены в 5 раз по сравнению с ЕМЕР-2013 и составляют 5 % от суммы выбросов по московскому домену;

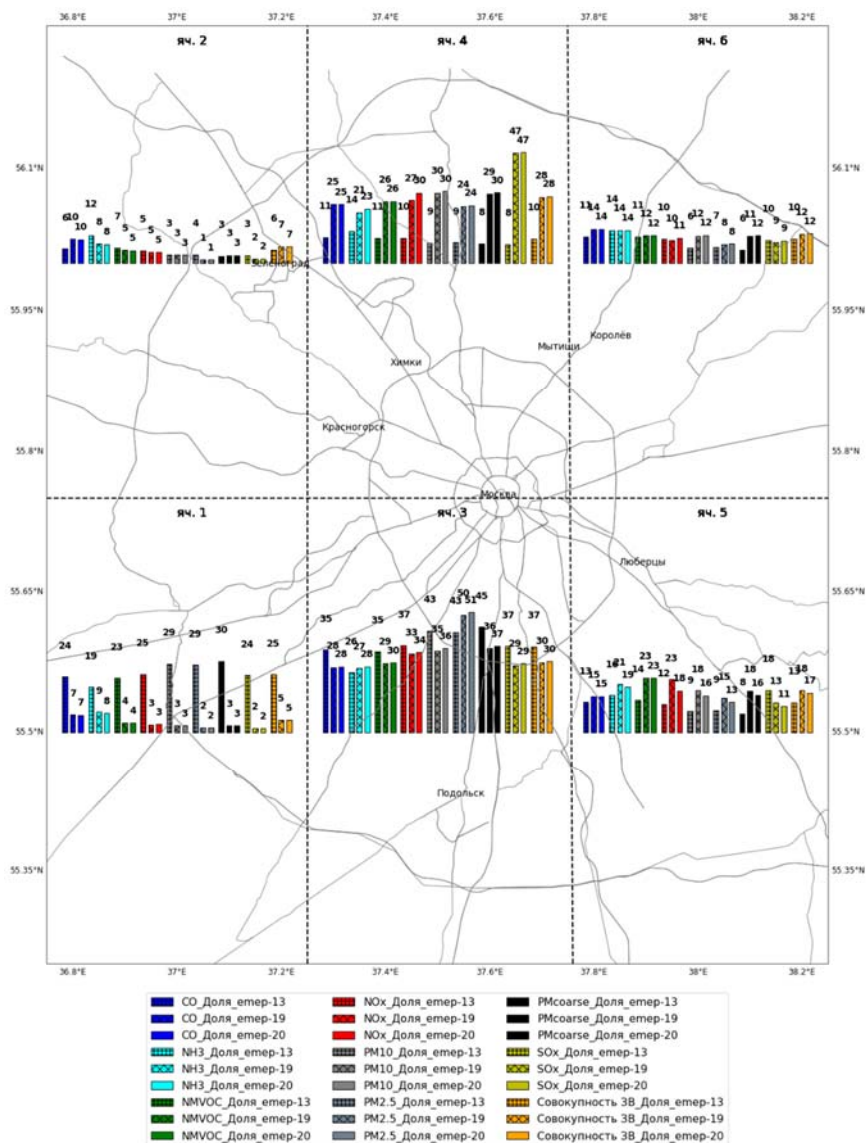
- на севере Москвы (ячейка 4) почти в 3 раза увеличен объем суммарных эмиссий – до 28 % от суммарного выброса по территории.

В других частях города изменения объемов суммарного выброса загрязняющих веществ в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 менее значительны: на 7 % суммарные эмиссии снижены на юге (ячейка 3), на 2–5 % увеличены в восточном секторе (ячейки 5 и 6). Практически не изменились эмиссии на северо-западе (ячейка 2).

Реализованное в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 пространственное перераспределение эмиссий загрязнителей обеспечивает более равномерное и, на наш взгляд, приближенное к реальности распределение эмиссий по территории московского региона.

Тенденции изменений вклада отдельных загрязняющих веществ в сумму выброса на территории московского домена детально отражены на рис. 3. Из наиболее значимых отметим: наибольший вклад в городское загрязнение воздуха РМ (около 50 %) был и сохранился в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 в южной части города. Значительный локальный максимум загрязнения SOx появился в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 на севере Москвы (ячейка 4), в ЕМЕР-2013 в этом районе эмиссии SOx были в 6 раз меньше и сравнимы с соседней ячейкой 6.

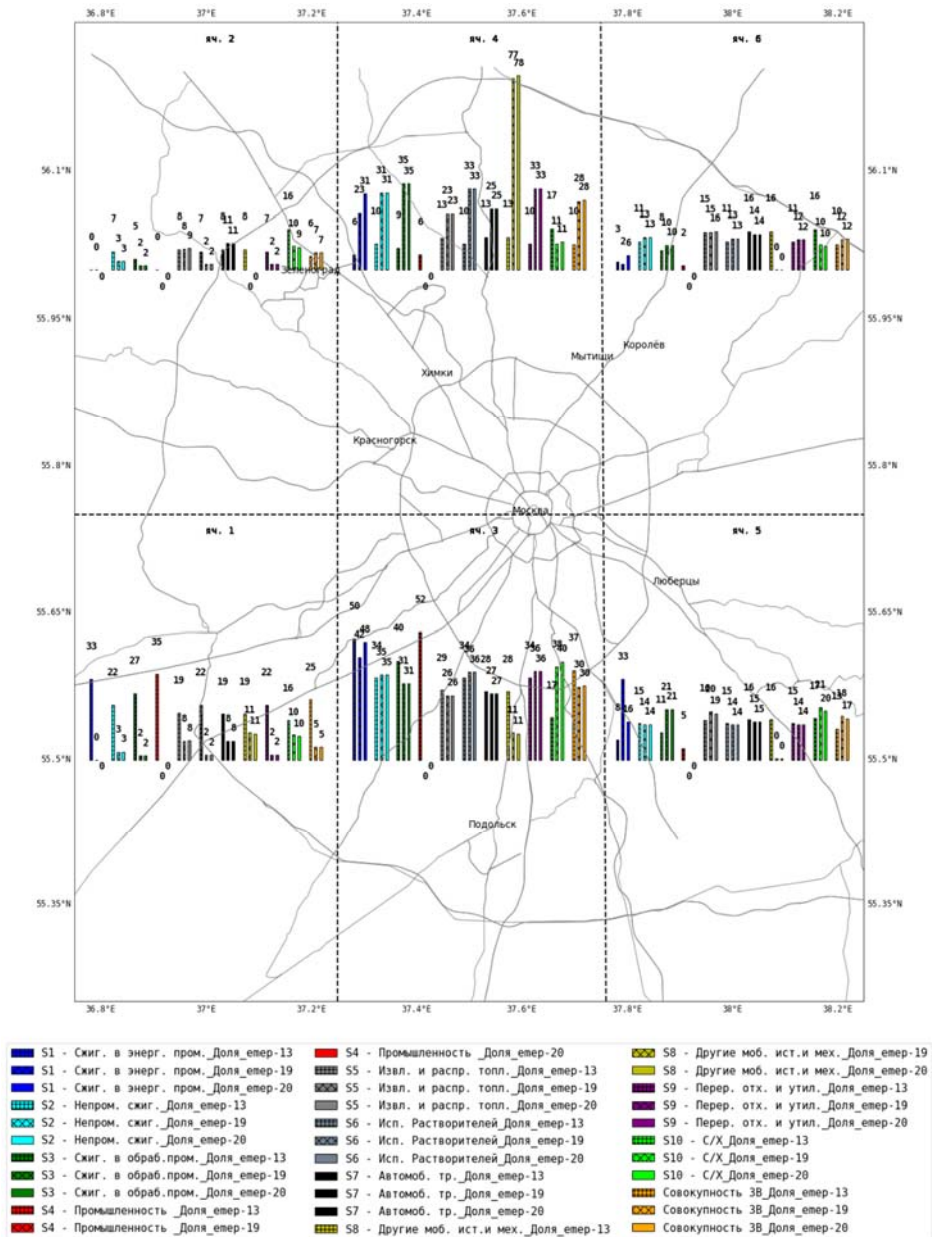
Отдельно отметим, в ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2019 изменений пространственного распределения суммарных по источникам эмиссий не наблюдается. Можно отметить только снижение в ячейке 5 (юго-восток) суммарных эмиссий на 10 %, включая снижение на 24 % эмиссий NOx.



**Рис. 3.** Доли эмиссий загрязняющих веществ (NH<sub>3</sub>, NMVOC, NOx, PM2.5, PM10, PMcoarse, SOx и их сумма) от суммарного по территории объема выбросов в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020.

**Fig. 3.** Shares of pollutant emissions (NH<sub>3</sub>, NMVOC, NOx, PM2.5, PM10, PMcoarse, SOx and their sum) of the total emissions in the territory in the ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 and ЕМЕР-2020 inventories.

Изменения пространственного распределения суммарных эмиссий отраслевых источников показаны в каждой ячейке ЕМЕР  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  на рис. 4.



**Рис. 4.** Доли эмиссий отраслевых источников от суммы эмиссий по территории по номенклатуре SNAP в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020.  
**Fig. 4.** Shares of emissions from industry sources from the total emissions in territory according to the SNAP nomenclature in the ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 inventories.

Изменения пространственных распределений суммарных эмиссий отраслевых источников в целом соответствуют тенденциям, описанным выше для пространственных распределений суммарных эмиссий. Ниже перечислены наиболее отличающиеся от общих тенденций распределения эмиссии отраслевых источников в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020.

**SNAP1** (Сжигание в энергетической промышленности) – отсутствуют выбросы в ячейках 1 и 2 (запад), большая часть выбросов (42 % и 48 %) в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 приходится на ячейку 5 (юг). Также в ЕМЕР-19 23 % выбросов SNAP1 приходится на ячейку 4 и 33 % на ячейку 5, в ЕМЕР-20 на эти ячейки приходится 31 % и 16 % от суммарных по территории выбросов соответственно.

**SNAP8** (Другие мобильные источники и механизмы) – основной объем выбросов (около 78 %) приходится на ячейку 4 (север) при 11 % выбросов в ячейках 1 и 3 (юго-запад и юг соответственно) при отсутствии выбросов в остальных ячейках.

**SNAP10** (Сельское хозяйство) – большая часть эмиссий (около 70 %) сосредоточена в южной части домена (ячейки 1, 3, 5), а в ЕМЕР-2013 выбросы SNAP10 были примерно поровну распределены между южной и северной частями домена.

### **Сравнение данных кадастра ЕМЕР-2019 с данными Росприроднадзора за 2019 год**

**Стационарные источники.** По данным РПН 75 % эмиссий всех загрязнителей на территории Москвы приходится на два источника по классификатору ОКВЭД: «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха» (63 %) и «Производство кокса и нефтепродуктов» (12 %).

По данным ЕМЕР-2019 63 % выбросов совокупности загрязнителей стационарных источников приходится на источник N14\_Industry (Промышленность) и 16 % на источник N14 A\_PublicPower (Энергетика).

Таким образом, в РПН оценки вклада выбросов предприятий энергетического комплекса отличаются от ЕМЕР-2019 почти в 4 раза. Имеются различия между двумя кадастрами и в оценках вклада отдельных источников в суммарный выброс отдельных загрязняющих веществ.

**СО.** По данным РПН 48 % эмиссий СО производит источник «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха», в ЕМЕР-2019 энергетика (N14 A) обеспечивает 27 % суммарных эмиссий СО, промышленность и стационарное сжигание (N14 B и N14 C) – около 70 %.

**NOx.** Около 82 % эмиссий этого вещества по данным РПН приходится на предприятия энергетического комплекса. По данным ЕМЕР-2019 эмиссии от энергетических предприятий составляют около 43 %, а 55 % эмиссий NOx приходится на промышленность и другое сжигание (N14 B и N14 C).

**PM.** По данным РПН 23 % от суммарных эмиссий приходится на предприятия энергетического комплекса и 19 % на «Производство прочей неметаллической минеральной продукции». По данным ЕМЕР-2019 91 % эмиссий PM приходится на промышленные предприятия (N14 B).

**SOx.** По данным РПН 79 % выбросов этих газов делают энергетические объекты, 17 % приходится на «Производство кокса и нефтепродуктов». В ЕМЕР-2019 основным источником выбросов SOx (90 %) является промышленность.

**NMVOС.** 41% выбросов неметановых углеводородов дают производства кокса и нефтепродуктов, 20 % – «Торговля розничная». По данным ЕМЕР-2019 50 % выбросов NMVOС приходится на промышленные предприятия и 36 % – на производство растворителей (N14 E).

В табл. 3 приведены данные суммарных выбросов приоритетных загрязнителей на территории Москвы суммарно и отдельно по стационарным источникам и передвижным источникам (транспорту).

**Таблица 3.** Суммарные по территории Москвы объемы выбросов приоритетных загрязнителей, ЕМЕР-2019 и данные РПН

**Table 3.** Total emissions of priority pollutants for the territory of Moscow, ЕМЕР-2019 and RPN data

Данные	CO	NOx	SOx	PM	NH <sub>3</sub>	NMVOС	Всего
<b>Транспортные выбросы</b>							
ЕМЕР-2019	136342	20049	466	Н/Д	634	20083	177574
РПН	251860	45290	2480	Н/Д	4400	28420	332450
Разница (%)	-45	-55	-81	Н/Д	-85	-29	-46
<b>Стационарные выбросы</b>							
ЕМЕР-2019	22032	61477	57140	25367	Н/Д	54920	220936
РПН	8400	36020	13738	1751	Н/Д	11271	71179
Разница (%)	+162	+70	+315	+1348	Н/Д	+387	+210
<b>Сумма</b>							
ЕМЕР-2019	158373	81527	57606	Н/Д	Н/Д	75002	398510
РПН	260260	81310	16218	Н/Д	Н/Д	39691	403629
Разница (%)	-39	+0	+255	Н/Д	Н/Д	+88	-1

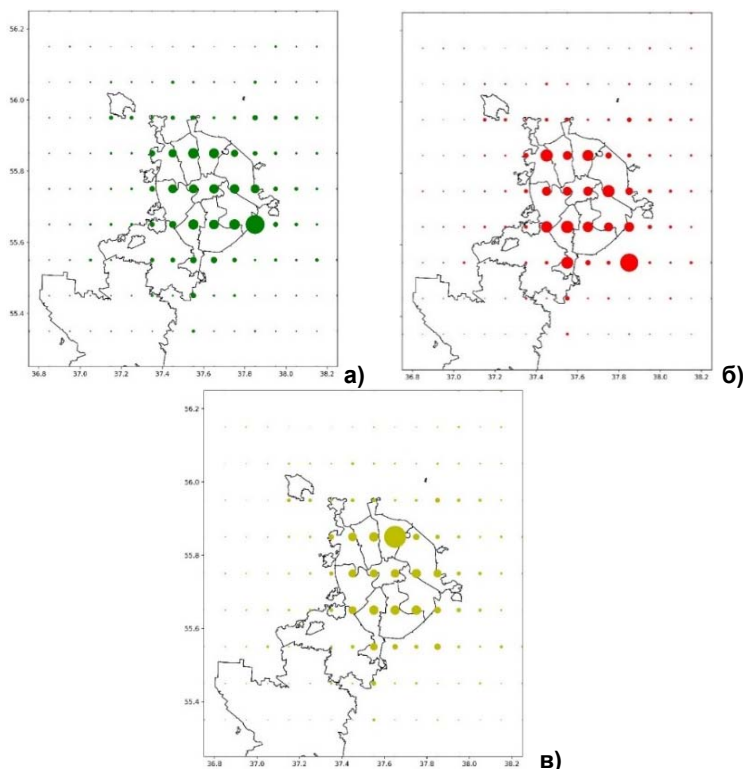
Как видно в табл. 3, количество суммарных выбросов всех загрязняющих веществ в ЕМЕР-2019 на 1 % меньше, чем по данным РПН. Обращает на себя внимание существенная разница вклада в суммарные эмиссии транспортных и стационарных источников: в ЕМЕР-2019 транспортных выбросов на 46 % меньше, чем по данным РПН, а выбросов стационарных источников на 210 % больше. Следует отметить наиболее существенные отличия выбросов отдельных загрязнителей: в ЕМЕР-2019 за счет эмиссий

стационарных источников больше, чем в РПН, суммарных выбросов  $SO_x$  – в 2,5 раза,  $PM$  – более чем в 13 раз, выбросов  $NMVOС$  – почти в 4 раза.

С помощью разработанного авторами алгоритма с использованием данных об эмиссиях ЕМЕР-2019 на сетке  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  проведен сравнительный анализ суммарных эмиссий стационарных источников по административным округам Москвы.

Во всех АО выявлено превышение суммарных эмиссий в ЕМЕР-2019 по сравнению с данными РПН, за исключением уменьшения их на 5 % в ЦАО. Особенно большие различия в данных РПН и ЕМЕР-2019 установлены на территории СВАО, где по данным ЕМЕР-2019 суммарных эмиссий от стационарных источников в 25 раз больше, чем по данным РПН.

Выявлено несколько ярко-выраженных нехарактерных максимумов в распределении объемов эмиссий на сетке  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  в ЕМЕР-2019. На рис. 5 видны нетипичные максимумы  $NO_x$  и  $NMVOС$  на юго-востоке от Москвы (рис. 5а, б) и сильно выраженный максимум эмиссий  $SO_x$  (рис. 5в) на территории СВАО.



**Рис. 5.** Пространственное распределение суммарных эмиссий по территории Москвы на сетке  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  в ЕМЕР-2019; а)  $NMVOС$ , б)  $NO_x$ , в)  $SO_x$ . Размер круга прямо пропорционален объему выброса в ячейке.

**Fig. 5.** Spatial distribution of total emissions over the territory of Moscow on a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  grid in EMEP-2019; а)  $NMVOС$ , б)  $NO_x$ , в)  $SO_x$ . The size of the circle is directly proportional to the emission value in the cell.

Установлено, что в ЕМЕР-2019 по сравнению с РПН суммарных эмиссий SOx на территории СВАО больше в 2032 раза, на территории СЗАО – в 1430 раз, на территории Новомосковского АО – в 181 раз, на территории Троицкого АО – в 287 раз.

### Заключение

Проведенный анализ временных и пространственных изменений эмиссий загрязняющих веществ (CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, NOx, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>coarse</sub>, SOx) в ЕМЕР-2013 и в кадастрах последних лет (ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020) является подготовительным этапом на пути обновления действующей в Гидрометцентре России технологии прогнозирования качества воздуха на базе ХТМ и усвоения актуализированных данных ЕМЕР.

Установлено, что на территории московского региона в ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 суммарный объем выбросов загрязняющих веществ уменьшен на 37 % и 40 %, в основном за счет снижения эмиссий PM. В последних кадастрах по сравнению с ЕМЕР-2013 также снижены эмиссии CO, NMVOC и NOx на 30–40 %, а эмиссии NH<sub>3</sub> увеличены на 18–25 %; объем эмиссий SOx практически не изменился.

Наиболее существенные изменения в отраслевых выбросах в последних версиях ЕМЕР относятся к эмиссиям автотранспорта и выбросам от сжигания в обрабатывающей промышленности; вклад в суммарный выброс транспорта увеличен почти в 2 раза – до 58 %, а эмиссий от сжигания в промышленности увеличен до 27 %.

Отдельное внимание было уделено сравнению эмиссий в 2020 г. с предшествующим 2019 г. Установлено небольшое уменьшение (на 1–6 %) суммарных эмиссий на территории московского региона в ЕМЕР-2020, что, по-видимому, отражает ограничительные мероприятия в период пандемии COVID-19.

Отмечено пространственное перераспределение эмиссий в последних версиях ЕМЕР: основной объем эмиссий распределен по модельным ячейкам, охватывающим большую часть Москвы, в кадастре ЕМЕР-2013 максимум эмиссий смещен на юго-запад.

Сравнительный анализ данных о выбросах приоритетных загрязнителей на территории Москвы кадастра ЕМЕР-2019 и данных Росприроднадзора за 2019 г. показал совпадение суммарных объемов эмиссий, при этом выявлены отличия в количестве выбросов отдельных загрязнителей и отраслевых нагрузок. В ЕМЕР-2019 выбросы автотранспорта по сравнению с данными РПН меньше, а эмиссии стационарных источников – больше. По данным РПН 75 % эмиссий всех загрязнителей стационарных источников на территории Москвы приходится на два источника: «Энергетика» (63 %) и «Производство кокса и нефтепродуктов» (12 %), по данным ЕМЕР-2019 63 % выбросов стационарных источников приходится на промышленное производство и только 16 % на энергетические объекты. На регулярной

сетке ЕМЕР-2019 ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) обнаружены локальные нехарактерные максимумы выбросов отдельных загрязнителей в северной и юго-восточной частях Москвы.

Выявленные особенности пространственного и количественного распределения эмиссий в кадастре ЕМЕР-2019, практически совпадающего с ЕМЕР-2020, являются предметом предстоящего анализа причин возникновения локальных максимумов и принятия решения о целесообразности их коррекции.

Разработанные на языке программирования Python алгоритмы сравнительного анализа данных кадастров ЕМЕР и данных государственной статистики настроены на автоматический вывод иллюстраций и исходных таблиц, приведенных в статье, из «сырых» исходных данных и достаточно универсальны для применения на актуализированных данных и для других территорий.

### Список литературы

1. Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю. Уточнение данных о землепользовании для расчетов эмиссий в химической транспортной модели CHIMERE на примере нижегородского региона // Труды Гидрометцентра России. 2021. № 3 (381) С. 150-161.

2. Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г., Алешина М.А., Захарова П.В., Лезина Е.А. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Том 495, № 1. С. 73-78. DOI 10.31857/S2686739720110067

3. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147-170. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-6-29>.

4. Кузнецова И.Н., Ривин Г.С., Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Кирсанов А.А., Нахаев М.И. Моделирование загрязнения приземного воздуха с характерными в период COVID-19 сокращениями эмиссий в атмосферу с использованием моделей CHIMERE и COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 25-35. DOI:10.52002/0130-2906-2022-3-25-35.

5. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 203-218.

6. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татаринович Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 27-53.

7. Статистическая отчетность Федеральной службы по надзору в сфере природопользования РФ, Информация об охране атмосферного воздуха. – Режим доступа: URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/>.

8. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Эффективность коррекции эмиссий для расчетов химической транспортной модели CHIMERE в московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 441-447.



9. Bessagnet B., Menut L., Lapere R. et al. High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps – Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountain Meteorology // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 565. DOI:10.3390/atmos11060565

10. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* 2013. Vol. 6. P. 981-1028. DOI: 10.5194/gmd-6-981-2013

11. Cholakian A., Bessagnet B., Menut L., Pennel R., Mailler S. Anthropogenic Emission Scenarios over Europe with the WRF-CHIMERE-v2020 Models: Impact of Duration and Intensity of Reductions on Surface Concentrations during the Winter of 2015 // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. P. 224.

12. Menut L., Bessagnet B., Briant R., Cholakian A., Couvidat F., Mailler S., Pennel R., Siour G., Tuccella P., Turquety S., Valari M. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model // *Geoscientific Model Development*. 2021. Vol. 14. P. 6781-6811.

13. EMEP Status Report 1/2022. Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report. 2022.

### References

1. Borisov D.V., Shalygina I.U. Refinement of land use data for emission calculations in the CHIMERE chemistry-transport model: A case study for the Nizhny Novgorod region. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 150-161 [in Russ.].

2. Ginzburg A.S., Semenov V.A., Aleshina M.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Impact of Covid-19 lockdown on air quality in Moscow. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 495, no. 1, pp. 862-866. DOI: 10.1134/S1028334X20110069.

3. Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Tkacheva Yu.V., Rivin G.S., Lezina E.A. Testing and prospects of air pollution prediction technology based on CHIMERE and COSMO-Ru2ART chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, pp. 147-170. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].

4. Kuznetsova I.N., Rivin G.S., Borisov D.V. Modeling Surface Air Pollution with Reduced Emissions during the COVID-19 Pandemic Using CHIMERE and COSMO-ART Chemical Transport Models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, pp. 174-182. DOI: 10.3103/S1068373922030025.

5. Kuznetsova I.N., Shalygina I.U., Nahaev M.I., Tkacheva U.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Air quality forecasting system based on chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, pp. 203-218. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].

6. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopyekin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 27-53 [in Russ.].

7. Statisticheskaya otchetnost' Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya RF, Informaciya ob ohrane atmosfernogo vozduha. Available at: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/>.

8. Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Borisov D.V., Lesina E.A. Emission correction efficiency for calculations in the CHIMERE chemical transport model in the Moscow region. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2020, vol. 33, no. 6, pp. 441-447. DOI: 10.15372/AOO20200604 [in Russ.].

9. Bessagnet B., Menut L., Lapere R. et al. High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps – Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountain Meteorology. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, pp. 565. DOI: 10.3390/atmos11060565

10. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modeling. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, pp. 981-1028. DOI: 10.5194/gmd-6-981-2013.

11. Cholakian A., Bessagnet B., Menut L., Pennel R., Mailler S. Anthropogenic Emission Scenarios over Europe with the WRF-CHIMERE-v2020 Models: Impact of Duration and Intensity of Reductions on Surface Concentrations during the Winter of 2015. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, 224 p.

12. Menut L., Bessagnet B., Briant R., Cholakian A., Couvidat F., Mailler S., Pennel R., Siour G., Tuccella P., Turquety S., Valari M. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport. *Geoscientific Model Development*, 2021, vol. 14, pp. 6781-6811.

13. EMEP Status Report 1/2022. Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report. 2022.

*Поступила 15.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;*

*принята в печать 13.06.2023.*

*Submitted 15.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;*

*accepted for publication 13.06.2023*