

УДК 504.3.054

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЫПАДЕНИЯ СЕРЫ И АЗОТА ИЗ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНАХ РОССИЙСКИХ И БЕЛОРУССКИХ СТАНЦИЙ ЕМЕП ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. А. Галушин¹⁾, С. А. Громов^{1,2)}

¹⁾ ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. ак. Ю. А. Израэля»,
ул. Глебовская, 20Б, 107258, г. Москва, Россия, galushin2012@yandex.ru

²⁾ ФГБУН «Институт географии Российской академии наук»,
пер. Старомонетный, 29, 119017, г. Москва, Россия, gromov@igras.ru

В статье проводится сравнительный анализ изменений выпадения серы и азота на территории России и Беларуси за длительный период времени по результатам моделирования в программе ЕМЕП. Исследуется динамика поступления основных загрязняющих веществ (окисленные сера и азот, восстановленный азот), массово содержащихся в антропогенных выбросах, в районах размещения станций мониторинга трансграничного атмосферного загрязнения.

Ключевые слова: окисленная сера; окисленный азот; моделирование; загрязнение окружающей среды; кислотные осадки, ЕМЕП.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF SULFUR AND NITROGEN ATMOSPHERIC DEPOSITION IN EMEP STATION AREAS OF RUSSIA AND BELARUS BASED ON MODELING DATA

D. A. Galushin¹⁾, S. A. Gromov^{1,2)}

¹⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya str., 20B, 107258,
Moscow, Russia, galushin2012@yandex.ru

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny line, 29,
119017, Moscow, Russia, gromov@igras.ru

The article provides a comparative analysis of changes in sulfur and nitrogen deposition in Russia and Belarus over a long period of time based on the results of modeling in the EMEP program. The dynamics of the intake of the main pollutants (oxidized sulfur and nitrogen, reduced nitrogen), massively contained in anthropogenic emissions, in the areas where monitoring stations for transboundary atmospheric pollution are located, is studied.

Keywords: sulfur oxides; nitrogen oxides; modeling results; environmental pollution; acid deposition; EMEP.

Распространение, в результате человеческой деятельности, антропогенного воздействия на окружающую среду, вследствие естественных геофизических и химических процессов в атмосфере и смежных с ней средах, является одной из ключевых проблем в экологии. Проявления интенсивного загрязнения атмосферы в начале XX в. являлись локальными. С развитием индустриализации, потреблением энергии и широким использованием транспорта в разных регионах мира, больше стало проявляться не только непосредственное воздействие выбросов загрязняющих воздух веществ, но и последствия их переноса и трансформации в атмосфере для экосистем, сельского хозяйства, поверхностных вод и др. Выпадение кислотных осадков — одна из таких проблем регионального масштаба. Как известно, в атмосфере есть соединения сульфатов и нитратов естественного происхождения в минимальных, фоновых количествах. Однако в 60–70 гг. прошлого века в ряде европейских стран, а также в США, резко возросли кислотность атмосферных осадков, концентрации в них сульфатов и нитратов, происхождение которых связано с антропогенными источниками. Продолжительное воздействие таких атмосферных выпадений приводило к закислению почв и водоемов, гибели лесных насаждений и другие неблагоприятные последствия [1, с. 5]. Именно в 60–70 гг. научное сообщество перешло к обсуждению создания специализированных сетей мониторинга за состоянием и загрязнением окружающей среды, поскольку до этого программы мониторинга атмосферы сводились к измерению метеопараметров (температура воздуха, количество осадков и т. д.). Регулярные наблюдения за выпадениями загрязняющих веществ с атмосферными осадками, а также мониторинг переноса загрязняющих веществ на дальние расстояния, не проводился до конца 70-х гг. [2, с. 11].

В результате международной деятельности Совместной программы мониторинга и оценки дальнего переноса загрязняющих веществ в Европе (ЕМЕП) в рамках Конвенции ЕЭК ООН о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (1979 г.) была сформирована система получения и анализа данных о переносе загрязняющих веществ и трансграничных потоков на дальнее расстояние. Одним из важных ее элементов является моделирование атмосферных переносов и расчеты выпадений веществ с использованием совместных данных о выбросах в атмосферу, результатов мониторинга загрязнения атмосферных осадков и воздуха, а также реальных метеорологических данных. В рамках программы ЕМЕП публикуются официальные результаты и отчеты, в которых включены оценки концентраций и выпадений основных загрязняющих веществ.

Один из основных центров — Метеорологический Синтезирующий Центр-Запад (МСЦ-3) ЕМЕП, проводит регулярное моделирование

трансграничных переносов подкисляющих веществ. Главными задачами его являются ежегодные оценки выпадений соединений серы и азота, в том числе, «страна на страну», а также уровни загрязнения атмосферы этими и некоторыми другими веществами [3, с. 93].

При хорошем соответствии результатов моделирования данным наблюдений существующих станций ЕМЕП, достигаемых при использовании последних для верификации модели, долгосрочное моделирование может решать вопросы о восполнении информации при отсутствии или нехватке станций в отдельных частях (или даже странах) региона ЕМЕП, дополнять пространственную неоднородностью сети [4, с. 5], а также восстанавливать динамику загрязнения для отдельных мест.

В данной работе были обработаны и проанализированы результаты моделирования для районов станций наблюдений ЕМЕП в России и Беларуси за многолетний период (с 2000 по 2021 гг.). В Российской Федерации действуют 4 станции ЕМЕП; на северо-западе Европейской части (ст. Янискоски, до 2022 г.; и Пинега), и в Центральном федеральном округе (ст. Лесной заповедник, Тверская область; ст. Данки, юг Московской области) [5, с. 64]. На территории Республики Беларусь функционируют 2 станции, работающие по программе ЕМЕП – ст. Высокое и ст. Березинский Заповедник.

Для проведения исследований из результатов моделирования были взяты следующие вещества и параметры: окисленная сера и азот (сухое выпадение, влажное выпадение, общее выпадение), восстановленный азот (сухое выпадение, влажное выпадение, общее выпадение). Значения из модельных расчетов для районов станций были выбраны для соответствующих ячеек сетки ЕМЕП размером в $0,1 \times 0,1$ гр. [3, с. 93].

Анализ результатов модельных расчетов за 2000-2021 гг. показывает снижение общего выпадения окисленной серы на российских и белорусских станциях ЕМЕП в целом на 70 % за 20-летний период (рис. 1). Выпадения окисленной влажной серы занимают первое место среди всех выпадений загрязняющих веществ по данным моделирования ЕМЕП. Максимальное выпадение окисленной серы по данным моделирования на 2000 г. характерны для станций Республики Беларусь и станций Центрального федерального округа (ЦФО) в России. От центральных районов России значения снижаются по направлению к северу. В соответствии с модельными расчетами, выпадения влажной окисленной серы на станции Пинега составляют 260 мг/м^2 , а на станции Янискоски — 180 мг/м^2 (рис. 1, 2).

К 2021 г. значение выпадения влажной окисленной серы для станций ЕМЕП, находящиеся на территории Белоруссии и Центра ЕЧР не превышали 180 мг/м^2 , а на севере России — не выше 100 мг/м^2 .

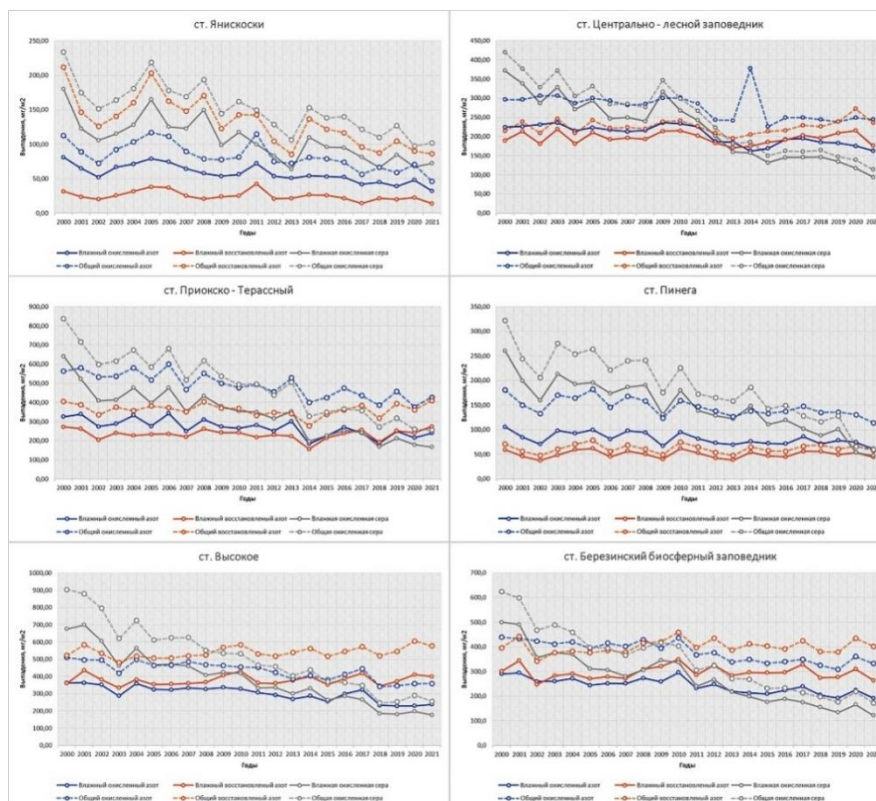


Рис. 1. Динамика выпадения загрязняющих веществ на станциях ЕМЕП с 2000 по 2021 гг. (по данным моделирования ЕМЕП)

Ст. Пинега	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)	Ст. Янискоки	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)
Влажные выпадения окисленного азота	105,65	60,89	-44,77	-42%	Влажные выпадения окисленного азота	81,17	32,16	-49,01	-60,38%
Влажные выпадения восстановленного азота	59,16	44,54	-14,62	-25%	Влажные выпадения восстановленного азота	31,61	14,02	-17,59	-55,66%
Влажные выпадения окисленной серы	260,07	47,40	-212,66	-82%	Влажные выпадения окисленной серы	180,04	72,25	-107,79	-59,87%
Сухие выпадения окисленного азота	74,67	52,91	-21,75	-29%	Сухие выпадения окисленного азота	53,8	29,4	-24,46	-45,43%
Сухие выпадения восстановленного азота	11,54	13,31	1,77	15%	Сухие выпадения восстановленного азота	7,0	4,2	-2,79	-40,03%
Сухие выпадения окисленной серы	62,11	12,46	-49,65	-80%	Сухие выпадения окисленной серы	38,0	28,9	-9,08	-23,93%
Общее выпадение окисленного азота	180,32	113,80	-66,52	-37%	Общее выпадение окисленного азота	112,78	46,17	-66,61	-59,06%
Общее выпадение восстановленного азота	70,70	57,85	-12,85	-18%	Общее выпадение восстановленного азота	211,65	86,27	-125,38	-59,24%
Общее выпадение окисленной серы	322,18	59,87	-262,31	-81%	Общее выпадение окисленной серы	233,89	101,63	-132,26	-56,55%
Ст. Приокско - Террасный заповедник	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)	Ст. Центрально - лесной заповедник	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)
Влажные выпадения окисленного азота	325,76	240,55	-85,20	-26%	Влажные выпадения окисленного азота	224,35	162,71	-61,64	-27%
Влажные выпадения восстановленного азота	272,52	274,21	1,70	1%	Влажные выпадения восстановленного азота	189,74	175,46	-14,28	-8%
Влажные выпадения окисленной серы	640,86	167,19	-473,67	-74%	Влажные выпадения окисленной серы	371,64	94,04	-277,60	-75%
Сухие выпадения окисленного азота	237,69	186,42	-51,27	-22%	Сухие выпадения окисленного азота	72,06	81,33	9,27	13%
Сухие выпадения восстановленного азота	132,01	135,06	3,05	2%	Сухие выпадения восстановленного азота	24,67	59,88	35,21	143%
Сухие выпадения окисленной серы	196,94	89,14	-107,80	-55%	Сухие выпадения окисленной серы	48,25	19,63	-28,62	-59%
Общее выпадение окисленного азота	563,45	426,98	-136,47	-24%	Общее выпадение окисленного азота	296,42	244,04	-52,37	-18%
Общее выпадение восстановленного азота	404,53	409,27	4,75	1%	Общее выпадение восстановленного азота	214,41	235,34	20,93	10%
Общее выпадение окисленной серы	837,80	256,33	-581,47	-69%	Общее выпадение окисленной серы	419,89	113,67	-306,22	-73%
Ст. Березинский БЗ	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)	Ст. Высокое	Выпадение в мг/м² в 2000	Выпадение в мг/м² в 2021	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг.	Изменение выпадения между 2000 и 2021 гг. (%)
Влажные выпадения окисленного азота	290,2	191,8	-98,39	-34%	Влажные выпадения окисленного азота	362,18	237,49	-124,69	-34%
Влажные выпадения восстановленного азота	300,5	263,9	-36,64	-12%	Влажные выпадения восстановленного азота	360,29	399,35	39,05	11%
Влажные выпадения окисленной серы	499,5	121,5	-377,97	-76%	Влажные выпадения окисленной серы	675,50	176,63	-498,87	-74%
Сухие выпадения окисленного азота	148,4	140,2	-8,26	-6%	Сухие выпадения окисленного азота	148,58	121,28	-27,30	-18%
Сухие выпадения восстановленного азота	95,1	138,1	43,03	45%	Сухие выпадения восстановленного азота	161,29	177,41	16,12	10%
Сухие выпадения окисленной серы	124,0	50,4	-73,62	-59%	Сухие выпадения окисленной серы	228,24	78,91	-149,33	-65%
Общее выпадение окисленного азота	438,6	332,0	-106,66	-24%	Общее выпадение окисленного азота	510,76	358,77	-151,99	-30%
Общее выпадение восстановленного азота	395,6	402,0	6,38	2%	Общее выпадение восстановленного азота	521,59	576,75	55,17	11%
Общее выпадение окисленной серы	623,5	171,9	-451,59	-72%	Общее выпадение окисленной серы	903,74	255,54	-648,19	-72%

Рис. 2. Изменение выпадения загрязняющих веществ на станциях ЕМЕП (в %) между 2000 и 2021 гг. (по данным моделирования ЕМЕП)

Результаты моделирования выпадения общего окисленного азота на станциях ЕМЕП в России и Белоруссии показали снижение выпадений с меньшей интенсивностью, чем снижение выпадения окисленной серы. Это снижение составило 30 %. В начале периода моделирования, в 2000 г., высокие значения выпадений были зафиксированы на станциях Березинский БЗ, Высокое и Данки, с значениями 438, 510 и 563 мг/м² соответственно. На станциях ЕМЕП Пинега и Янискоски выпадения варьировались в диапазоне от 112 до 180 мг/м². К 2021 г. уровень выпадений на станциях ЕМЕП в Беларуси не превысил 360 мг/м² (рис. 1, 2).

В центральных районах ЕЧР выпадения общего окисленного азота варьировались от 244 мг/м² на станции Лесной заповедник до 426 мг/м² на станции Данки. На севере ЕЧР выпадения снизились до 46 мг/м² в Янискоски и до 113 мг/м² на станции Пинега.

Результаты моделирования общего восстановленного азота демонстрируют увеличение выпадений на 1-10 % для территории Белоруссии и центрального района ЕЧР. Это может быть связано с влиянием трансграничного переноса загрязняющих веществ из других стран. С другой стороны, пункты ЕМЕП, расположенные на севере ЕЧР, характеризуются снижением выпадений — на 18 % для станции Пинега и на 59 % для станции Янискоски.

Очевидное снижение выпадения окисленной серы и азота на территории России и Белоруссии вследствие трансграничного переноса от зарубежных стран является результатом работы программы ЕМЕП, который является эффективным инструментом для мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды.

Исследование выполнено в рамках темы НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие транс-граничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)». Оценка данных моделирования сделана в работах по государственному заданию Института географии РАН FMWS-2024-0009 №1023032700199-9.

Библиографические ссылки

1. Кислотные дожди / Ю. А. Израэль [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 269 с.
2. Романов Е. М. Экология: экологический мониторинг лесных экосистем: учеб. пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. 236 с.
3. Смола В. И. Диоксид серы в атмосфере: состояние, проблемы и решения. Москва: Полиграфсервис, 2017. 513 с.
4. Transboundary particulate matter, photo – oxidants acidifying and eutrophying components MSC / H. Fagerli [et al.] // W. Status Report.2021. № 1. Norwegian Meteorological Institute.
5. Загрязнение воздуха и осадков по данным станций ЕМЕП / И. М. Брускина [и др.] // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2023. С.64–66.