

УДК 551.513.22
DOI 10.17513/use.38305

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В УСТЬЕВУЮ ОБЛАСТЬ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ (МОДЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

Котова Е.И., Лохов А.С., Коробов В.Б.

ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширишова Российской академии наук, Москва, e-mail: ecopp@yandex.ru

Целью исследования является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, поступающих как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса. Устьевые области больших рек арктических морей характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью характеристик природных условий. Это, в свою очередь, сказывается на неоднородности распределения загрязнения. В работе рассматриваются результаты применения траекторного подхода и метода статистики траекторий переноса воздушных масс для оценки и прогнозирования воздействия атмосферных эмиссий на окружающую среду, в том числе отдаленных территорий. Проведен анализ траекторий переноса воздушных масс и примесей в устьевую область Северной Двины. Расчет обратных траекторий движения воздушных масс проводился с использованием модели HYSPLIT4 и данных реанализа метеорологических элементов NCEP/NCAR. Установлено, что для всех примесей, для которых проводились расчеты – Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu и Ni, за месячный период имеет место весьма заметная пространственная изменчивость атмосферных потоков. При этом направления их наибольших градиентов не всегда совпадают и зависят от расположения источников эмиссии.

Ключевые слова: Северная Двина, устьевая область, метод статистики траекторий, тяжелые металлы, дальний перенос

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда «Атмосферный перенос как источник загрязнения экосистем западного сектора Российской Арктики» № 22-77-10074.

SPATIAL VARIABILITY OF HEAVY METAL INPUT THROUGH THE ATMOSPHERE TO THE NORTHERN DVINA ESTUARY (MODEL DATA)

Kotova E.I., Lokhov A.S., Korobov V.B.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: ecopp@yandex.ru

The purpose of this work is to analyze the spatial variability of heavy metal fluxes from the atmosphere in the Northern Dvina estuary from both local sources and long-range transport. The estuaries of large rivers of the Arctic seas are characterized by significant spatial and temporal variability in the characteristics of natural conditions. This in turn affects the heterogeneity of pollution distribution. The paper discusses the methodology and results of applying the trajectory approach and the method of air mass transport trajectory statistics to assess and forecast the impact of atmospheric emissions on the environment, including remote areas. The trajectories of air masses and impurities transport to the mouth area of the Northern Dvina River were analyzed. The reverse trajectories of air masses were calculated using the HYSPLIT4 model and NCEP/NCAR meteorological element reanalysis data. It was found that for all the admixtures for which the calculations were performed – Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu and Ni, there is a very noticeable spatial variability of the atmospheric fluxes during the monthly period. The directions of their largest gradients do not always coincide and depend on the location of emission sources.

Keywords: Northern Dvina, estuary area, trajectory statistic method, heavy metals, long-range transport

The study was carried out with funds from the Russian Science Foundation grant “Atmospheric transport as a source of pollution of ecosystems in the western sector of the Russian Arctic” No. 22-77-10074.

Введение

Устьевые области арктических рек – это уникальные экосистемы, характеризующиеся, с одной стороны, значительным разнообразием условия и ресурсов, являющиеся местом сосредоточения населения и промышленности. В то же время их расположение в условиях сурового климата является причиной уязвимости экосистем к антропогенному воздействию. Атмосфера – самая динамичная среда, что усложняет процесс оценки загрязнения атмосферного возду-

ха. В данном случае важным источником информации о загрязнении атмосферного воздуха и воздействии загрязнения на экосистемы являются модельные оценки поступления примесей.

Устьевые области больших рек арктических морей характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью характеристик природных условий. Это главным образом обусловлено неоднородным влиянием подстилающей поверхности – суша – море – острова, и сильными приливными течениями [1]. Наблюдения

на расположенных в этом районе трех гидрометеорологических станциях – в Архангельске, Северодвинске и острове Мудьюгский показывают, что различия в измеряемых характеристиках воздуха и воды весьма существенны. Особенно это касается ветра и скорости течений, которые, в свою очередь, оказывают влияние на характер циркуляции. Неоднородность воздушных потоков оказывает влияние и на экологическую ситуацию, которая хотя и не является острой [1], тем не менее во многом зависит от природных условий.

Принимая во внимание наличие многочисленных источников загрязнения атмосферы и влияние дальнего переноса поллютантов от удаленных загрязнителей атмосферы, следует ожидать, что пространственная изменчивость будет характерна и для содержащихся в воздухе загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы, оказывающих существенное влияние на состояние экосистем. Численный эксперимент, выполненный авторами ранее для отдельных участков дельты Северной Двины, показал, что пространственная изменчивость количества атмосферных выпадений, обусловленных дальним переносом, имеет место и есть необходимость в продолжении этих исследований [2].

Тяжелые металлы являются одними из самых распространенных загрязняющих веществ атмосферного воздуха в устьевой области Северной Двины [3]. Оседая на земную и водную поверхность, они накапливаются в почвах, воде, донных отложениях и в тканях моллюсков [4, 5]. При этом, как показали эти и другие исследования, концентрации тяжелых металлов на некоторых участках превышают фоновые значения. Данное обстоятельство делает целесообразным выделение исследований распространения тяжелых металлов в устьевой области Северной Двины в самостоятельное направление.

Целью настоящей работы является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, концентрации которых формируются как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса. Для этого были рассчитаны модельные концентрации примесей в приземном слое воздуха и потоки примесей для разных участков дельты Северной Двины.

В полной постановке данная задача требует решения сопряженных уравнений переноса и турбулентной диффузии газа

[6], а в районах, в которых значительная часть территории приходится на водную поверхность, необходимо также учитывать и ее влияние на атмосферные процессы [7]. Трудности моделирования усугубляются, как констатировал еще полвека назад нобелевский лауреат С.П. Капица, тем, что нет достаточно полного описания турбулентных процессов [8]. С тех пор в понимании движения турбулентных потоков жидкости и газа фундаментальная наука не сильно продвинулась вперед, и все расчеты по-прежнему строятся на теории подобия, что самым непосредственным образом сказывается на их точности.

На качество моделей оказывают влияние местные явления, такие как бризы и термические циклоны, вносящие локальные возмущения в гидрометеорологические поля, и малое количество пунктов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха и водных объектов. Эти обстоятельства в настоящее время являются практически непреодолимыми для разработки универсальных моделей [9].

Поэтому сейчас, несмотря на колоссальный рост вычислительных мощностей, в моделировании преобладает подход, в основе которого лежит упрощение самих моделей путем снижения числа их параметров [10]. Но это не означает отказа от усложнения моделей путем введения дополнительных характеристик, а то и целых блоков, особенно при прогнозировании загрязнения атмосферы при наличии множества источников загрязнения, что превращает процесс моделирования в набор технологических процедур [11, 12]. Такой подход представляется авторам наиболее перспективным.

Целью исследования является анализ пространственной изменчивости потоков тяжелых металлов из атмосферы в устьевой части Северной Двины, поступающих как от местных источников, так и вследствие дальнего переноса.

Материалы и методы исследования

В основе проведенного исследования лежит пространственный анализ траекторий переноса воздушных масс и примесей к произвольному географическому пункту [13]. Для расчета обратных траекторий используется модель HYSPLIT4 и данные реанализа метеорологических элементов NCEP/NCAR (<https://www.arl.noaa.gov/>). Одновременно с расчетом траектории движения воздушных масс рассчитываются данные о количестве осадков и высоте слоя перемешивания.

вания. Данная методология для подобного рода исследований прошла неоднократную апробацию и успешно применяется в северных и арктических регионах [14].

Итоговый расчетный файл представлен массивом точек в пространстве системы координат, данных о количестве осадков и высоте слоя перемешивания. Учитывая эмиссии металлов в городах и регионах России согласно Ежегоднику выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов РФ, рассчитываются концентрации примеси в воздухе:

$$C_{ij} = (1 - \alpha) \cdot Q_{ij} \cdot Z_{ij},$$

где α – доля примеси, оседающая на поверхность вблизи источника (0,1–0,2 см); Q_{ij} – объем выбросов; Z_{ij} – функция потенциальных источников, характеризующая все атмосферные процессы, влияющие на перенос загрязнителя от ячейки (i, j) к исследуемому объекту.

С учетом полученных значений концентраций в воздухе значения пересчитывались затем в потоки примесей на поверхность:

$$D = C \cdot K \cdot T,$$

где C – концентрация примеси в приземном воздухе; K – скорость осаждения примеси из атмосферы на поверхность; T – длительность периода, для которого вычисляется плотность потока.

Скорости осаждения примеси K , см/с, меняются в зависимости от сезона и территории, для которой проводятся расчеты [15].

Расчет велся для 9 точек, выбранных с учетом географических особенностей местности, на суше в дельтовой части и частично на устьевом взморье реки (рис. 1). С другой стороны, для целей интерполяции точки выбирались таким образом, чтобы расстояния между любыми двумя соседними из них были как можно ближе друг к другу.

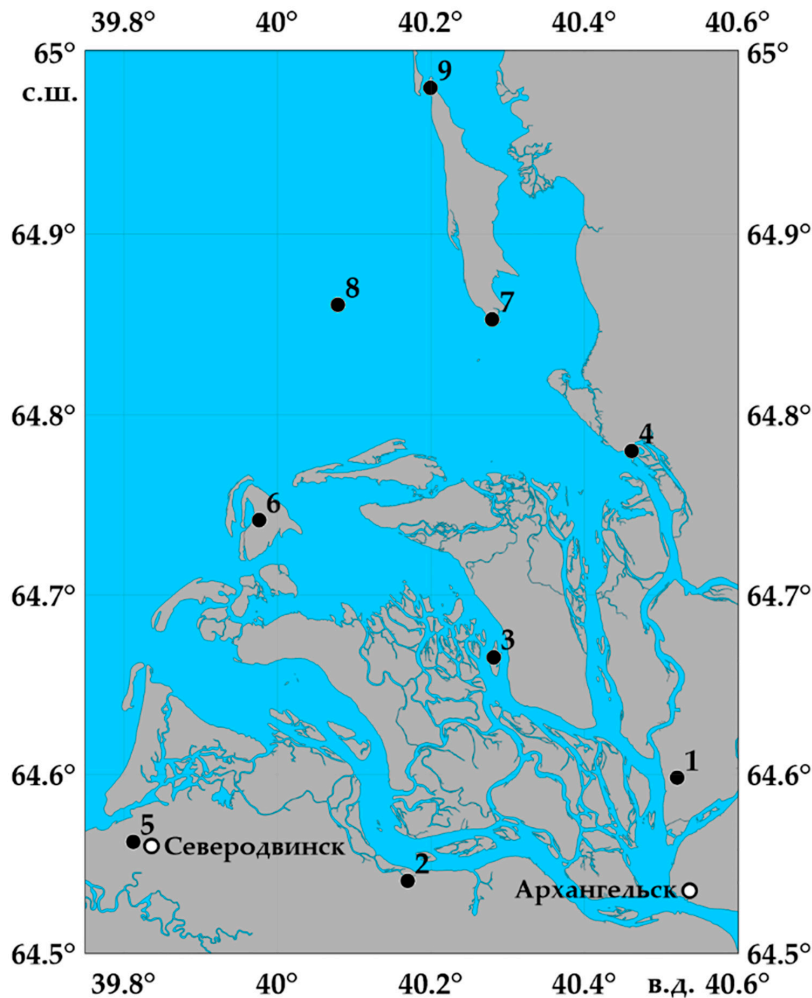


Рис. 1. Карта-схема точек, использованных для моделирования

Таблица 1

Модельные потоки примесей из атмосферы на подстилающую поверхность

	Pb	As	Ni	Cr	Cu	Cd	Zn
	мкг/м ² /месяц					нг/м ² /месяц	
Точка 1	0,24	0,12	0,55	16,28	39,06	0,02	0,00
Точка 2	0,36	0,18	2,39	16,33	51,51	0,12	0,00
Точка 3	0,27	0,14	1,38	13,73	39,99	0,07	0,00
Точка 4	0,25	0,12	0,33	10,81	34,99	0,01	0,00
Точка 5	0,26	0,13	0,51	8,93	34,72	0,02	0,00
Точка 6	0,53	0,27	0,60	8,10	62,05	0,02	0,00
Точка 7	0,32	0,16	0,97	5,90	38,22	0,04	0,00
Точка 8	0,36	0,19	3,19	5,26	43,00	0,16	0,00
Точка 9	0,34	0,18	1,70	1,57	37,67	0,08	0,00

Расчеты выполнены для июля 2019 г. ежечасно с 00 часов 01.07.2019 до 23.00 30.07.2019. Июль был выбран как репрезентативный месяц для летнего сезона. Дискретность в 1 час позволит учесть суточные изменения процессов, происходящих в прибрежной зоне. В результате получены величины потоков элементов из атмосферы на 1 м² поверхности за 1 месяц для 7 элементов: Zn, Cr, As, Pb, Cd, Cu и Ni (табл. 1).

Построение интерполяционных поверхностей выполнено методом Кригинга на основе информации о атмосферных потоках металлов в 9 точках. Для оценки пространственных градиентов потока элементов на интерполяционной поверхности для каждого элемента были выбраны точки максимума и минимума, определяющие вектор максимального градиента. Так как его величина зависит от дискретности сетки, расчет производился путем усреднения изменчивости за весь промежуток вектора, исключая небольшие локальные изменения и пересчета на 1 км расстояния в процентах от суммарной разности потоков элементов на краях вектора. Такой расчет позволяет соотнести величину градиентов для различных элементов, потоки которых могут отличаться на десять порядков.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным модельных расчетов атмосферных потоков примесей на поверхность дельты Северной Двины влияние стационарных источников *цинка* на загрязнение воздуха рассматриваемого региона за расчетный период отсутствовало (табл. 1). Связано это в первую очередь с тем, что источники, по которым имеется информа-

ция о количестве выбросов, расположены южнее 61° с.ш. и восточнее 76° в.д., а за рассматриваемый период воздушные массы с указанных территорий не поступали.

Поступление *кадмия* вследствие атмосферного переноса от промышленных источников практически на порядок ниже, чем других веществ. Это связано с тем, что воздействие оказывают лишь предприятия Кольского полуострова, а объемы выбросов невелики. В то же время наибольшее воздействие приходится на акватории (т. 8 на рис. 1).

Максимальное содержание *мышьяка* в атмосферном воздухе получено для территории о. Кумбыш. Источником данной примеси являются предприятия Мончегорска, которые оказывают воздействие на всю рассматриваемую территорию. Помимо этого источника в отдельных точках (т. 9, 2, 8, 3 на рис. 1), отмечено воздействие выбросов других предприятий Кольского полуострова.

Наибольшие расчетные значения из всех рассматриваемых примесей получены для *меди*. Атмосферные потоки меди, поступающей от антропогенных источников на данную территорию, составили 34,7–62,1 мкг/м² за месяц. Источниками меди являются предприятия Кольского полуострова, а также г. Архангельска. Максимальные потоки меди определены на о. Кумбыш (т. 6 на рис. 1) и в районе пос. Рикасиха (т. 2 на рис. 1).

Потоки из атмосферы *никеля* выше на акватории (т. 8 на рис. 1), вследствие дальнего переноса выбросов в атмосферу от г. Мончегорска.

Как и следовало ожидать, поля атмосферных потоков всех тяжелых металлов оказались неоднородными. На рис. 2 при-

ведены их интерполяционные поверхности, точки в которых был произведен расчет потоков и вектор максимального градиента для всех рассматриваемых в работе элементов, кроме As. Его распределение практически идентично Pb. При этом характер распределения металлов по поверхности, включая акватории реки и моря, оказался различным.

Для определения величины изменчивости потоков из атмосферы на поверхность были рассчитаны векторы наибольших градиентов этой величины (табл. 2). Это позволяет судить о характерных на-

правлениях переноса примесей и величине изменчивости их потока относительно расстояния.

Наибольшие средние их градиенты ($\text{мкг/м}^2/\text{месяц/км}$) отмечаются у Cu и Cr – 0,2967 и 0,1239 соответственно, наименьшие – у Zn и Cd: соответственно $2,63\text{E-}08$ и $1,72\text{E-}06$, то есть самые большие градиенты у элементов, концентрации которых наибольшие, а самые меньшие – у тех, концентрации которых самые малые. Промежточную, и достаточно компактную, группу составляют As, Pb и Ni, значения которых на 1–2 порядка меньше наибольших.

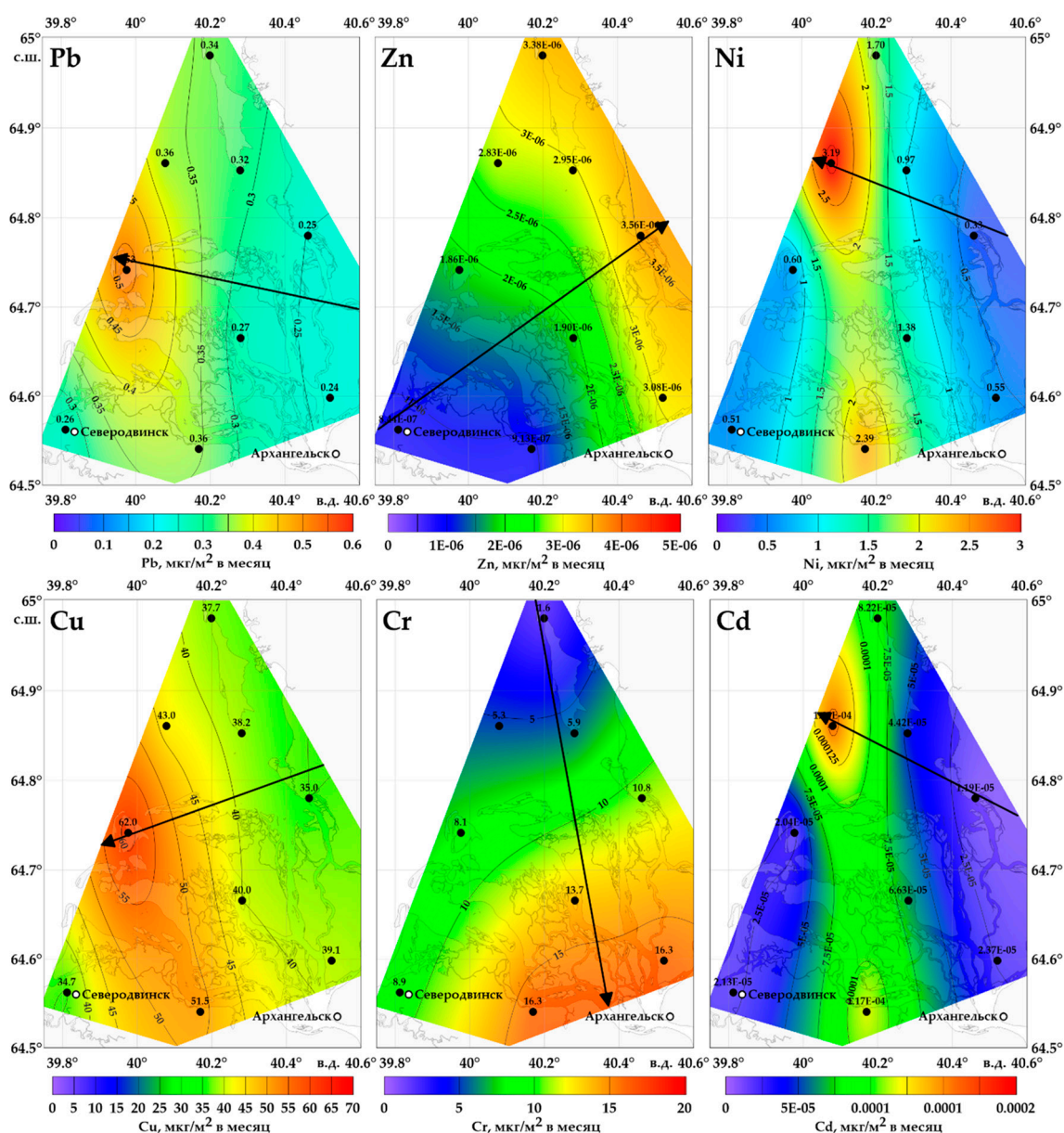


Рис. 2. Потоки веществ в устьевую область реки Северная Двина для различных элементов, стрелкой обозначены векторы максимальных градиентов

Таблица 2

Характеристики максимальных градиентов концентрации тяжелых металлов
в устьевой области реки Северная Двина

Элемент	Направление вектора увеличения концентрации элемента		Значение на начало вектора	Значение на конец вектора	Средний градиент по вектору на 1 км	
	°	румб			мкг/м ² /месяц	мкг/м ² /месяц
Zn	55	с юго-запада на северо-восток	8,67E-07	3,64E-06	2,63E-08	0,95
Cr	170	с севера на юг	1,561	16,433	0,1239	0,83
As	285	с востока на запад	0,118	0,247	0,0017	1,32
Pb	287	с востока на запад	0,241	0,478	0,0031	1,31
Cd	296	с юго-востока на северо-запад	1,16E-05	1,30E-04	1,72E-06	1,45
Cu	251	с востока на запад	34,877	55,536	0,2967	1,44
Ni	292	с востока на запад	0,313	2,605	0,0376	1,64

Однако направления градиентов для различных элементов не совпадают: для As, Pb, Cu и Ni концентрации снижаются с запада на восток, для Zn – с северо-востока на юго-запад, для Cr – с юга на север и для Cd – с северо-запада на юго-восток. Такое расхождение объясняется расположением источников данных элементов.

Заключение

Распределение концентраций всех тяжелых металлов в приземном слое атмосферы над устьевой областью Северной Двины характеризуется заметной пространственной изменчивостью, следствием чего является их неравномерное осаждение на водную и земную поверхность. Направления максимальных градиентов потоков не совпадают: оси ориентированы относительно различных румбов: для As, Pb, Cu и Ni ось имеет направление восток – запад, для Zn юго-запад – северо-восток, для Cr север – юг и для Cd юго-восток – северо-запад. Характер распространения обусловлен в первую очередь расположением источника примеси. Циркуляция атмосферы и характер осаждения примесей влияют в большей степени на количественные характеристики атмосферных потоков.

Отсюда следует вывод, что существующая система отбора проб в воздухе, воде и почве в устьевой области Северной Двины на содержание тяжелых металлов нуждается по меньшей мере в корректировке.

Результаты проведенного исследования могут представлять интерес для специалистов в области изучения геохимии устьевой области Северной Двины. Результаты

исследования следует учитывать при выборе точек мониторинга загрязнения окружающей среды рассматриваемого района.

Список литературы

- Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129. DOI: 10.17513/use.37402.
- Котова Е.И., Коробов В.Б. Исследование пространственной неоднородности дальнего переноса в юго-западной части Двинского залива Белого моря // LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования. Материалы Международной научно-практической конференции. СПб., 2023. С. 138–143.
- Обзор загрязнения окружающей среды на территории деятельности Северного УГМС за 2015 год. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/monitoring/reviews> (дата обращения: 04.06.2024).
- Зимовец А.А., Федоров Ю.А. Тяжелые металлы в почвах устьевой области реки Северная Двина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2013. № 5. С. 70–74.
- Неверова Н.В., Чупаков А.В. Оценка загрязнения устьевой области реки Северной Двины методом расчета фоновых концентраций (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni) // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 4. С. 51–67. DOI: 10.21072/mbj.2021.06.4.05.
- Хаширова Т.Ю., Акбашева Г.А., Шакова О.А., Акбашева Е.А. Моделирование загрязненности атмосферного воздуха // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2017. № 8. С. 325–330.
- Гавриков А.В., Гулев С.К. Высокоразрешающее климатическое моделирование атмосферы над Северной Атлантикой для исследования атмосферы и океана // Океанология. 2020. Т. 60, № 6. С. 831–834. DOI: 10.31857/S0030157420060052.
- Капица П.Л. Энергия и физика // Вестник АН СССР. 1976. № 1. С. 34–43.
- Крупнова Т.Г., Буланова А.В., Макаровских Т.А., Геренштейн А.В. Моделирование загрязнения воздуха в городской среде: критический обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 27–33. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-027-033.

10. Генихович Е.Л., Грачева И.Г., Ионин В.А., Оникул Р.И., Румянцева Д.Ю., Филатова Е.Н., Яковлева Е.А. Моделирование характеристик загрязнения воздуха атмосферными аэрозолями для практических приложений // Труды ГГО. 2012. № 565. С. 49–78.
11. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологического прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERT и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147–170.
12. Ткачева Ю.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 161–177. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-3-161-177.
13. Vinogradova A.A. Distant evaluation of the influence of air pollution on remote areas // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. Vol. 51. P. 712–722. DOI: 10.1134/S0001433815070099.
14. Виноградова А.А., Котова Е.И. Вклады источников Европы в загрязнение свинцом и кадмием северных районов Европейской России // Живые и биокосные системы. 2018. № 23. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-23/article-2DOI:10.18522/2308-9709-2018-23-2> (дата обращения: 15.06.2024).
15. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 5–20.