

## Оценка привноса поллютантов с атмосферными осадками на акватории и водосборные территории залива Петра Великого

Н.Н. Бортин<sup>1</sup> ✉, Д.Н. Василевский<sup>1</sup>, Л.Н. Василевская<sup>2</sup> , И.А. Лисина<sup>2</sup> 

✉ nbortin@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, г. Владивосток, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В последние годы прогрессирующее загрязнение вод прибрежных морских акваторий в совокупности с глобальным потеплением климата оказывает негативное воздействие на морские экосистемы. Считается, что основными источниками загрязнения вод являются локальные бытовые, промышленные сточные воды и нефтепродукты. Однако имеются и другие мощные внешние источники загрязнения – это атмосферный и материковый сток, которые формируются в виде выпадения поллютантов с атмосферными осадками на морские акватории и их водосборные территории. **Методы.** Использованы материалы международной станции сети EANET «Приморская» по привносу поллютантов с атмосферными осадками и данные наблюдений за атмосферными осадками в пунктах Росгидромета, расположенных на водосборной территории залива Петра Великого за 2008–2020 гг. **Результаты.** Определена ежегодная масса поступления растворенных веществ на морские акватории и водосборные территории рек бассейна залива Петра Великого. Показано, что содержание основных ионов в атмосферных осадках за рассматриваемый период увеличилось на 40 % и лишь в 2019 и 2020 гг. (по причине локдауна) отмечено некоторое снижение в динамике привноса содержания сульфатов и суммарного азота в трансграничном переносе с сопредельных территорий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** кислотность атмосферных осадков, сеть EANET, поллютанты, водосборная территория, акватория залива Петра Великого.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка научно обоснованных показателей допустимых воздействий на водные объекты прибрежных морских акваторий залива Петра Великого (Приморский край) и рекомендаций по снижению негативного антропогенного воздействия» по разделу «Научно-аналитическое обеспечение деятельности территориальных органов Росводресурсов».

**Для цитирования:** Бортин Н.Н., Василевский Д. Н., Василевская Л.Н., Лисина И.А. Оценка привноса поллютантов с атмосферными осадками на акватории и водосборные территории залива Петра Великого // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 17-35. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_3\_2.

Дата поступления 18.04.2023.

## EVALUATION OF THE DYNAMICS OF POLLUTANT FALLOUT WITH ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON THE WATERSHED AREAS AND WATER AREAS OF PETER THE GREAT BAY

Nikolay N. Bortin<sup>1</sup> , Denis N. Vasilevsky<sup>1</sup>, Lyubov N. Vasilevskaya<sup>2</sup> ,  
Irina A. Lisina<sup>2</sup> 

 nbortin@mail.ru

<sup>1</sup> Far Eastern Branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia;

<sup>2</sup> FGAOU VO "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russia

### ABSTRACT

**Relevance.** In recent years, significant concern has been caused by the progressive pollution of the waters of coastal marine areas, which, superimposed on global warming, has a negative impact on marine ecosystems. It is believed that the main sources of water pollution are local domestic, industrial wastewater and oil products. However, there are other, powerful external sources of pollution: this is an atmospheric and continental runoff, which is formed in the form of direct fallout of pollutants with precipitation in the water area and their catchment areas. **Methods.** We have used the materials of the international station of the EANET network "Primorskaya" on the input of pollutants with atmospheric precipitation and the materials of the observation points for atmospheric precipitation of Roshydromet located in the drainage area of Peter the Great Bay for 2008-2020. **Results.** It is shown that the content of the main ions in precipitation over the period under review increased by 40%, and only in some (2019 and 2020) years, due to the lockdown, as a result of transboundary transport from adjacent territories, there was a slight decrease in the dynamics of the input of sulfate content and total nitrogen.

**Keywords:** precipitation acidity, EANET network, pollutants, catchment areas, water area of Peter the Great Bay.

**Financing:** The work was carried out within the framework of the state task "Development of scientifically based indicators of permissible impacts on water bodies of coastal marine areas of the Peter the Great Bay (Primorsky Territory) and recommendations for reducing the negative anthropogenic impact" under the section "Scientific and analytical support for the activities of the territorial bodies of the Federal Water Resources Agency".

**For citation:** Bortin N.N., Vasilevsky D.N., Vasilevskaya L.N., Lisina I.A. Evaluation of pollutants with atmospheric precipitation in water areas and catchment areas of Peter the Great Bay. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 17-35. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_3\_2.

Received 18.04.2023.

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие промышленности, грузоперевозок и увеличение количества автотранспорта приводят к усилению эмиссий химических компонентов в атмосферу. В загрязнение атмосферного воздуха вносит свой вклад и трансграничный перенос загрязнителей. В свою очередь, загрязнение воздушного бассейна угрожает экосистемам водосборных территорий и акваторий, а также окружающим их природным комплексам [1–3].

Целью настоящего исследования является оценка динамики загрязнения химическими соединениями, выпадающими с атмосферными осадками, водосборных территорий и морских акваторий залива Петра Великого (северо-западная часть Японского моря).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с поставленной выше целью, в рамках проведенной работы решались следующие задачи: создание базы данных средневзвешенных за год концентраций ионов в осадках и сумм атмосферных осадков на юге Приморского края; расчет выпадений растворенных химических соединений с атмосферными осадками на территорию водосборной площади и морские акватории залива Петра Великого.

Исходными данными являются годовые суммы атмосферных осадков на метеостанциях «Владивосток», «Посьет», «Тимирязевский», «Партизанск», «Преображение» и средневзвешенные за год концентрации ионов в осадках на станции фонового мониторинга Приморской (EANET) за 2008–2020 гг., представленные в ежегодных «Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды<sup>1,2</sup>.

В атмосферных осадках преобладают те же ионы, что и в поверхностных водах:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ . Они поступают в осадки за счет растворения газов воздуха, приноса ветром солей с моря, растворения солей и пыли континентального происхождения, вулканических эффузий и других источников [4].

Станция «Приморская», на которой проводится определение химического состава суточных проб атмосферных осадков по международной программе кислотных выпадений EANET (Acid Deposition Network in East Asia), расположена в южной части Приморского края, в с. Каменушка Уссурийского района. С 2001 г. на станции проводятся наблюдения за загрязнением окружающей среды в рамках международной программы, предусматривающей создание сети мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии. Основная задача работы сети заключается в сборе и анализе химического состава атмосферных осадков и так называемых сухих выпадений (пыли, аэрозолей). Международная сеть EANET представлена 52 станциями в 13 странах Восточной Азии. Данные сети ежегодно публикуются в отчетах (<http://www.eanet.cc/product.html>). Результаты анализов систематически тестируются как в лаборатории, так и в центре EANET. Сводные результаты тестирования данных сети EANET публикуются в Report of the Inter-Laboratory. Зарубежные инспекции практически ежегодно посещают станцию «Приморская», высоко оценивая ее работу<sup>3</sup>.

Залив Петра Великого – самый большой залив Японского моря, его берега протянулись от устья р. Туманной на западе до мыса Поворотный – на востоке (рис. 1). Протяженность береговой линии залива, включая острова, около 1700 км, его ширина почти 200 км, площадь 55 600 км<sup>2</sup>. Самый крупный полу-

<sup>1</sup> Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. <http://www.meteo.ru>.

<sup>2</sup> Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008–2020 гг. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М. 2009, 2010... 2021. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhizliwkn3676851042>.

<sup>3</sup> Гидрологическая станция 1 разряда «Приморская» (Примгидромет, 2019). Режим доступа: [www.primgidromet.ru](http://www.primgidromet.ru).



**Рис. 1.** Залив Петра Великого, его водосборный бассейн с гидрографической сетью и пунктами наблюдений за атмосферными осадками.

Fig. 1. The Peter the Great Bay, its catchment with the hydrographic network and atmospheric precipitation observation points.

остров – Муравьева-Амурского – делит акваторию залива Петра Великого на две большие части – Амурский и Уссурийский заливы. Водосборный бассейн залива включает бассейны крупных рек Партизанская, Раздольная, Артемовка и ряда более мелких рек, протекающих по территории административных зон юга Приморского края (Хасанский и Шкотовский районы, Артемовский и Владивостокский городские округа). Устьевые части многих рек в недавнем геологическом прошлом были затоплены морем, в результате чего здесь образовалось несколько заливов второго порядка – Амурский, Уссурийский, Восток, Находка и залив Посыета [5]. На водосборной территории залива Петра Великого проживает большая часть населения Приморского края, здесь расположены города Владивосток, Уссурийск, Артём, Большой Камень, Фокино, Находка, источниками водоснабжения которых (кроме г. Находки) являются шесть водохранилищ многолетнего регулирования и два открытых русловых водозабора (рис. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение водосборного бассейна и акватории залива Петра Великого, вызванное загрязнителями в атмосферных осадках, в данной статье рассматривается в масштабе годового разрешения, т. е. привлекаются годовые суммы

осадков и среднегодовые концентрации загрязняющих веществ. Следует отметить, что осадки, выпадающие на юге Приморского края, в подавляющем большинстве имеют адвективный характер, связаны с циклонической деятельностью, определяемой циркуляцией атмосферы и сложным рельефом исследуемой территории [6, 7].

Приморье относится к зоне достаточного увлажнения: в среднем за год в большинстве районов края выпадает 650–750 мм осадков, в западных районах – 550–600 мм, в горной северной части (Пожарский район) и местами на побережье, включая Владивосток, до 800–900 мм [8]. По данным Гидрометцентра России, за последний базовый период (1991–2020 гг.) на исследуемой территории в среднем выпадало около 800–850 мм за год<sup>4</sup>.

**Атмосферное загрязнение.** Загрязняющие вещества, попадающие в результате трансграничного переноса из сопредельных территорий, накладываясь на локальные выбросы, во многом определяют химический состав атмосферных осадков. Химический состав атмосферных осадков является интегральной характеристикой содержания загрязняющих веществ в облачном и подоблачном слое атмосферы [9]. Приморский край на западе и юго-западе граничит с КНР, стремительное экономическое развитие Китая крайне неблагоприятно отразилось на экологии промышленно развитых районов этой страны и сопредельных государств. Эмиссия загрязняющих веществ отражает плотность распределения населения и промышленных предприятий. Государствами с экономикой постиндустриального типа также являются Япония и Южная Корея, которые, хоть и в меньшей степени, также являются центрами эмиссии загрязняющих веществ [1]. Эмиссия загрязняющих веществ с территории Дальнего Востока не идет ни в какое сравнение с выбросами в атмосферу в сопредельных странах.

Локальными источниками загрязнения атмосферы на юге Приморского края, наряду с небольшими промышленными предприятиями топливно-энергетического комплекса, угольными и нефтеналивными терминалами, являются выбросы огромного количества автомобильного и морского транспорта. Так, крупная городская агломерация Владивосток входит в число самых автомобильизированных городов России<sup>5</sup>.

Поскольку большая часть загрязняющих веществ может находиться в атмосфере несколько суток, выпадающие с фронтальными осадками на исследуемую территорию поллютанты привносятся воздушными массами из сопредельной индустриальной территории в зависимости от синоптической ситуации. Облачность же, относящаяся к местной, практически не формируется над водосборным бассейном залива Петра Великого. Подтверждением этого являются результаты анализа 739 циклонов (за 1997–2009 гг.), вызвавших осадки над Приморским краем [6].

<sup>4</sup> Сайт ГМЦ РФ: <https://meteoinfo.ru/climatcities> (дата обращения 20.04.2022).

<sup>5</sup> Росприроднадзор: самый грязный воздух – в Приморье. Аргументы и факты. URL: [https://vl.aif.ru/society/rosprirodnadzor\\_samyu\\_gryaznyu\\_vozduh\\_v\\_primore?](https://vl.aif.ru/society/rosprirodnadzor_samyu_gryaznyu_vozduh_v_primore?) (дата обращения 20.02.2022).

Основными по объему выбросов загрязняющих веществ являются окислы серы и азота, которые в результате фотохимических реакций преобразуются в сульфаты и нитраты (одна из причин выпадения кислотных осадков)<sup>6</sup>. Повышение кислотности осадков происходит как в результате увеличения объемов выбросов окислов серы и азота, так и вследствие роста интенсивности переноса воздушных масс из районов с высокими уровнями эмиссии [10]. Исследованиями дальневосточных ученых установлена тенденция значительного уменьшения числа циклонов, приходящих с северо-западных направлений, и усиление переноса – с юго-западных. Формирование этих циклонов происходит в зонах с высокими уровнями эмиссии окислов серы и азота, поэтому усиление активности циклогенеза юго-западных направлений вызвало увеличение концентраций сульфатов и нитратов в атмосферных осадках [6].

**Оценка химического состава атмосферных осадков.** На азиатской территории России в рамках международной сети EANET с 2000 г. постоянно работают четыре станции мониторинга: три в регионе оз. Байкал – Иркутск (городская), Листвянка (региональная) и Монды (фоновая); одна в Приморском крае – Приморская (региональная). В настоящее время только станции EANET предоставляют результаты регулярного мониторинга содержания загрязняющих веществ в атмосфере вне городов на азиатской территории России. Уникальность данных, полученных на станциях EANET, состоит в том, что значение pH и химический состав атмосферных осадков определяются за каждые сутки в отличие от национальной сети мониторинга, которая не позволяет проследить кислотно-щелочной показатель ежесуточных осадков, т. к. согласно принятой в гидрометеослужбе методике анализируются осадки за месяц<sup>7</sup>.

Средневзвешенные за год концентрации ионов в осадках на станции регионального мониторинга «Приморская» определены по общепринятой и используемой при обработке данных EANET методике. В табл. 1 представлены эти концентрации за 2008–2020 гг., взятые из ежегодных обзоров состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, составленных Росгидрометом.

Из данных табл. 1 следует, что на юге Приморья сульфаты (соли серной кислоты) преобладают над нитратами (соли азотной кислоты). Это превышение в среднем составляет 2,5. Однако в отдельные периоды (2008 и 2014 гг.) оно составляло 5 и 6 единиц соответственно, и лишь в 2011 г. нитратов в осадках содержалось в 1,5 раза больше, чем сульфатов. В межгодовом ходе концентрации ионов в атмосферных осадках обнаруживается положительная динамика: сульфаты увеличились с 3 до 3,75 мг/л (на 25 %), нитраты – с 1,3 до 2 мг/л (на 54 %).

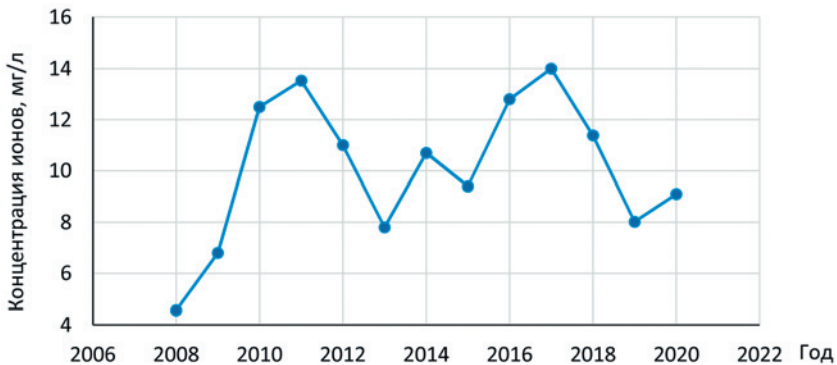
<sup>6</sup> Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 2005 г. Ежегодник. СПб: Гидрометеиздат, 2006. 180 с.

<sup>7</sup> Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008–2020 гг. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М. 2009, 2010... 2021 г. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhiz1iwkn3676851042>.

**Таблица 1.** Средневзвешенная годовая концентрация ионов в атмосферных осадках на станции «Приморская» за 2008–2020 гг., мг/л  
Table 1. Annually average weighted ion concentrations in atmospheric precipitations at “Primorskaya” station over 2008–2020, mg/l

| Год  | Химический элемент |      |                 |                  |                 |      |      |      |      |       | pH  |
|------|--------------------|------|-----------------|------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-----|
|      | SO <sub>4</sub>    | Cl   | NO <sub>3</sub> | HCO <sub>3</sub> | NH <sub>4</sub> | Na   | K    | Ca   | Mg   | M     |     |
|      | мг/л               |      |                 |                  |                 |      |      |      |      |       |     |
| 2008 | 3,4                | 0,78 | 0,69            | 0,12             | 0,9             | 0,42 | 0,12 | 0,28 | 0,06 | 4,56  | 5,2 |
| 2009 | 3,2                | 1    | 1               | 0,6              | 0,8             | 0,6  | 0,2  | 0,5  | 0,1  | 6,8   | 5,2 |
| 2010 | 4,8                | 1,4  | 2               | 0,7              | 1,1             | 0,8  | 0,3  | 1,1  | 0,2  | 12,5  | 5,5 |
| 2011 | 2,42               | 3,38 | 3,51            | 0,47             | 1,32            | 0,57 | 0,5  | 1,07 | 0,23 | 13,53 | 5,4 |
| 2012 | 3,32               | 1,47 | 2,54            | 0,61             | 0,77            | 0,82 | 0,34 | 0,92 | 0,21 | 11    | 5,3 |
| 2013 | 3,4                | 2,1  | 1,6             | 0,6              | 1               | 0,8  | 0,4  | 1,2  | 0,3  | 7,8   | 5,5 |
| 2014 | 4,1                | 1,3  | 0,7             | 1,5              | 0,8             | 0,5  | 0,3  | 1,2  | 0,2  | 10,7  | 5,7 |
| 2015 | 3                  | 1    | 1,7             | 0,8              | 0,7             | 0,8  | 0,4  | 0,8  | 0,2  | 9,4   | 5,6 |
| 2016 | 3,7                | 1,6  | 2,1             | 1,4              | 0,7             | 1    | 0,8  | 1,1  | 0,2  | 12,8  | 5,9 |
| 2017 | 4,2                | 1,7  | 2,4             | 1,4              | 1,2             | 0,9  | 0,6  | 1,2  | 0,4  | 14    | 6,0 |
| 2018 | 3,88               | 0,92 | 1,77            | 1,49             | 0,98            | 0,7  | 0,5  | 0,83 | 0,29 | 11,38 | 6,2 |
| 2019 | 1,95               | 1,34 | 1,53            | 0,81             | 0,64            | 0,54 | 0,39 | 0,6  | 0,23 | 8,02  | 6,2 |
| 2020 | 3,03               | 1,17 | 1,19            | 0,96             | 0,46            | 0,86 | 0,39 | 0,83 | 0,24 | 9,1   | 5,9 |

Содержание хлоридов в осадках за период 2008–2020 гг. варьировало в пределах 0,78–2,1 мг/л, исключением стал 2011 г., когда концентрация хлоридов была экстремально высокой – 3,38 мг/л<sup>8</sup>. Минерализация осадков (M) варьировала от 4 до 14 мг/л (рис. 2). Самыми загрязненными были атмосферные осадки в 2011 и 2017 гг.



**Рис. 2.** Динамика минерализации атмосферных осадков за 2008–2020 гг.  
Fig. 2. Dynamics of the atmospheric precipitation mineralization over 2008–2020.

<sup>8</sup> Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008, 2009–2020 г. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) М. 2009, 2010...2021 г. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhizliwkn3676851042>.

Катионная часть осадков составляла около 40 %. В их химическом составе преобладали кальций, далее в порядке снижения концентрации следовали натрий, калий и магний (рис. 3). Содержание солей аммония ( $\text{NH}_4$ ) в осадках редко достигало 1,0 и более мг/л и в среднем составляло 0,93 мг/л (табл. 1). Концентрация катионов в атмосферных осадках за 2008–2020 гг. неуклонно возрастала, особенно это касается калия и магния – их содержание выросло более чем в три раза, а натрия и кальция – в полтора раза.

При использовании традиционного анализа степени закисления атмосферных осадков по величине рН, показателю концентрации свободных ионов водорода, необходимо учитывать, что он также характеризует соотношение анионов закисляющих соединений и щелочных нейтрализующих катионов, образующихся и абсорбируемых в облачных слоях в ходе переноса. На это соотношение влияют как природные, так и антропогенные факторы. Для различных районов земного шара и в разные сезоны рН атмосферных осадков варьирует в весьма широких пределах, внутри которых осадки условно делят на кислые (при  $\text{pH} < 4$ ), слабокислые ( $4 < \text{pH} < 5$ ), природно-нейтральные ( $5 < \text{pH} < 7$ ) и слабощелочные ( $\text{pH} > 7$ )<sup>8</sup>.

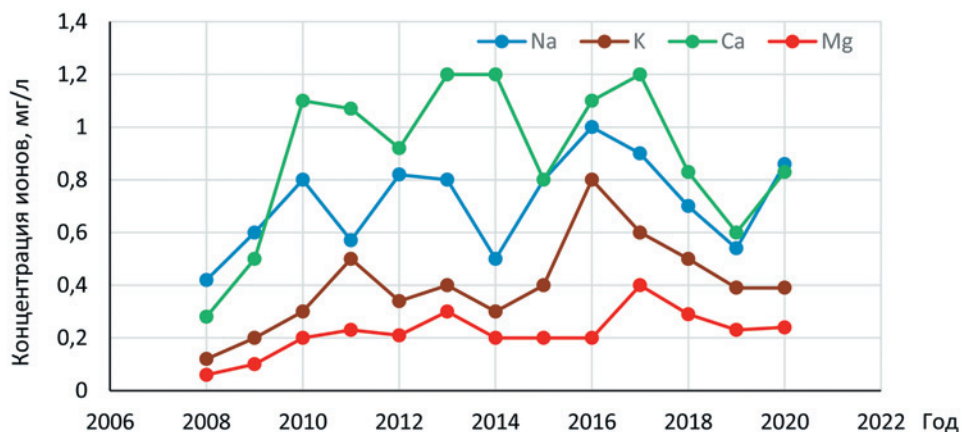


Рис. 3. Динамика средневзвешенных за год концентраций ионов металлов (катионов) на станции «Приморская», 2008–2020 гг.

Fig. 3. Dynamics of annual average weighted metal ions (cations) concentration at "Primorskaya" station, 2008-2020.

Общая картина распределения средних годовых значений рН – показателя кислотности атмосферных осадков – в 2008–2020 гг. на станции «Приморская» указывает на отсутствие процессов закисления. Все значения рН осадков находятся в интервале от 5,2 до 6,2 ед. рН, т. е. относятся к природно-нейтральным ( $5 < \text{pH} < 7$ ). Это связано, скорее всего, с «подщелачивающим» свойством гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3$ )<sup>7</sup>. Действительно, концентрация гидрокарбонатов обнаруживает явное стабильное увеличение на юге Приморья (рис. 4), их среднее годовое содержание за исследуемый период увеличилось в семь раз (с 0,2 до 1,4 мг/л). Среднегодовое осреднение загрязняющих веществ



в атмосферных осадках, которое анализируется в статье, не позволяет выделить отдельные эпизоды кислотных осадков. Исходя из данных публикаций дальневосточных экологов, рН осадков, особенно в холодный период, зачастую достигает диапазона кислых (рН от 3,5 до 4,5) [2, 6]. К примеру, в осадках на станции «Приморская» по данным суточных измерений за 2016–2020 гг. минимальное значение рН составило 4,95. В общем составе взвешенных частиц наибольшие концентрации характерны для сульфатов – от 30 до 50 % состава атмосферных аэрозолей по массе. Однако содержание сульфатов за последнее десятилетие снижается в среднем от 39 до 30 %<sup>8</sup>. Для сравнения, в зоне российского Заполярья в химическом составе атмосферных осадков преобладают сульфат-ионы, их содержание составляет 26, 42 и 35 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторе [11].

В то же время содержание практически всех основных ионов в аэрозолях воздуха на юге Приморского края за 13 лет наблюдений увеличилось на 40 %, однако в 2019 и 2020 гг. произошло некоторое снижение, что, вероятно, связано с уменьшением антропогенной деятельности по причине локдауна [3].

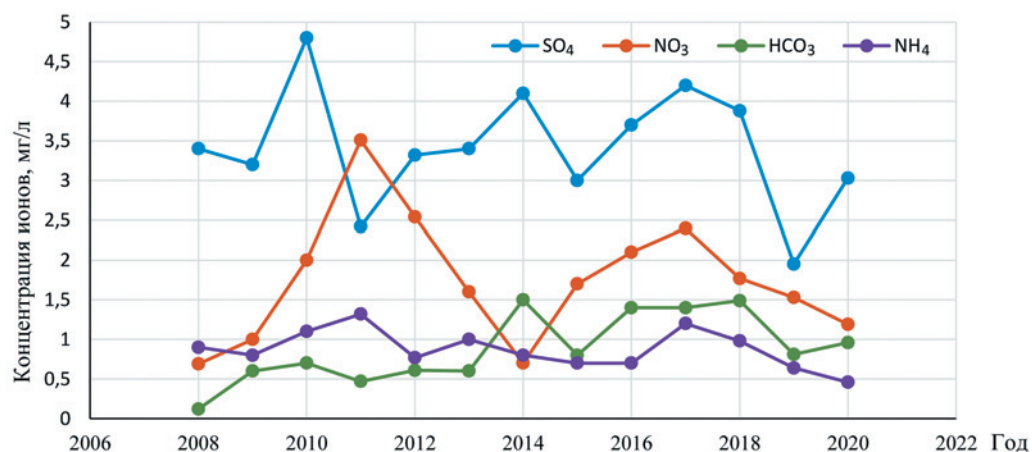


Рис. 4. Динамика средневзвешенных за год концентраций гидрокарбонатов (HCO<sub>3</sub>), сульфатов (SO<sub>4</sub>), нитратов (NO<sub>3</sub>) и солей аммония (NH<sub>4</sub>) на станции «Приморская».

Fig. 4. Dynamics of annual average weighted hydrogen carbonate (HCO<sub>3</sub>), sulphates (SO<sub>4</sub>), nitrates (NO<sub>3</sub>), and ammonia salts (NH<sub>4</sub>) concentrations at “Primorskaya” station

### Поступление загрязняющих веществ с атмосферными осадками на водосборную площадь и прибрежные морские акватории залива Петра Великого

Для определения уровня загрязнения химическими соединениями, выпадающими с атмосферными осадками на водосборную площадь и морские акватории залива Петра Великого, произведена оценка динамики атмосферных осадков (рис. 5). Для расчетов использованы данные наблюдений за атмосферными осадками на пяти метеорологических станциях, расположенных в непосредственной близости от исследуемых водных объектов либо их водо-

сборной площади: станция «Владивосток» (для Амурского и Уссурийского заливов, Бухты Золотой Рог и водосборной площади рек Шкотовского, Артемовского, Владивостокского районов); станция «Преображение» (для залива Находка); станция «Посьет» (для залива Посьета, водосборной площади рек Хасанского района); станция «Партизанск» (водосборная площадь р. Партизанской); станция «Тимирязевский» (для водосбора р. Раздольной).

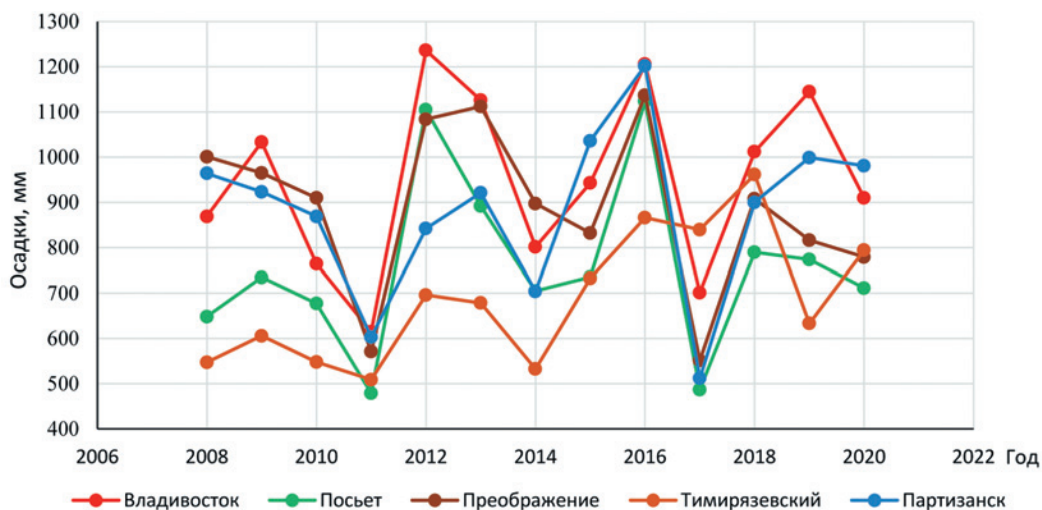
В течение 2008–2020 гг. среднее количество годовых осадков на прибрежных станциях составило около 900 мм, а в континентальной части – около 700 мм (ст. «Тимирязевский»). Динамика выпадения осадков характеризуется значительной межгодовой изменчивостью: минимальное количество отмечено в 2011, 2014 и 2017 гг. на всех станциях; максимальное – в 2012 и 2016 гг.

Масса выпавших с атмосферными осадками растворенных соединений на 1 км<sup>2</sup> территории в год ( $M$ , т/км<sup>2</sup>), определялась по формуле:

$$M = 10^{-3} \cdot K \cdot R, \quad (1)$$

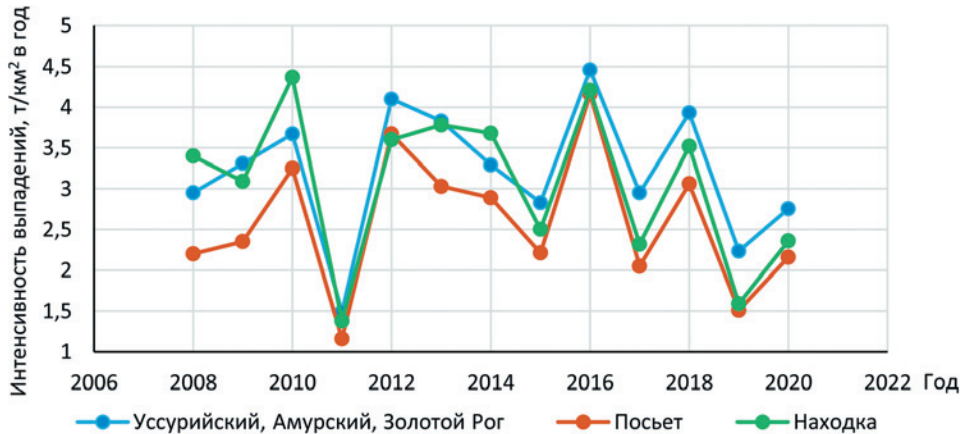
где  $K$  – средневзвешенные за год концентрации ионов, мг/л;

$R$  – годовая сумма осадков, мм.



**Рис. 5.** Динамика годовых сумм осадков на станциях исследуемой территории.  
Fig. 5. Dynamics of the annual total precipitations at the stations of the territory under study.

Поскольку сульфаты составляют большую часть состава атмосферных аэрозолей по массе, рассмотрен совместный ход интенсивности выпадения сульфатов с осадками на отдельные акватории залива Петра Великого (рис. 6). Более всего в период 2008–2020 гг. загрязнялись сульфатами воды Уссурийского, Амурского заливов и бухты Золотой Рог, меньше – воды залива Посьета. Исключением стали 2010 и 2014 гг., когда на 1 км<sup>2</sup> акватории залива Находка поступило больше сульфатов. Аналогичным образом для этих водных объектов рассчитаны массы и по остальным растворенным соединениям.



**Рис. 6.** Межгодовой ход интенсивности выпадения сульфатов в различных частях залива Петра Великого на 1 км<sup>2</sup> площади, т.  
**Fig. 6.** Inter/annual run of the sulphates precipitation in different parts of Peter the Great Bay per 1 km<sup>2</sup>, t.

С учетом площади отдельных акваторий залива Петра Великого (заливов Амурского – 997 км<sup>2</sup>, Уссурийского – 1889 км<sup>2</sup>, Находка – 140 км<sup>2</sup>, Посьета – 445 км<sup>2</sup>, бухты Золотой Рог – 4,44 км<sup>2</sup>) рассчитана ежегодная масса поступления с атмосферными осадками растворенных веществ. Так, количество выпавших за исследуемый период растворенных веществ, представленных в табл. 1, на акваторию Амурского залива, составило в среднем: 3205 т (от 1485 до 4448 т) сульфатов, 1653 т нитратов (598 – 3131 т), 1356 т хлоридов (676 – 2358 т), 854 т гидрокарбонатов (104 – 1683 т), 811 т аммонийного азота (525 – 1123 т), 852 т кальция (243 – 1347 т), 703 т натрия (364 – 1202 т), 393 т калия (104 – 962 т) и 211 т магния (52 – 337 т). Столь значительная межгодовая изменчивость растворенных веществ обусловлена определенной их концентрацией (табл. 1) и количеством выпавших осадков (рис. 5). Количество загрязнителей, выпавших на акваторию бухты Золотой Рог составило 0,4 % от общего количества выпадений на Амурский залив, на залив Посьета – 45 %, на залив Находка – 14 %. В целом, на акваторию Уссурийского залива выпало в 1,9 раз больше растворенных веществ, чем на Амурский залив.

Поток аэральных выпадений серы ( $M_s$ ), нитратного  $M_{N(NO_3)}$  и аммонийного  $M_{N(NH_4)}$  азота ( $M_N$ ) на морские акватории определяется их содержанием в осадках и количеством последних. Для оценки массы этих веществ (сера и азот), поступающих на 1 км<sup>2</sup> акватории в год, получены следующие зависимости:

$$M_s = 3,33 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (2)$$

$$M_{N(NO_3)} = 2,266 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (3)$$

$$M_{N(NH_4)} = 7,76 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (4)$$

где  $K$  – средневзвешенные за год концентрации ионов, мг/л;

$R$  – годовая сумма осадков, мм;

$M$  – масса растворенного вещества, выпавшего с атмосферными осадками, т/км<sup>2</sup> в год.

На рис. 7 и рис. 8 представлены графики динамики выпадения серы и суммарного азота на 1 км<sup>2</sup> рассматриваемых акваторий. В 2008–2020 гг. интенсивность потоков серы с атмосферными осадками на юге Приморья находилась в пределах 0,38–1,47 т/км<sup>2</sup> в год, в среднем она составляла около 1 т/км<sup>2</sup> в год. Для сравнения, концентрация серы в осадках в арктических районах России в 2005–2013 гг. составляла от 0,06 до 0,19 т/км<sup>2</sup> в год, достигая в районе промышленных центров (Мурманск, Норильск, Хатанга) в отдельные годы 1,22 – 2,16 т/км<sup>2</sup> в год [12]. Рост интенсивности выпадения серы в 2008–2018 гг. до 20 % связан с ростом концентрации сульфатов (рис. 7). За последние два года уменьшение выпадения серы обусловлено снижением антропогенной нагрузки и некоторым сокращением годовых сумм осадков (рис. 5) [3].

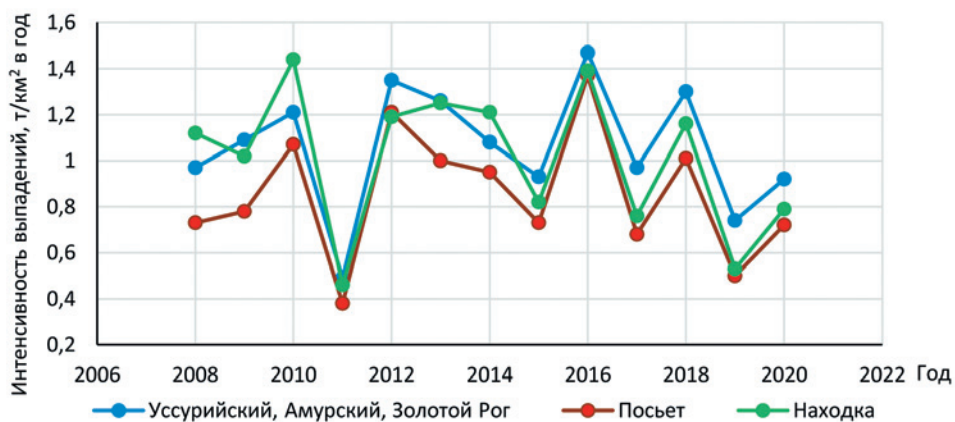


Рис. 7. Межгодовые изменения средней интенсивности потоков серы с атмосферными осадками за 2008–2020 гг., т/км<sup>2</sup>.

Fig. 7. Inter-annual changes of the average intensity of sulphur streams with atmospheric precipitations over 2008–2020, t/km<sup>2</sup>.

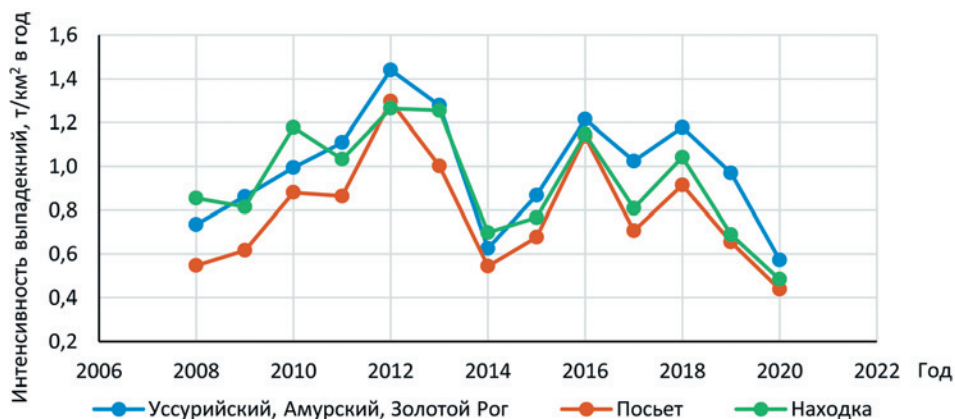


Рис. 8. Межгодовые изменения средней интенсивности потоков суммарного азота с атмосферными осадками за 2008–2020 гг., т/км<sup>2</sup>.

Fig. 8. Inter-annual changes of the average intensity of total nitrogen streams with atmospheric precipitations over 2008–2020, t/km<sup>2</sup>.

Средняя интенсивность потоков суммарного азота на морские акватории составляет около 0,83 т/км<sup>2</sup> в год, изменяясь от 0,39 до 1,3 т/км<sup>2</sup>. В период 2008–2018 гг. наблюдалось увеличение интенсивности атмосферных выпадений суммарного азота на 25 %, а в течение 2019–2020 гг. произошло значительное снижение (по причине локдауна). В арктической зоне средние значения интенсивности выпадения азота составляли в среднем 0,1–0,24, в эпизодах достигая 0,5–0,7 т/км<sup>2</sup> в год [12].

По результатам обработки годовых массивов атмосферных осадков и концентрации в них ионов серы (S(SO<sub>4</sub>)) и азота (ΣN) оценена масса поступлений этих поллютантов с атмосферными осадками на морские акватории залива Петра Великого.

Ежегодная масса потоков серы и суммарного азота с атмосферными осадками была рассчитана для отдельных частей залива Петра Великого – в качестве примера в табл. 2 представлены Амурский и Уссурийский заливы. Анализ таблицы показывает, что в среднем атмосферное количество серы, которая выпадает на акватории заливов, превышает атмосферный азот в 1,3 раза. Однако этот показатель обладает значительной межгодовой изменчивостью: так, в 2014 и 2020 гг. он составлял 2 ед., тогда как в 2011 г, наоборот, потоки серы были в два раза ниже азота.

**Таблица 2.** Выпадение с атмосферными осадками серы, азота на акваторию Уссурийского и Амурского заливов за 2008–2020 гг., т/год  
Table 2. Fall-out of sulphur and nitrogen with atmospheric precipitation on water area of the Ussury and Amur bays over 2008–2020, t/year

| Год  | Уссурийский залив   |                     |                     |      | Амурский залив      |                     |                     |      | S/ΣN |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|------|------|
|      | Химический элемент  |                     |                     |      | Химический элемент  |                     |                     |      |      |
|      | S(SO <sub>4</sub> ) | N(NO <sub>3</sub> ) | N(NH <sub>4</sub> ) | ΣN   | S(SO <sub>4</sub> ) | N(NO <sub>3</sub> ) | N(NH <sub>4</sub> ) | ΣN   |      |
| 2008 | 1842                | 257                 | 1136                | 1393 | 972                 | 136                 | 599                 | 735  | 1,6  |
| 2009 | 2061                | 442                 | 1200                | 1642 | 1088                | 233                 | 634                 | 867  | 1,5  |
| 2010 | 2288                | 655                 | 1221                | 1876 | 1207                | 345                 | 645                 | 990  | 1,4  |
| 2011 | 928                 | 925                 | 1180                | 2105 | 490                 | 488                 | 623                 | 1111 | 0,5  |
| 2012 | 2558                | 1344                | 1382                | 2726 | 1350                | 709                 | 730                 | 1439 | 0,9  |
| 2013 | 2387                | 771                 | 1635                | 2406 | 1260                | 407                 | 863                 | 1270 | 1,1  |
| 2014 | 2049                | 240                 | 931                 | 1171 | 1082                | 127                 | 492                 | 619  | 2,1  |
| 2015 | 1763                | 686                 | 958                 | 1644 | 931                 | 362                 | 506                 | 868  | 1,2  |
| 2016 | 2781                | 1084                | 1226                | 2310 | 1468                | 572                 | 647                 | 1219 | 1,3  |
| 2017 | 1836                | 721                 | 1222                | 1943 | 969                 | 380                 | 645                 | 1025 | 1,1  |
| 2018 | 2448                | 767                 | 1441                | 2208 | 1292                | 405                 | 760                 | 1165 | 1,3  |
| 2019 | 1398                | 756                 | 1078                | 1834 | 738                 | 399                 | 569                 | 968  | 0,9  |
| 2020 | 1738                | 472                 | 609                 | 1081 | 917                 | 249                 | 321                 | 570  | 1,8  |

В самый большой по площади Уссурийский залив поступает от 930 до 2500 т серы в год, в Амурский – от 500 до 1500 т, в залив Посьета – от 170 до 610, в залив Находка – от 64 до 194 т, на акваторию бухты Золотой Рог – от 2 до 6,5 т. Масса суммарного азота, судя по отношению S/ΣN, как правило, ниже по

сравнению с S. Исключением являются 2011 и 2012 гг., когда выпадения азота превысили выпадения серы и составили в Уссурийском заливе 2105 и 2726 т, в Амурском – 1111 и 1439 т соответственно.

Помимо непосредственного выпадения на акваторию поллютанты попадают в залив Петра Великого с водосборных бассейнов впадающих в него рек. Для расчетов выпадения загрязняющих веществ на водосборные бассейны рек использованы данные четырех метеорологических станций, отражающие режим атмосферных осадков на этих водосборных территориях. Анализ совместного хода интенсивности выпадения сульфатов в отдельных водосборных бассейнах залива Петра Великого показывает, что более всего загрязняются атмосферными выпадениями поллютантов бассейны р. Партизанской и рек Шкотовского и прилегающих муниципальных районов, менее всего – бассейн р. Раздольной (рис. 9). Результаты сравнительного анализа для сульфатов распространяются на все остальные виды растворенных соединений. Особенно это касается хлора, т. к. близость океана сказывается на ионном составе атмосферных осадков и проявляется, преимущественно, в повышении концентраций ионов хлора на станциях, расположенных на побережье [13]. Это подтверждается проведенными расчетами по водосборному бассейну р. Раздольной: количество хлора, поступающего с атмосферными осадками, здесь в 1,5 раза ниже, чем в прибрежных водосборных бассейнах.



Рис. 9. Межгодовой ход интенсивности выпадения сульфатов в бассейнах рек, впадающих в залив Петра Великого, т/км<sup>2</sup>.

Fig. 9. Inter/annual run of the sulphates precipitation in basin of the rivers running to Peter the Great Bay per 1 km<sup>2</sup>, t.

С учетом площадей отдельных водосборных бассейнов залива Петра Великого (р. Раздольная – 6820 км<sup>2</sup>, р. Партизанская – 4140 км<sup>2</sup>, реки Хасанского района – 4130 км<sup>2</sup>, реки Шкотовского и других муниципальных районов – 4110 км<sup>2</sup>), концентрации поллютантов (табл. 1) и суммы осадков на репрезентативных метеостанциях (рис. 5) рассчитана ежегодная масса растворенных соединений, поступивших с атмосферными осадками на эти территории.

Ежегодные потоки серы и суммарного азота, поступающие с осадками на основные водосборные бассейны рек залива Петра Великого (реки Раздольная и Партизанская) представлены в табл. 3. Атмосферное количество серы на водосборные территории в среднем превышает суммарный азот в 1,1 раза: это превышение немного ниже, чем на морские акватории залива (1,3). В 2014 и 2020 гг. превышение увеличилось и составило 1,7 и 1,5 раза соответственно. Однако в 2011 и 2019 гг. азота выпало, соответственно, в 2,5 и 1,5 раза больше, чем серы.

**Таблица 3.** Масса серы и азота, выпавших с атмосферными осадками на водосборные площади рек Раздольная и Партизанская за 2008–2020 гг., т/год  
Table 3. Mass of sulphur and nitrogen delivered with atmospheric precipitation on the Razdolnaya and Partizanskaya rivers catchment over 2008–2020, t/year

| Год  | р. Раздольная       |                     |                     |      | р. Партизанская     |                     |                     |      | S/ΣN |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|------|------|
|      | Химический элемент  |                     |                     |      | Химический элемент  |                     |                     |      |      |
|      | S(SO <sub>4</sub> ) | N(NO <sub>3</sub> ) | N(NH <sub>4</sub> ) | ΣN   | S(SO <sub>4</sub> ) | N(NO <sub>3</sub> ) | N(NH <sub>4</sub> ) | ΣN   |      |
| 2008 | 4228                | 685                 | 2608                | 3294 | 4519                | 733                 | 2787                | 3520 | 1,3  |
| 2009 | 4404                | 1099                | 2566                | 3665 | 4072                | 1016                | 2372                | 3389 | 1,2  |
| 2010 | 5973                | 1988                | 3190                | 5178 | 5750                | 1914                | 3071                | 4985 | 1,2  |
| 2011 | 2798                | 3242                | 3557                | 6798 | 2012                | 2331                | 2557                | 4888 | 0,4  |
| 2012 | 5247                | 3207                | 2836                | 6042 | 3854                | 2355                | 2083                | 4438 | 0,9  |
| 2013 | 5241                | 1970                | 3592                | 5562 | 4317                | 1623                | 2959                | 4582 | 0,9  |
| 2014 | 4962                | 677                 | 2256                | 2933 | 3979                | 543                 | 1809                | 2352 | 1,7  |
| 2015 | 4993                | 2260                | 2715                | 4975 | 4285                | 1940                | 2330                | 4269 | 1,0  |
| 2016 | 7276                | 3299                | 3208                | 6507 | 6131                | 2780                | 2703                | 5483 | 1,1  |
| 2017 | 8009                | 3656                | 5333                | 8989 | 2965                | 1353                | 1974                | 3327 | 0,9  |
| 2018 | 8472                | 3087                | 4987                | 8074 | 4814                | 1754                | 2834                | 4588 | 1,0  |
| 2019 | 2805                | 1758                | 2146                | 3904 | 2686                | 1683                | 2054                | 3737 | 0,7  |
| 2020 | 5465                | 1715                | 1933                | 3648 | 4098                | 1286                | 1450                | 2735 | 1,5  |

Примечательно, что за исключением бассейна р. Раздольной каких-либо тенденций в 13-летнем ходе S не прослеживается. В бассейне р. Раздольной выявлена тенденция увеличения потоков серы – в среднем с 4400 т до 6300 т, т. е. на 43 %. Этот бассейн более подвержен влиянию западных циклонов, смещающихся с промышленных районов Китая. Средняя интенсивность потоков суммарного (минеральная форма) азота на водосборные бассейны составляет около 0,83 т/км<sup>2</sup> в год, изменяясь от 0,46 до 1,3 т/км<sup>2</sup> в год. В исследуемом периоде отмечено увеличение интенсивности выпадения суммарного азота на 25 %. Доля нитратного азота по отношению к суммарному в среднем составляет 40 %, изменяясь от 21 до 53 % в течение 2008–2020 гг. Отмечается увеличение вклада нитратного азота – от 32 до 47 %. При этом в среднем за год содержание аммонийного азота превышает нитратный.

## ВЫВОДЫ

На основе анализа содержания средневзвешенных годовых концентраций основных ионов в атмосферных осадках на станции EANET «Приморская» и годовых количествах осадков на станциях «Владивосток», «Посъет», «Партизанск», «Преображение» и «Тимирязевский» за 2008–2020 гг. рассчитана ежегодная масса поступления растворенных веществ на акватории и водосборные бассейны рек залива Петра Великого. Получены следующие результаты:

- содержание основных ионов в атмосферных осадках, выпадающих на акваторию залива Петра Великого и его водосборную площадь, за 11 лет наблюдений (2008–2018 гг.) увеличилось на 40 %, однако в последующие два года (2019 и 2020 гг.) произошло некоторое их снижение, связанное с уменьшением антропогенного влияния с сопредельных территорий по причине локдауна;

- концентрация катионов в атмосферных осадках значительно возросла, особенно это касается калия и магния, содержание которых выросло более чем в три раза, а натрия и кальция в полтора раза. Все значения показателя кислотности осадков в годовом разрезе составляют от 5,2 до 6,2 ед. рН;

- на акватории и водосборной площади залива Петра Великого сульфаты преобладают над нитратами в 2,5 раза;

- минерализация осадков увеличилась с 8 до 13 мг/л, что указывает на возрастание их загрязнения (самыми загрязненными были осадки в 2011 и 2017 гг.);

- концентрация гидрокарбонатов обнаруживает явное и стабильное их увеличение: средняя концентрация увеличилась в семь раз (с 0,2 до 1,4 мг/л);

- в общем составе взвешенных частиц наибольшие концентрации характерны для сульфатов – от 30 до 50 %, однако вклад сульфатов за последнее десятилетие варьирует от 39 до 30 %;

- более всего загрязняются атмосферными осадками акватории Уссурийского и Амурского заливов, а также бассейны р. Партизанской, рек Шкотовского и других прилегающих муниципальных районов;

- интенсивность потоков серы с атмосферными осадками за рассматриваемый период варьировала в пределах 0,38–1,47 т/км<sup>2</sup> в год и составляла в среднем около 1 т/км<sup>2</sup> в год;

- прирост выпадения серы в 2008–2018 гг. до 20 % связан с увеличением концентрации сульфатов, а уменьшение выпадения серы за 2019–2020 гг. обусловлено локдауном и снижением антропогенной нагрузки на сопредельных территориях;

- средняя интенсивность потоков суммарного азота составляет около 0,83 т/км<sup>2</sup> в год, изменяясь от 0,46 до 1,3 т/км<sup>2</sup>. В период 2008–2018 гг. наблюдалось увеличение интенсивности выпадения суммарного азота на 25 %, однако в 2019 и 2020 гг. произошло его значительное снижение.

Территория Приморского края относится к районам достаточного увлажнения, поэтому атмосферные осадки здесь вносят весомый вклад в изменение химического состава пресноводных и морских вод, а также почв водосборных территорий. Особенностью спектра загрязняющих веществ атмосферных осадков является преобладание сульфатов, которые постепенно накапливаются в



верхних горизонтах почв водосборных территорий, а также и в водных объектах, что приводит к повышению кислотности почв, изменению состава биоценоза, мобилизации тяжелых металлов и других ядовитых веществ. Присутствие большого количества сульфатов в питьевой воде вызывает у человека раздражение ЖКТ, провоцируют аллергии и другие заболевания. Нитраты, постепенно накапливаясь в воде, обладают высокой токсичностью для человека и животных. Аммонийный азот опасен тем, что его ион и восстановленная форма (аммиак  $\text{NH}_3$ ) способны вступать в реакцию с белками, вызывая их денатурацию.

В конечном итоге выпадение поллютантов с атмосферными осадками оказывает сильное негативное влияние на биотические процессы, являясь одним из слагаемых общего загрязнения акваторий и водосборных территорий, в т. ч. водохранилищ питьевого назначения, расположенных на водосборной территории залива Петра Великого.

Полученные в работе выводы указывают на необходимость организации непрерывного мониторинга содержания загрязняющих веществ в прибрежных водах и на водосборных территориях юга Приморского края.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев И. И., Кубай Б. В., Семькина Г. И., Качур А.Н. Влияние трансграничного и природного факторов на химический состав осадков в Дальневосточном регионе России // Метеорология и гидрология. № 10. 2013. С. 45–54.
2. Кондратьев И.И. Межгодовая и сезонная изменчивость трансграничного потока техногенных загрязняющих веществ в Дальневосточном регионе // Вестник ДВО РАН. 2018. № 2. С. 110–118.
3. Василевский Д.Н., Василевская Л.Н., Лисина И.А., Мушта Б.Б. Анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 148–161.
4. Аблеева В.А., Лихтенс Е.С. Кислотные дожди в Центральной России // Природа. 1995. № 3. С. 94–95.
5. Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И., Мороз В.В., Дмитриева Е.В. Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, 2003. 180 с.
6. Муха Д.Э., Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И. Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами Восточной Азии на юг Дальнего Востока // Вестник Российской академии наук. 2011. Т. 81. № 2. С. 111–119.
7. Мезенцева Л.И., Гришина М.А., Кондратьев И.И. Траектории и глубина циклонов, выходящих на территорию Приморского края // Вестник ДВО РАН. 2019. № 4. С. 29–38.
8. Кубай Б.В., Мендельсон Э.А., Цурикова Т.В. Изменяется ли климат Приморского края? Владивосток: ПУГМС, 2012. 130 с.
9. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г., Филиппова Л.М. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 206 с.
10. Aardenne van J. A., Carmichael G. R., Levy II. H. et al. Anthropogenic NOx emissions in Asia in the period 1990–2020 // Atmospheric Environment. 1999. Vol. 33. P. 633–646.
11. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. 27–36.
12. Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. Кислотность атмосферных осадков и атмосферные выпадения серы и азота в Арктической зоне Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Арктика: экология и экономика. № 3 (15). 2014. С. 46–51.
13. Кондратьев И.И. Трансграничный фактор в изменчивости химического состава осадков на юге Дальнего Востока // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 31–37.

## REFERENCES

1. Kondratyev I.I., Kubay B.V., Semykina G.I., Kachur A.N. Impact of transboundary and nature factor upon chemical composition of precipitations in the Far Eastern Region of Russia. *Meteorologia i gidrologia [Meteorology and hydrology]*. No. 10. 2013. P. 45–54 (In Russ.).
2. Kondratyev I.I. Inter/annual and seasonal variability of the technogenous pollutants transboundary stream in the Far Eastern Region. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of RAS FEB]*. 2018. No. 2. P. 110–118 (In Russ.).
3. Vasilevskiy D.N., Vasilevskaya L.N., Lisina I.A., Mushta B.B. Analysis of the atmosphere pollution in the Maritime Kray in 2019–2020 according to the GMAO/NASA satellite monitoring data. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydro/meteorological studies and forecasts]*. 2021. No. 4 (382). P. 148–161 (In Russ.).
4. Ableyeva V.A., Likhtens E.S. Acid rains in Central Russia. *Priroda [Nature]*. 1995. No. 3. P. 94–95 (In Russ.).
5. Rostov I.D., Yurasov G.I., Rudykh N.I., Moroz V.V., Dmitrieva E.V. Atlas of the oceanography of the Bering, Okhotsk, and Japan seas. Vladivostok: Pacific Oceanological Institute of RAS FEB, 2003. 180 p. (In Russ.).
6. Mukha D.E., Kondratyev I.I., Mezentseva L.I. Transboundary transfer of acid precipitations by the Eastern Asia cyclones to the south of the Far East. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]*. 2011. Vol. 81. No. 2. P. 111–119 (In Russ.).
7. Mezentseva L.I., Grishina M.A., Kondratyev I.I. Trajectories and depth of the cyclones entering the territory of the Maritime Kray. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of RAS FEB]*. 2019. No. 4. P. 29–38 (In Russ.).
8. Kubay B.V., Mendelson E.A., Tsurikova T.V. Is the Maritime Kray climate changing? Vladivostok: PUGMS, 2012. 130 p. (In Russ.).
9. Izrael Y.A., Nazarov I.M., Pressman A.Y., Rovinskiy F.Y., Ryaboshapko A.G., Filippova L.M. Acid rains. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 206 p. (In Russ.).
10. Aardenne van J. A., Carmichael G. R., Levy II. H. et al. Anthropogenic NO<sub>x</sub> emissions in Asia in the period 1990–2020. *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. P. 633–646.
11. Semenets E.S., Svistov P.F., Talash A.S. Chemical composition of the atmospheric precipitation of the Russian Trans-polar Region. *Izvestia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of the Tomsk Polytechnical University. Engineering of geo/resources]*. 2017. Vol. 328. No. 3. P. 27–36 (In Russ.).
12. Vetrov V.A., Kuzovkin V.V., Manzon D.A. The atmospheric precipitations acidity and atmospheric fall-out of sulphur and nitrogen in the Arctic zone of the Russian Federation according to the data of snow cover chemical composition monitoring. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economics]*. No. 3 (15). 2014. P. 46–51 (In Russ.).
13. Kondratyev I.I. Transboundary factor in variability of the precipitation chemical composition in the south of the Far East. *Geografya i prirodniye resursy [Geography and natural resources]*. 2009. No. 3. P. 31–37 (In Russ.).

**Сведения об авторах:**

**Бортин Николай Николаевич**, доктор географических наук, руководитель, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Россия, 600002, Владивосток, а/я 124, Некрасовская 53Б; e-mail: nbortin@mail.ru

**Василевский Денис Николаевич**, ведущий инженер, отдел водно-экологических исследований, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Россия, 600002, Владивосток, а/я 124, Некрасовская 53Б; e-mail: dwassil@mail.ru

**Василевская Любовь Николаевна**, канд. геогр. наук, доцент, ФГАУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Россия, 690922, г. Владивосток, 22, о. Русский, п. Аякс, 10; ORCID: 0000-0003-3241-7444; e-mail: vasilevskaya.ln@dvfu.ru

**Лисина Ирина Альбертовна**, канд. геогр. наук, доцент, ФГАУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Россия, 690922, г. Владивосток, 22, о. Русский, п. Аякс, 10; ORCID: 0000-0001-6903-9411; e-mail: lisina.ia@dvu.ru

**About the authors:**

**Nikolay N. Bortin**, Doctor of Geographic Sciences, Head, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Far Eastern Branch, ul. Nekrasovskaya, 53B, P.O. Box 124, Vladivostok, 600002, Russia; e-mail: nbortin@mail.ru

**Denis N. Vasilevskiy**, Leading Engineer, Department of Water/ecological Studies, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Far Eastern Branch, ul. Nekrasovskaya, 53B, P.O. Box 124, Vladivostok, 600002, Russia; e-mail: dwassil@mail.ru

**Lyubov N. Vasilevskaya**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Far Eastern Federal University, o. Russkiy, 22, Ayaks, 10, 690922, Vladivostok, Russia; ORCID: 0000-0003-3241-7444; e-mail: vasilevskaya.ln@dvfu.ru

**Irina A. Lisina**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Far Eastern Federal University, o. Russkiy, 22, Ayaks, 10, 690922, Vladivostok, Russia; ORCID: 0000-0001-6903-9411; e-mail: lisina.ia@dvu.ru