

**И.И. КОНДРАТЬЕВ, А.Н. КАЧУР**Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,  
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия, igor@tigdvo.ru, kachur@tigdvo.ru**ИЗМЕНЧИВОСТЬ КИСЛОТНОСТИ ОСАДКОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИИ**

*Проанализирована изменчивость показателя кислотности осадков и потоков влажных выпадений серы и азота на территории Дальневосточного федерального округа Российской Федерации (ДФО). Для анализа использовались данные Росгидромета. Выявлено, что для большей части территории ДФО (Якутия и Забайкалье) характерны щелочные осадки. Однако на юго-востоке региона в рассматриваемый период наблюдался рост кислотности осадков. Среднегодовые значения pH осадков в Приморском крае опустились ниже 5,6 в первом десятилетии XXI в. и достигали в отдельные годы на некоторых станциях мониторинга значений 4,6–4,7. Отмечено, что возрастающее использование азотных удобрений в странах Восточной Азии приводит к увеличению потока атмосферных выпадений азота, которые негативно сказываются на лесной растительности. На международной станции мониторинга EANET Приморская в 2006–2015 гг. в среднем годовой поток влажных выпадений составлял: серы — 6,37 кг/га в год, азота (нитратного и аммонийного) — 6,3 кг/га в год. Сходные величины получены при осреднении данных по всем станциям Приморского края. В 2018 г. этот поток превысил критическое значение 10 кг/га в год. На станции мониторинга Терней в Сихотэ-Алинском биосферном заповеднике потоки выпадений азота были в два раза ниже, чем на Приморской, но на порядок выше, чем в западной части ДФО. Определяющим фактором повышения кислотности осадков и высоких уровней выпадений азота на юго-востоке ДФО является трансграничный атмосферный перенос загрязняющих веществ из центров антропогенной эмиссии в Восточной Азии. Представленный анализ данных не противоречит основным положениям обзоров Росгидромета о состоянии и загрязнении окружающей среды Российской Федерации, а дополняет и детализирует их.*

**Ключевые слова:** кислотность, осадки, мониторинг, влажные выпадения азота и серы, трансграничный атмосферный перенос.

**I.I. KONDRATIEV, A.N. KACHUR**Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,  
690041, Vladivostok, ul. Radio, 7, Russia, igor@tigdvo.ru, kachur@tigdvo.ru**VARIABILITY IN ACIDITY OF PRECIPITATION  
ON THE TERRITORY OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT OF RUSSIA**

*An analysis is made of the variability of the acidity index of precipitation and fluxes of wet sulfur and nitrogen deposition on the territory of the Far Eastern Federal District of the Russian Federation (FEFD). The analysis used data Roshydromet (Hydrometeorological Service of Russia). It was found that alkaline precipitation was characteristic for most of FEFD (Yakutia and Transbaikalia). However, an increase in the acidity of precipitation was observed in the south-east of the region during the period under consideration. The average annual pH values of precipitation in Primorsky krai dropped below 5.6 in the first decade of the 21<sup>st</sup> century to reach in separate years 4.6–4.7 at some of the monitoring stations. It is pointed out that the ever-increasing use of nitrogen fertilizers in East Asian countries leads to an increase in the flow of atmospheric nitrogen deposition, which negatively affects forest vegetation. The annual flux of wet deposition at the international monitoring station EANET Primorskaya between 2006 and 2015 was 6.37 kg/ha per year for S deposition and 6.3 kg/ha per year for N (nitrate+ammonium). Similar values were obtained by averaging data from all stations in Primorsky krai. In 2018, this flux exceeded a critical value of 10 kg/ha per year. The Ternei monitoring station located in the Sikhote-Alin Biosphere Reserve observed the amount of nitrogen fluxes twice as lower as that at the Primorskaya station, but order of magnitude higher than the values recorded in the western part of FEFD. The determining factor for an increase in the acidity of precipitation and for the high levels of nitrogen depositions in the south-east of FEFD is the transboundary atmospheric transport of pollutants from the centers of anthropogenic emissions in East Asia. The analysis of data made in this paper is in agreement with reports of Roshydromet on the state and pollution of the environment of the Russian Federation and supplements and details them.*

**Keywords:** acidity, precipitation, monitoring, wet precipitation of nitrogen and sulfur, transboundary atmospheric transport.

Дальневосточный федеральный округ (ДФО) простирается от Северного Ледовитого океана на севере до границ с Монголией, Китаем и КНДР на юге и окраинных морей Тихого океана на востоке. На западе он граничит с Сибирским федеральным округом. Его площадь — 6 952 555 км<sup>2</sup>, что составляет 40,6 % территории Российской Федерации. Климатические условия округа отличаются разнообразием, но общим для него является суровость климата. Особенности атмосферной циркуляции, географического положения и орографии региона определяют экстремальные сезонные изменчивости температур и более низкие среднегодовые температуры относительно тех же широт в западных частях Российской Федерации. Одна из важнейших климатообразующих особенностей территории Дальнего Востока — это положение на северо-востоке Евразии на границе с величайшими океанами — Тихим и Северным Ледовитым.

Большая часть территории Дальнего Востока относится к муссонной области умеренного климата, для которой характерна сезонная смена воздушных течений, возникающих под влиянием термических контрастов между материком и океаном. Степень воздействия летнего муссона на просторах Дальневосточного региона различна. По мере удаления от побережья его влияние ослабевает. Если в прибрежных районах летний муссон часто вызывает чрезмерное увлажнение, то в западных он приносит столь необходимые осадки [1].

Климатические процессы, происходящие на планете, в частности глобальное потепление, отразились на изменении климата в разных частях региона. В наибольшей степени глобальные процессы потепления проявились в повышении средней температуры воздуха и вод арктических морей [2]. Глобальное потепление вызвало увеличение влагосодержания воздушных масс в период летней фазы муссона [3]. При определенном стечении климатических и орографических факторов это приводит к обильным осадкам, которые могут вызвать катастрофические наводнения. Несмотря на неутрачивающиеся споры о степени антропогенного влияния на изменение климата планеты, подавляющее большинство ученых сходится во мнении, что решающую роль в возникновении так называемого парникового эффекта играет увеличение объемов выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub> и ряда других газов антропогенного происхождения.

Водяной пар в атмосфере является основной причиной парникового эффекта, он эффективно задерживает длинноволновую радиацию, что приводит к повышению температуры приземного слоя воздуха. Однако увеличение влагосодержания атмосферы способствует более интенсивному образованию облаков, которые экранируют земную поверхность от солнечной радиации и понижают температуру приземного слоя воздуха. Аналогичный эффект производят аэрозоли антропогенного происхождения: сульфаты, черный углерод и другие загрязняющие вещества. Воздействие загрязняющих веществ на приземный слой атмосферы различно и разнонаправленно: одни отражают солнечную радиацию, другие задерживают излучение земной поверхности. В настоящее время преобладают процессы, приводящие к глобальному потеплению.

На внутренний влагообмен данной территории в среднем за год приходится только 10 % всех осадков [4]. Соответственно, состав и концентрации загрязняющих веществ в осадках зависят от состава примеси в атмосфере в местах формирования воздушных масс. Так, циклоны, сформировавшиеся в районах с высоким уровнем эмиссии загрязняющих веществ, могут включать их в свою циркуляцию и перемещать загрязненные осадки на тысячи километров [5–10].

Степень антропогенного загрязнения атмосферы на территории ДВО различна. Она выше на юге, который более плотно заселен и имеет относительно крупные городские агломерации. К загрязнению атмосферы от местных источников добавляется трансграничный перенос загрязняющих веществ из сопредельных стран. Крупнейшим источником загрязнения атмосферы в Восточной Азии является Китай. На него приходится 65 % всех выбросов загрязняющих веществ в Азии [11–13]. Западно-восточным переносом воздушных масс, преобладающим в сороковых широтах, загрязняющие атмосферу вещества и осадки переносятся на юго-восток Дальнего Востока. Это приводит к повышению кислотности осадков, наблюдаемому на юге региона на протяжении последних 40 лет [10]. Рост кислотности осадков, по-видимому, — одна из причин усыхания елово-пихтовых лесов на юге Дальнего Востока [14]. Сульфаты и нитраты, присутствующие в осадках, — основные кислотообразующие вещества. Негативное воздействие кислотных осадков на растительность, почвы, гидробионты и архитектурные памятники общеизвестно [15–18].

Антропогенная деятельность нарушает естественный круговорот и баланс серы и азота в окружающей среде [19]. Одним из звеньев круговорота серы и азота является их атмосферный перенос и выпадение с осадками. Стабилизация, а в ряде регионов планеты сокращение выбросов серы, сопровождаются ростом эмиссии соединений азота. С изобретением технологии производства аммиака из азота и водорода воздуха неуклонно растет производство искусственных азотосодержащих удобрений. В настоящее время в почву в среднем вносится 27–30 кг азота на гектар сельскохозяйственных угодий

[20]. Растениями усваивается и минерализуется только 50 % азота. Остальная часть выводится в растворенном виде в водоемы и в газообразной форме — в атмосферу [21]. В настоящее время на 11 % естественной растительности мира выпадает азота сверх порога критической нагрузки 10 кг/га в год [22]. Излишнее осаждение азота изменяет характер растительности, вследствие чего большое количество находящихся под охраной видов замещаются широко распространенными зональными видами. В некоторых районах Китая поток выпадений азота достигает 50 кг/га в год [22].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ изменчивости химического состава осадков проводился с использованием данных мониторинга на территории ДФО. В Российской Федерации мониторинг химического состава осадков осуществляется на 146 станциях. Из них на территории ДФО находится 30 станций (рис. 1).

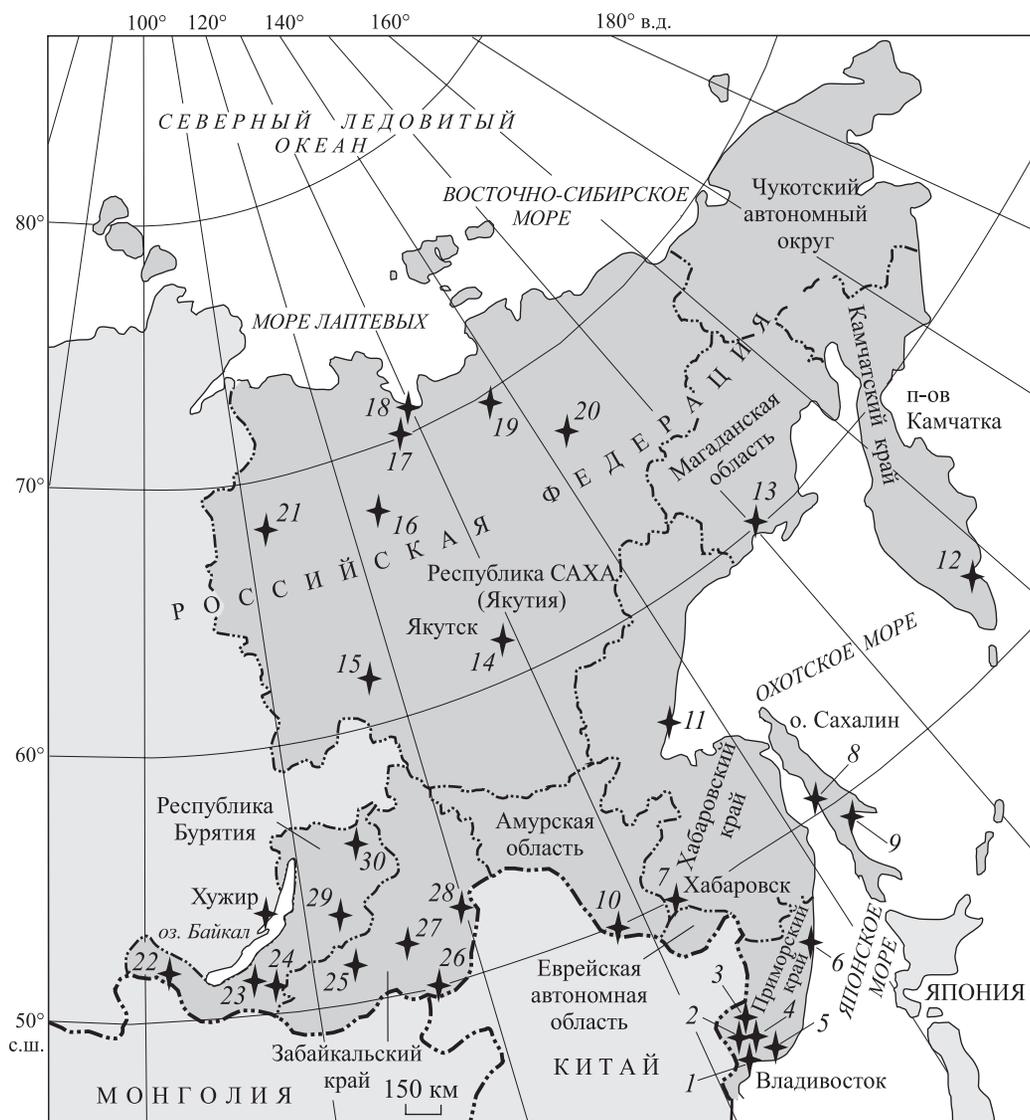


Рис. 1. Карта-схема расположения станций мониторинга химического состава осадков в ДФО (показаны крестиком).

Станции: 1 — Садгород, 2 — Тимирязевский, 3 — Халкидон, 4 — Приморская, 5 — Партизанск, 6 — Терней, 7 — Сутур, 8 — Александровск, 9 — Поронайск, 10 — Константиновка, 11 — Аян, 12 — Петропавловск-Камчатский, 13 — Палатка, 14 — Якутск, 15 — Сунтар, 16 — Жиганск, 17 — Кюсюр, 18 — Тикси, 19 — Депутатский, 20 — Усть-Мома, 21 — Полярный, 22 — Монды, 23 — Улан-Удэ, 24 — Петровский, 25 — Чита, 26 — Дальдуга, 27 — Нерченск, 28 — Могоча, 29 — Романовка, 30 — Таксимо.

На большинстве станций осадки, отобранные в течение месяца, объединяются в одну пробу, которая высылается в региональный аналитический центр. Две станции — Приморская и Монды — относятся к международной сети EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia). На этих станциях пробы осадков, в случае их выпадения, отбираются каждые сутки в 9:00 по местному времени. Все пробы осадков национальной сети пересылаются в региональные лаборатории Росгидромета, где определяются концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , а также показатель pH и электропроводность. Для территории Дальнего Востока в границах до 2000 г. пробы осадков высылаются во Владивосток, где исследуются в Центре мониторинга окружающей среды Приморского УГМС. Анализ проб станции EANET Приморская также проводится в Приморском центре мониторинга. Калибровочные стандарты, фильтры для отбора проб и частично реактивы поставляются централизованно из центра EANET (Япония). Данные сети ежегодно публикуются в отчетах (<http://www.eanet.cc/product.html>). Результаты анализа систематически тестируются как в лаборатории, проводящей анализ, так и в центре EANET.

Сведения об ионном составе осадков на станциях Росгидромета публикуются в ежегодных сборниках данных по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за пятилетний период. На момент работы над статьей данные за 2016–2020 гг. еще не были опубликованы. Продолжительность наблюдений и их непрерывность на станциях мониторинга различны. Так, наиболее продолжительный и непрерывный ряд наблюдений с 1986 г. в ДФО имеют станции Терней и Садгород. По остальным станциям сведения опубликованы начиная с 1996 г. Для двух станций Сахалина за 2009–2010 гг. и 15 станций Якутии и Забайкалья за 2007–2010 гг. нет данных. Станция EANET Приморская функционирует с 2002 г.

Анализ данных мониторинга приводится в сборниках «Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации» за соответствующий год. Несмотря на большой объем информации и ценность представленного анализа, объем сборников не позволяет авторам детально рассмотреть динамику изменчивости отдельных параметров каждого региона. Так, в обзорах не показана динамика кислотности осадков на юге Дальневосточного региона за последние 40 лет. Рост кислотности осадков отчетливо проявляется в этом временном промежутке, хотя для отдельных временных периодов изменчивость не столь характерна. Эта тенденция была выявлена в результате исследований химического состава снежного покрова и анализа данных о химическом составе осадков на станциях мониторинга Дальневосточного региона [6, 7, 9, 10]. Результаты совместного анализа синоптического материала и химического состава осадков показали, что последний зависит от состава примеси в атмосфере в районе формирования воздушных масс циклонов [22]. Подавляющее количество циклонов, выходящих на юг Дальнего Востока, формируется на территории Китая и Монголии, они же приносят большую часть осадков, выпадающих в Приморье в течение года [24]. Ряд циклонов, приносящих осадки в Приморье, перемещается по северу Сибири, а некоторые формируются в Забайкалье [25]. Наиболее типичное расстояние, которое проходят циклоны от момента зарождения до заполнения, составляет 2–2,5 тыс. км, но возможны траектории протяженностью до 7–8 тыс. км [26].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Антропогенное воздействие проявляется на всей территории ДФО в увеличении кислотности осадков. Кислотность осадков в регионе различна, как и скорость, с которой происходит ее изменение. Изменчивость среднегодового показателя кислотности осадков наблюдается на всей территории ДФО [28–31]. Наиболее высока она на юго-востоке региона, где рост кислотности осадков отмечался на протяжении последних 30 лет (рис. 2).

На юго-востоке региона в 2000-х гг. на всех станциях мониторинга среднегодовые значения pH осадков опустились ниже 5,6: в Тернее и Тимирязевском — в 2004 г., Садгороде — в 2005 г., Сутуре — в 2007 г. В Партизанске уже в 1996 г. среднегодовые значения кислотности осадков были ниже 5,6 единиц pH. После перехода в категорию кислых осадков в отдельные периоды среднегодовой показатель кислотности понижался, но в целом тенденция ее роста сохранялась. Исключением для юга региона является станция Константиновка, где среднегодовые значения pH осадков не опускались ниже 5,6 (см. рис. 2).

На прибрежных станциях Петропавловск-Камчатский, Александровск, Поронайск и Аян в целом сохранялась тенденция к повышению кислотности осадков, на последних трех только в отдельные годы среднегодовые значения pH опускались ниже 5,6. К категории кислых относились осадки в Петропавловске в период с 2001 по 2013 г. На минерализацию и кислотность осадков на прибрежных

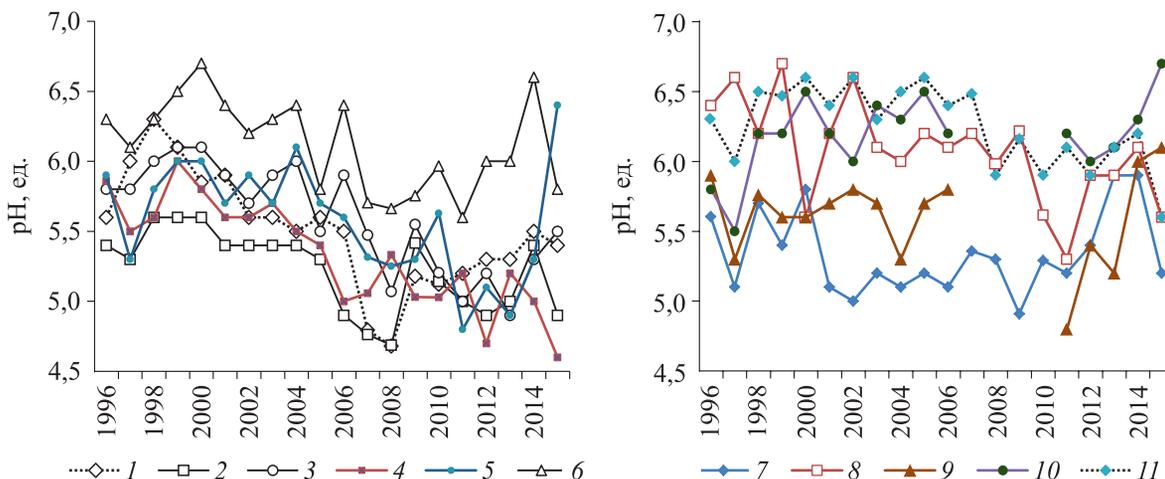


Рис. 2. Изменчивость значений рН осадков на станциях мониторинга восточной части ДФО, по [28–34].

Станции: 1 – Терней, 2 – Партизанск, 3 – Садгород, 4 – Тимирязевский, 5 – Сутур, 6 – Константиновка, 7 – Петропавловск-Камчатский, 8 – Палатка, 9 – Александровск, 10 – Поронайск, 11 – Аян.

станциях оказывает влияние морской аэрозоль, который повышает рН осадков. Степень воздействия морской соли зависит от многих факторов – расположения станции относительно преобладающих ветров, расстояния от береговой черты, интенсивности и типа осадков и т. д.

Осадки на станции Палатка на протяжении всего периода наблюдений были преимущественно нейтральными и щелочными. Только в 2011 г. среднегодовые значения рН осадков на этой станции опускались ниже 5,6. На территории Якутии и Забайкальского региона среднегодовые значения кислотности осадков в 1996–2015 гг. были выше 5,6, т. е. относились к категории нейтральных и щелочных (рис. 3). Лишь на станции Депутатский в 2014–2015 гг. среднегодовая кислотность осадков составляла 5,4 и 5,5 рН.

На большей части ДФО выпадают преимущественно щелочные осадки, но и здесь происходит повышение их кислотности (см. рис. 3). На этом фоне выделяется юго-восток округа, где кислотные осадки преобладают с начала 2000-х гг. Учитывая низкую плотность населения в регионе (относительно сопредельных стран), отсутствие крупных источников загрязнения атмосферы, рост кислотности осадков можно объяснить трансграничным атмосферным переносом загрязняющих веществ.

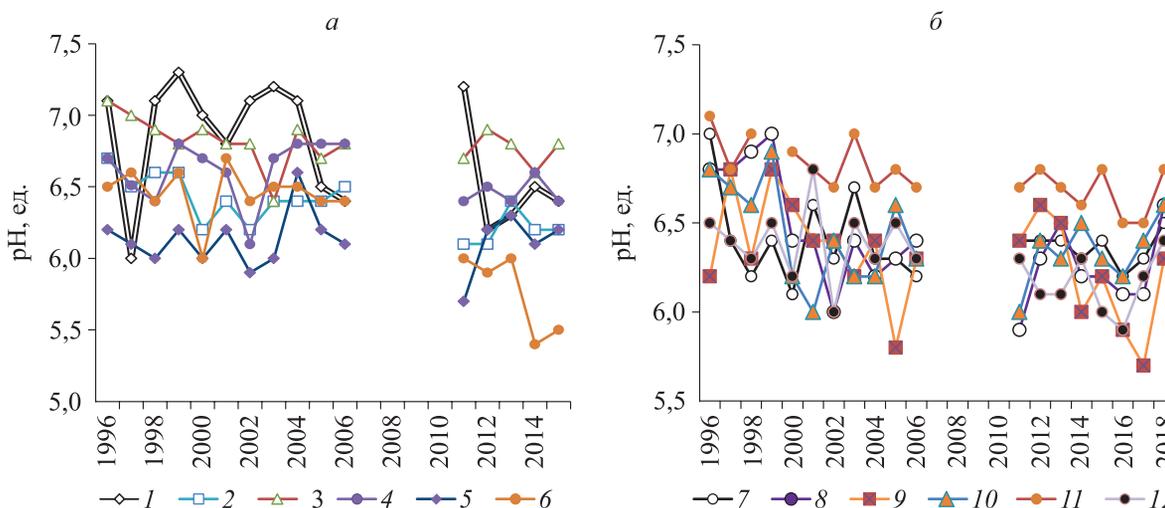


Рис. 3. Изменчивость значений рН осадков на станциях мониторинга Якутии (а) и Забайкалья (б), по [28–34].

Станции: 1 – Тикси, 2 – Усть-Мома, 3 – Якутск, 4 – Сунтар, 5 – Жиганск, 6 – Депутатский, 7 – Улан-Удэ, 8 – Петровский, 9 – Чита, 10 – Нерчинск, 11 – Могоча, 12 – Романовка.

Крупнейшим источником эмиссии загрязняющих веществ в Восточной Азии является Китай [18, 19]. Обеспокоенность в связи с ростом кислотности осадков высказывают и в Японии, которая также подвержена воздействию трансграничного переноса загрязняющих веществ с Азиатского континента [27].

Антропогенное воздействие связано также со все возрастающим потоком выпадений азота и серы, которые в некоторых районах планеты достигли опасных уровней. Пространственная изменчивость выпадений азота и серы в ДФО показана в табл. 1, где представлены осредненные за пять лет данные за 2006–2010 и 2011–2015 гг. [28–31]. Плотность влажных выпадений азота на станциях мониторинга химического состава осадков на юге ДФО в два раза выше, чем в Якутии и Забайкалье, что объясняется выпадением большего количества осадков и загрязнением их антропогенной примесью (см. табл. 1).

Средний годовой поток выпадений в 2006–2015 гг. на станции Приморская, рассчитанный как сумма суточных выпадений, составил: серы — 6,37, нитратного азота — 2,25, аммонийного азота — 3,98 кг/(га×год). По данным Росгидромета, в 2017 и 2018 гг. на станции Приморская поток влажных выпадений серы и азота был выше, чем в предыдущие периоды [32]. В 2018 г. уровень только влажных выпадений на этой станции был выше критической величины 1 г/м<sup>2</sup>·год (табл. 2). Суммарный поток выпадений будет еще больше, так как, по разным оценкам, на сухие выпадения приходится от 10 до 40 % общей суммы потока [19]. Распределение выпадений азота по территории Приморского края неравномерно. На фоновой станции Терней, расположенной в местности, удаленной от локальных источников загрязнения атмосферы, поток выпадений в 2017–2018 гг. оставался на уровне 2006–2015 гг. [32]. По-видимому, этот уровень выпадений можно принять как региональный фон. Хотя поток выпадений азота на станции Терней в три раза ниже, чем на станции Приморская, он на порядок выше, чем на фоновых станциях Тикси, Монды и Хужир, расположенных в северной и западной частях ДФО и в Иркутской области соответственно (см. табл. 2).

Таблица 1

**Плотность влажных выпадений (г/(м<sup>2</sup>·год)) азота (NO<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub>) и серы (SO<sub>4</sub>) на станциях мониторинга химического состава осадков в ДФО в 2006–2015 гг., по [28–31]**

Станция	N(NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> )		S (SO <sub>4</sub> )	
	2006–2010	2011–2015	2006–2010	2011–2015
Терней	0,39	0,42	0,61	0,59
Партизанск	0,59	0,49	0,93	0,75
Садгород	0,73	0,55	1,11	0,90
Халкидон	0,60	0,64	0,86	1,05
Тимирязевский	0,48	0,49	0,67	0,68
Приморская	0,63	0,62	0,78	0,56
<b>Юг Дальнего Востока (восток)</b>	<b>0,57</b>	<b>0,54</b>	<b>0,83</b>	<b>0,75</b>
Петропавловск	0,38	0,55	1,40	1,16
Аян	0,25	0,54	1,64	1,31
Палатка	0,18	0,26	0,36	0,61
<b>Север Дальнего Востока (восток)</b>	<b>0,27</b>	<b>0,45</b>	<b>1,13</b>	<b>1,03</b>
Сунтар	–	0,23	–	0,54
Якутск	–	0,24	–	0,49
Жиганск	–	0,12	–	0,23
Тикси	–	0,22	–	0,40
Усть-Мома	–	0,18	–	0,27
<b>Якутия</b>	–	<b>0,20</b>	–	<b>0,38</b>
Романовка	0,15	0,09	0,15	0,09
Улан-Удэ	0,42	0,13	0,42	0,13
Петровский завод	0,10	0,21	0,10	0,21
Дальдуга	0,04	0,22	0,04	0,22
Чита	0,22	0,34	0,22	0,34
Нерчинск	0,33	0,34	0,33	0,34
<b>Забайкалье</b>	<b>0,21</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,22</b>

Примечание. Данные осреднены за 2006–2010 и 2011–2015 гг. Жирным шрифтом показаны средние значения влажных выпадений S и N на станциях выделенных регионов. Прочерк – нет данных.

Таблица 2

Плотность влажных выпадений серы (SO<sub>4</sub>) и азота (NO<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub>) на станциях мониторинга, г/(м<sup>2</sup>·год), по [34, 35]

Станция	2017 г.			2018 г.		
	Q, мм	S(SO <sub>4</sub> )	N(NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> )	Q, мм	S(SO <sub>4</sub> )	N(NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> )
Приморская	636,8	0,89	0,94	1023,2	1,32	1,19
Терней	508,1	0,24	0,32	783,0	0,53	0,39
Тикси	286,4	0,28	0,14	198,0	0,08	0,04
Хужир (Иркутская область)	146,2	0,11	0,04	205,9	0,07	0,05
Монды*	—	0,031	0,035	—	—	—

Примечание. Q – количество осадков на станции за год. Прочерк – нет данных.

\* Среднее за 9 лет (2008–2017 гг.).

Среди 11 станций фонового мониторинга осадков на территории Российской Федерации самые высокие уровни выпадений серы в 2013–2017 гг. зафиксированы на станции Приморская (0,98 г/(м<sup>2</sup>·год)). Поток выпадений азота на этой станции составлял 0,72 г/(м<sup>2</sup>·год) и был выше только в Кавказском биосферном заповеднике (0,79 г/(м<sup>2</sup>·год)), но там выпадало в среднем за анализируемый период в два с половиной раза больше осадков [35]. Высокий и все возрастающий поток выпадений антропогенного происхождения может представлять серьезную опасность для экосистемы юго-востока ДФО. К сожалению, целенаправленных исследований ответной реакции биоты на изменяющийся вследствие антропогенного воздействия химический состав осадков в регионе не проводится.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тенденция к росту кислотности осадков прослеживается на территории всего ДФО. Однако юго-восток региона выделяется высокой кислотностью осадков на общем фоне щелочных осадков, характерных для большей части округа. Это же относится к потоку выпадений азота: на станции мониторинга EANET Приморская в 2017–2018 гг. он был выше критической величины 10 кг/(га·год). На юго-востоке ДФО, в Сихотэ-Алинском биосферном заповеднике (станция Терней), потоки выпадений азота были на порядок выше, чем в западной части региона. Кислотность осадков и высокий уровень выпадений серы и азота на юго-востоке связаны в том числе с трансграничным переносом загрязняющих веществ из промышленных центров Восточной Азии. Последствия этого воздействия являются одной из причин усыхания елово-пихтовых лесов в Приморском и Хабаровском краях. Негативное воздействие излишнего количества выпадающего азота сказывается в доминировании трав и кустарников, особенно на вырубках и горельниках, что препятствует естественному возобновлению аборигенной лесной растительности. Кислотные осадки повышают кислотность почвы, что требует дополнительного известкования для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Все возрастающий поток выпадений нитратов и аммония создает предпосылки к сокращению количества азотных удобрений, вносимых в почву. Для оценки в целом реакции биоты на увеличивающийся поток атмосферных выпадений антропогенного происхождения необходимы комплексные исследования, результаты которых могут быть полезны для сельхозпроизводителей в части оптимизации внесения удобрений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погосян Х.П. Общая циркуляция в атмосфере. — Л.: Гидрометеоздат, 1972. — 394 с.
2. Гаврилова М.К. Климат холодных регионов земли. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. — 206 с.
3. **Континентальная** многолетняя мерзлота // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семёнова. — М.: Росгидромет, 2012. — 508 с.
4. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Климатические изменения термических условий морских акваторий восточного сектора Арктики на рубеже XX–XXI веков // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 7. — С. 17–33.
5. Хлебникова Е.И., Рудакова Ю.Л., Школьник И.М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 7. — С. 5–16.
6. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. — М.: Наука, 2006. — 582 с.

7. Nagase Y., Silva E.C.D. Acid rain in China and Japan: A game-theoretic analysis // *Regional Science and Urban Economics*. — 2007. — N 37. — P. 100–120.
8. Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И., Семькина Г.И. Тенденции в динамике pH осадков в дальневосточном регионе Российской Федерации // *Метеорология и гидрология*. — 2007. — № 4. — С. 89–100.
9. Кондратьев И.И. Трансграничный фактор в изменчивости химического состава осадков на юге Дальнего Востока России // *География и природ. ресурсы*. — 2009. — № 3. — С. 31–37.
10. Муха Д.Э., Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И. Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами восточной Азии на юг Дальнего Востока России // *География и природ. ресурсы*. — 2012. — № 2. — С. 21–26.
11. 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*. — 2013. — № 10. — С. 45–53.
12. Кондратьев И.И. Трансграничный атмосферный перенос аэрозоля и кислотных осадков на юг Дальнего Востока России. — Владивосток: Дальиздат, 2014. — 300 с.
13. Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И., Гришина М.А. Зависимость влажных выпадений сульфатов и нитратов в Приморском крае от траектории циклонов // *География и природ. ресурсы*. — 2020. — № 2. — С. 135–143.
14. Манько Ю.И., Гладкова Г.А. Усыхание ели в свете глобального ухудшения темнохвойных лесов. — Владивосток: Дальнаука, 2001. — 222 с.
15. Streets D.G., Waldhoff S.S. Present and future emissions of air pollutants in China: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO // *Atmospheric Environment*. — 2000. — N 34. — P. 363–374.
16. Aardenne J.A. van, Carmichael G.R., Levy II.H., Street D., Hordijk I. Anthropogenic NO<sub>x</sub> emissions in Asia in the period 1990–2020 // *Atmospheric Environment*. — 1999. — N 33. — P. 633–646.
17. Galloway J.N., Dentener F.J., Capone D.G., Boyer E.W. Nitrogen cycles: Past, present and future // *Biogeochemistry*. — 2004. — N 70. — P. 153–126.
18. Zhao C., Luo K. Household consumption of coal and related sulfur, arsenic, fluorine and mercury emissions in China // *Energy Policy*. — 2018. — N 112. — P. 221–232.
19. Zhang L. Atmospheric reactive nitrogen: sources, sinks, and impacts on air quality, 2017 [Электронный ресурс]. — [http://environment.harvard.edu/sites/-default/files/atmospheric\\_reactive\\_nitrogen\\_sources\\_sinks\\_and\\_impacts\\_on\\_air\\_quality.pdf](http://environment.harvard.edu/sites/-default/files/atmospheric_reactive_nitrogen_sources_sinks_and_impacts_on_air_quality.pdf) (дата обращения 20.02.2021).
20. Zhao Y., Zhang L., Chen Y., Liu X., Xu W., Pan Y., Duan L. Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance // *Atmospheric Environment*. — 2017. — Vol. 153. — P. 32–40.
21. Zhang Y., Ding Y., Qiaoping Li. A climatology of extratropical cyclones over East Asia during 1958–2001 // *Acta Meteorologica Sinica*. — 2012. — Vol. 26, Issue 3. — P. 261–277.
22. Siddiqi S.A., Farsi B. The Contribution of Greenhouse Gas Emissions on Future Acid Rain in States of Gulf Cooperation Council: Measures to Adopt // *Journ. of Geoscience and Environment Protection*. — 2019. — Vol. 7. — P. 82–98.
23. Бримблкунб П. Состав и химия атмосферы. — М.: Мир, 1988. — 351 с.
24. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Пресман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г., Филиппова Л.М. Кислотные дожди. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 204 с.
25. Akimoto H., Narita H. Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emission from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution // *Atmospheric Environment*. — 1994. — Vol. 28, N 2. — P. 213–225.
26. Streets D.G., Waldhoff S.S. Present and future emissions of air pollutants in China: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO // *Atmospheric Environment*. — 2000. — N 34. — P. 363–374.
27. Мезенцева Л.И., Гришина М.А., Кондратьев И.И. Траектории и глубина циклонов, выходящих на территорию Приморского края // *Вестн. ДВО*. — 2019. — С. 29–39.
28. Семёнов Е.К., Соколихина Н.Н., Татаринич Е.В. Муссонная циркуляция над бассейном Амура в период наводнения и аномально засушливого лета // *Метеорология и гидрология*. — 2017. — № 3. — С. 5–17.
29. Ежемесячные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1981–1985 гг. (Обзор данных). — Л., 1989. — 196 с.
30. Ежемесячные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1986–1990 гг. — СПб., 1994. — 155 с.
31. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1991–1995 гг. — СПб.: Гидрометеиздат, 1998. — 65 с.
32. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1996–2000 гг. — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. — 226 с.
33. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1996–2000 гг. — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2010. — 186 с.
34. Свистов П.Ф., Першина Н.А., Полищук А.И., Павлова М.Т., Семенец Е.С. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011–2015 гг. (Обзор данных). — СПб., 2016. — 115 с.
35. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 год. — М., 2018. — 206 с.

*Поступила в редакцию 10.02.2022*

*После доработки 09.06.2022*

*Принята к публикации 28.12.2022*