

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.42 (571.63)

И. И. КОНДРАТЬЕВ

ТРАНСГРАНИЧНЫЙ ФАКТОР В ИЗМЕНЧИВОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ НА ЮГЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Приведены результаты исследований динамики химического состава атмосферных осадков в Дальневосточном регионе России за последние 25 лет. Показано, что повышение кислотности осадков обусловлено трансграничным переносом кислотообразующих поллютантов из промышленных центров Восточной Азии, что подтверждается результатами анализа синоптического материала.

Ключевые слова: эмиссия, оксиды серы и азота, трансграничный перенос, обратные траектории.

Presented are the results from investigating the chemical composition dynamics of atmospheric precipitation in the Far-eastern region of Russia for the last 25 years. It is shown that the increase in acidity of atmospheric precipitation is due to the trans-boundary transfer of acid-forming pollutants from industrial centers of East Asia, which is borne out by the results derived from analyzing synoptic data.

Keywords: emission, sulfur and nitrogen oxides, trans-boundary transfer, back trajectories.

Российский Дальний Восток (РДВ) протянулся от границ с Китаем и КНДР до Северного Ледовитого океана. Столь значительная меридиональная протяженность определяет разнообразие климатических условий, различия режима атмосферных осадков и их химического состава. Кроме климатических факторов на химический состав осадков влияет как локальное загрязнение атмосферы, так и трансграничный перенос загрязняющих веществ. Южная часть РДВ граничит либо находится в непосредственной близости с крупнейшими индустриальными странами Восточной Азии: Японией, Южной Кореей и Китаем. Антропогенная деятельность в них неизбежно приводит к загрязнению окружающей среды, и в первую очередь атмосферы.

В основном атмосферу загрязняют оксиды серы, азота, углерода, бенз(а)пирен и сажа, образующиеся при сжигании топлива, а также тяжелые металлы, присутствующие в нем. В результате фотохимических реакций в атмосфере газообразные оксиды серы и азота преобразуются в сульфаты и нитраты, которые либо выпадают в виде твердых частиц, либо растворяются облачной влагой и тем самым закисляют осадки [1]. Основным поставщиком сульфатов в атмосферу в доиндустриальную эпоху были поверхности морей и океанов, а также аридные зоны континентов. По некоторым оценкам в настоящее время потоки сульфатов и нитратов естественного и антропогенного происхождения примерно равны [2]. Чем выше плотность промышленных предприятий, населения, транспортных средств и чем меньше принятых мер по ограничению выбросов в атмосферу, тем больше в нее поступает загрязняющих веществ.

Самые обширные районы с высокими уровнями загрязнения атмосферы в Восточной Азии находятся в КНР [3]. В 1995 г. эмиссия SO_2 в Китае была порядка 25 млн т, что составляло 43 % всех выбросов азиатской части континента. По разным оценкам эти цифры возрастут к 2020 г. до 30–60 млн т [4]. Эмиссия NO_x увеличится соответственно с 11 до 27–32 млн т [4]. Ряд модельных расчетов, проведенных учеными Японии и Южной Кореи, свидетельствуют о неуклонном расширении зоны влияния повышенных концентраций SO_2 , NO_x , сульфатов и нитратов из Центрального Китая на соседние страны, в том числе и на юг РДВ [5–10].

В силу относительной близости крупнейшего центра эмиссии основной фактор трансграничного переноса загрязняющих веществ на юге РДВ — это направления передвижения воздушных масс. В тропосфере 40-х широт преобладает западно-восточный перенос воздушных масс, т. е. с территории

Китая они перемещаются на юг РДВ, на государства Корейского полуострова и Японию. Расстояние от основных центров эмиссии в Северо-Восточной Азии до южных границ РДВ порядка 1,5–2,0 тыс. км. Воздушная масса проходит этот путь в среднем за двое суток. Время жизни окислов серы и азота, представляющих собой кислотообразующие поллютанты, составляет 4–5 сут. [2]. При определенных синоптических условиях загрязняющие вещества достигают территории РДВ, где и оседают на земную поверхность в виде сухих и влажных выпадений.

Наибольший интерес представляют юго-западные направления переноса воздушных масс на юг РДВ, т. е. со стороны Китая. Чтобы оценить вклад этих направлений, на протяжении четырех лет (2002–2005 гг.) по материалам Приморского управления Гидрометеослужбы для каждого суток года строились обратные траектории движения воздушных масс по картам барической топографии АТ₈₅₀, что соответствует высоте порядка 1500 м над ур. моря [11, 12]. В соответствии с поставленными задачами нас интересовали три основных направления переноса воздушных масс на юг РДВ: с севера Дальнего Востока и Сибири, с Японского моря и с Центрального и Восточного Китая. Все построенные за четыре года траектории разбивались на секторы, и рассчитывался вклад каждого сектора в процентах для каждого месяца (рис. 1).

Как показал анализ, частота выноса холодных воздушных масс с севера наибольшая в зимние периоды года. Только в апреле их интенсивность начинает убывать, достигая минимума в июле. С точки зрения потенциальной возможности трансграничного переноса загрязняющих веществ наибольший интерес представляет сезонная изменчивость выноса воздушных масс из Центрального Китая. Их частота поступления плавно возрастает с 10 % в январе до более чем 50 % в июле. Частота выноса с Японского моря оказалась существенно ниже, чем с юго-западного направления. Результаты анализа показали, что вынос загрязненных воздушных масс из Китая наиболее вероятен в летний период года.

С целью изучения динамики и пространственной изменчивости состава атмосферных выпадений с 1970-х гг. Тихоокеанским институтом географии ДВО РАН проводятся исследования химического состава снежного покрова на юге РДВ. Последние масштабные исследования, проведенные в 2005 г., показали аномально низкие значения рН снежного покрова. Среднее значение кислотно-щелочного показателя вне зоны антропогенного воздействия составляло 4,6, и впервые за весь период наблюдений зарегистрированы его значения ниже 4. Принимая во внимание, что рН чистых осадков, находящихся в равновесии с СО₂, равняется 5,6, снежный покров зимнего периода 2004–2005 гг., видимо, загрязнялся кислотообразующими поллютантами.

Чтобы выяснить происхождение кислотных осадков были привлечены специалисты Гидрометеослужбы, которые провели синоптический анализ для зимнего периода 2004–2005 гг. Исследования

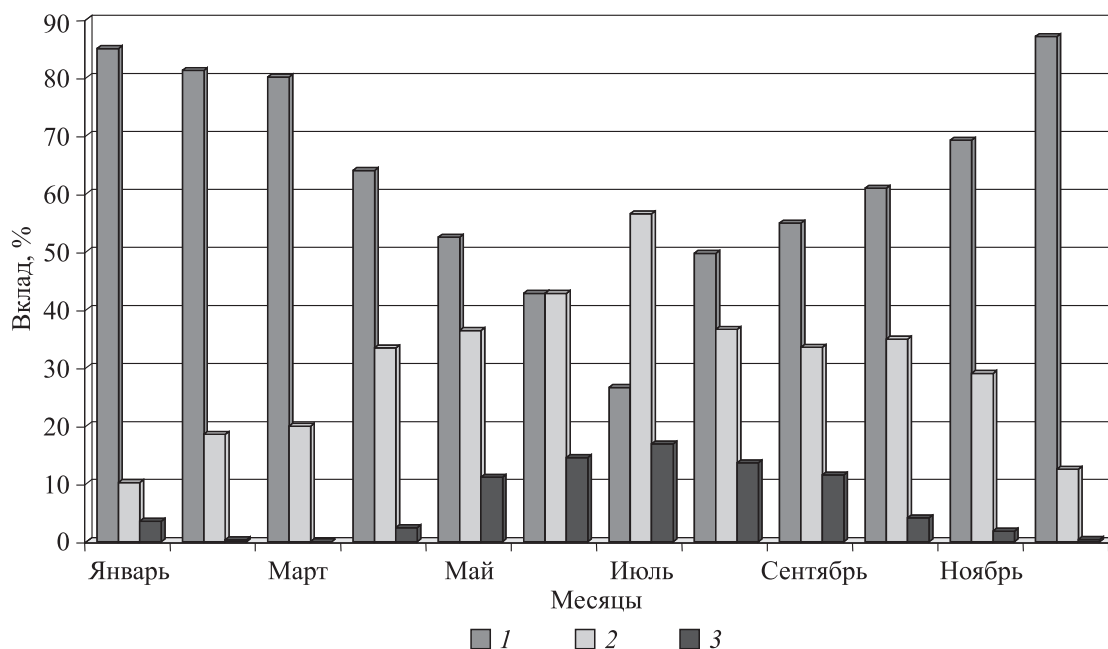
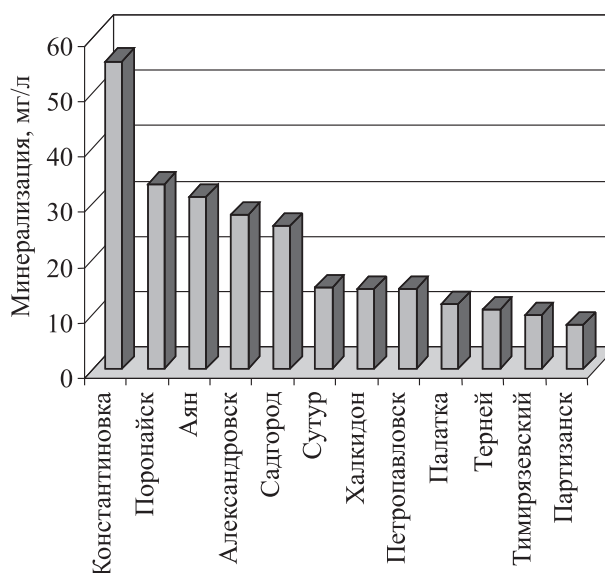


Рис. 1. Сезонная изменчивость вкладов (%) направлений переноса воздушных масс на юг РДВ в 2002–2005 гг.

Секторы: 1 — север Дальнего Востока и Сибири; 2 — Центральный Китай; 3 — Японское море.

Рис. 2. Минерализация осадков на станциях национальной сети мониторинга в 2004 г.



показали, что снежный покров в эту зиму сформировался благодаря выходу на Приморье пяти циклонов [13]. Четыре из них зародились в Желтом море и Восточном Китае — в самой обширной зоне эмиссии в Восточной Азии, а пятый циклон в чистых воздушных массах Восточной Монголии, и принесенные им осадки имели более высокий кислотно-щелочной показатель. Возможно, не все южные циклоны принесли одинаково кислые осадки, но в той или иной степени они включили в свою циркуляцию загрязненные воздушные массы.

Полученные результаты навели на мысль изучить динамику химического состава осадков по данным сети мониторинга. В Дальневосточном регионе национальная сеть представлена 12 станциями: Садгород, Тимирязевский, Халкидон, Партизанск (Приморский край), Аян (Хабаровский край), Палатка (Магаданская область), Петропавловск (Камчатская область), Александровск, Поронайск (Сахалинская область) и др. Кроме того, с 2001 г. функционирует станция международной сети EANET. Определение pH и основных ионов в осадках проводятся в региональной лаборатории Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Один из показателей химического состава осадков — их минерализация. В 2004 г. наиболее высокий уровень минерализации был отмечен на самой западной станции региона — Константиновке, а самый низкий — в Партизанске (рис. 2).

Так как значительная часть станций мониторинга осадков расположена на побережье, целесообразно из суммарной концентрации сульфат-иона выделить составляющую, обусловленную морской солью. Для вычисления концентраций ионов без вклада морской составляющей (non sea-salt) использовались соотношения, обычно применяемые в зарубежной научной литературе:

$$\text{nss-SO}_4^{2-} = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+]_{\text{ss}} \times [\text{Na}^+], \quad \text{nss-Ca}^{2+} = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+]_{\text{ss}} \times [\text{Na}^+],$$

где nss-SO_4^{2-} и nss-Ca^{2+} — концентрации ионов за вычетом вклада морской составляющей; $[\text{SO}_4^{2-}]$ и $[\text{Ca}^{2+}]$ — суммарная измеренная концентрация в осадках; $[\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+]_{\text{ss}}$ и $[\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+]_{\text{ss}}$ — отношение концентраций ионов в морской воде; $[\text{Na}^+]$ — концентрация натрия в осадках.

В осадках всех станций региона, кроме Аяна, Александровска и Поронайска, преобладают сульфаты. Три станции, составляющие исключение, расположены вблизи побережья, здесь на химический состав осадков оказывает влияние морской аэрозоль, что и объясняет преобладание ионов хлора. Также значительное влияние морского аэрозоля прослеживается на станциях Садгород, Партизанск, Приморская, Петропавловск и Терней. Последняя расположена на побережье, но преобладающие большую часть года ветра с континента не благоприятствуют поступлению аэрозоля в прибрежную зону. На указанных станциях хлориды занимают второе место.

Такое же соотношение сульфатов и хлоридов наблюдается на самой удаленной от побережья станции — Константиновке. Для нее характерны наиболее высокие в регионе концентрации всех ионов. Если исключить систематическую погрешность при отборе проб, можно предположить влияние локального загрязнения атмосферы городов Благовещенск и быстро растущего Хейхе (китайский берег Амура), находящихся примерно в 100 км северо-западнее, а также в целом всей территории Северо-Восточного Китая. До некоторой степени высокий уровень концентраций ионов на этой станции обусловлен сравнительно меньшим количеством выпадающих осадков. На химическом составе осадков на станциях Аян, Поронайск и Палатка также, видимо, сказывается влияние локального загрязнения атмосферы. Трудно объяснить чем-либо другим относительно высокие концентрации сульфатов и нитратов в местах, столь удаленных от центров эмиссии.

Кальций (nss-Ca) — элемент терригенного происхождения — занимает второе место по уровням концентраций на станциях Тимирязевский, Халкидон, Сутур и Палатка. Из числа представленных в анализе ионов нитраты повсеместно занимают четвертое и пятое места по уровням концентраций.

Двенадцать станций мониторинга на столь обширной территории не могут в полной мере отразить истинную пространственную изменчивость химического состава осадков. Так, по данным ст. Петро-

павловск-Камчатский трудно судить о химическом составе осадков на всем п-ове Камчатка. Данные, получаемые на береговых станциях, отражают химический состав осадков узкой прибрежной полосы. Эти факторы приходится учитывать при обобщении материалов.

Ряд станций расположен в наиболее населенных районах юга Дальневосточного региона. К ним относятся станции Садгород (пригород Владивостока), Тимирязевский (пригород Уссурийска), Халкидон (вблизи крупного транспортного узла и горнодобывающих предприятий). Химический состав осадков на них трансформируется под влиянием локального антропогенного загрязнения атмосферы. В наибольшей степени отражают регионально-фоновый химический состав осадков данные станций Приморская (ЕАНЕТ), Терней и Партизанск (национальная сеть).

Рост объемов выбросов в атмосферу в странах Восточной Азии неизбежно отразился на динамике химического состава осадков Дальневосточного региона. Проследить ее позволили материалы многолетних наблюдений национальной сети мониторинга химического состава осадков. Среднегодовая изменчивость pH осадков и концентрации сульфатов иллюстрирует рис. 3.

На семи станциях юга РДВ в последние 15–25 лет отмечаются понижение pH осадков и повышение концентраций сульфатов [13, 14]. Наиболее отчетливо эта тенденция прослеживается на станциях Приморского края. Аналогичная тенденция наблюдается и для концентраций нитратов в осадках. На ст. Константиновка понижение pH осадков не прослеживается, но отмечается стремительный рост концентраций сульфатов, нитратов и общей минерализации, особенно с 2000 г. Быстрее всего понижение кислотно-щелочного показателя происходит на ст. Партизанск. Уже в конце прошлого века среднегодовые значения pH в Партизанске опустились ниже 5,6, т. е. осадки стали кислыми. В последующие годы понижение продолжалось. На остальной территории Дальневосточного региона, если тенденция сохранится, осадки станут кислыми в конце следующего десятилетия.

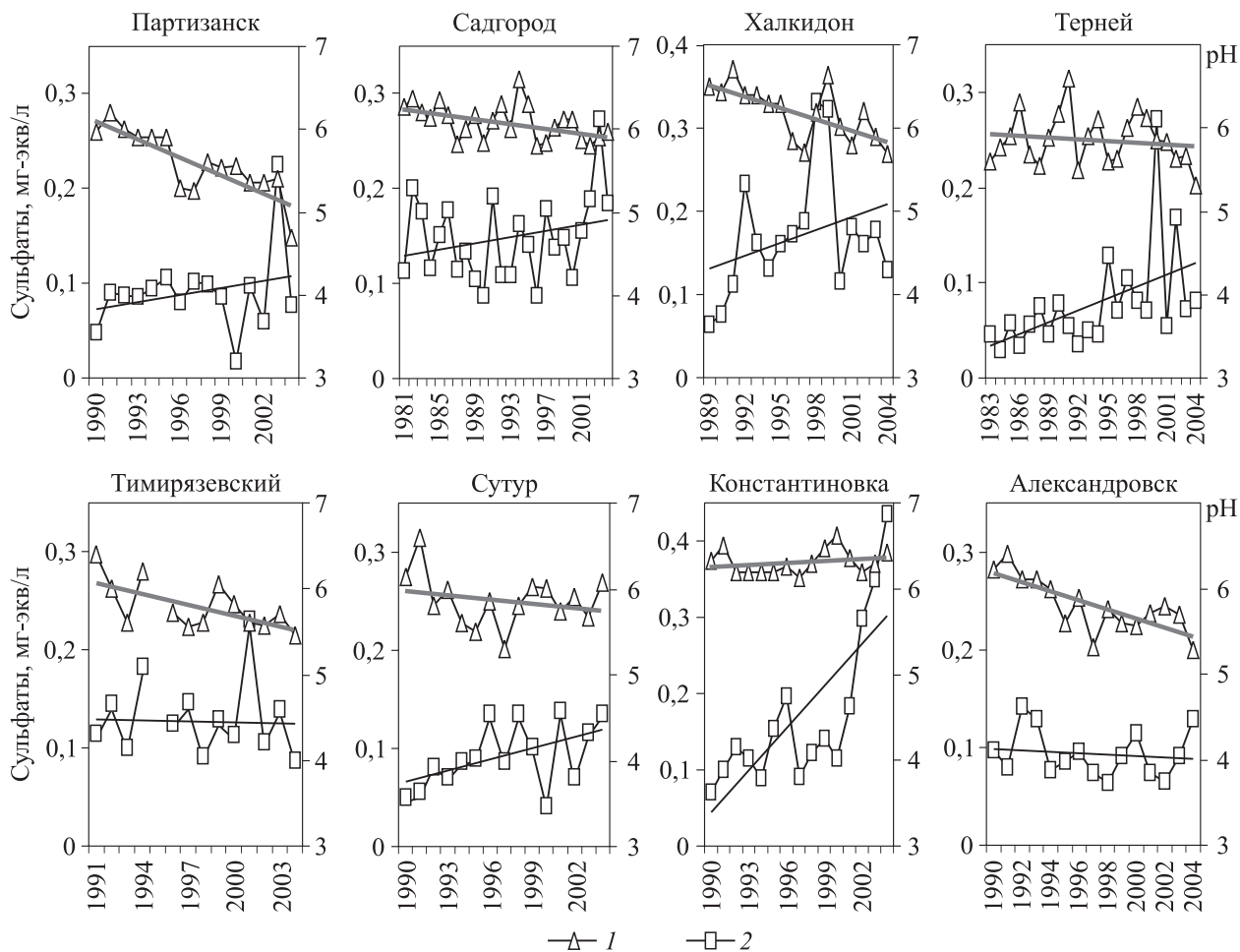


Рис. 3. Динамика среднегодовой изменчивости pH осадков (1) и концентраций сульфатов (2) на станциях национальной сети мониторинга юга Дальнего Востока России.

Но это прогноз по осредненным за год значениям, а по сравнению со средним значением отдельные осадки в течение года могут иметь меньший или больший кислотный показатель. Один кислотный дождь может нанести столь непоправимый вред биоте, что даже если после него выпадут менее кислые осадки, они не изменят ситуацию к лучшему. К сожалению, мы не располагаем данными по каждому дождю на всех станциях, а оперируем только среднемесячными значениями. Но и они в течение года заметно варьируют. Выбор минимальных среднемесячных значений кислотного показателя осадков за год наблюдений показал, что они ниже среднегодовых на целую единицу значений pH.

Таким образом, кислотные дожди периодически выпадают на юге Дальнего Востока, начиная с 1990-х гг., и кислотность осадков с каждым годом повышается. Конечно, в отдельные годы наблюдаются отклонения в сторону повышения или понижения pH, но тенденция сохраняется [14].

Совокупность нескольких факторов, а именно, особенностей атмосферной циркуляции в регионе и роста эмиссии в Китае, определила быстрое повышение кислотности осадков на юге РДВ, которое отчетливо просматривается буквально на протяжении нескольких последних лет. В качестве примера приведем результаты исследований частоты повторения pH осадков на ст. Приморская сети EANET для интервалов 0,4 ед. в 2003–2007 гг. (рис. 4).

Уже в 2003 г. 52 % осадков за год имели pH ниже 5,6, т. е. были кислыми. В этом году прослеживалось два максимума числа осадков с pH в интервалах 4,4–4,79 и 6,4–6,79. В следующие два года вклад осадков с pH ниже 5,6 оставался практически стабильным, в 2005 г. он даже понизился до 46 %, и максимумы числа осадков приходились на интервалы pH 5,6–5,99. В 2006 и 2007 гг. вклад осадков с pH ниже 5,6 быстро увеличивался и составлял уже 59 и 75 % соответственно. При этом в 2007 г. максимальное число осадков имело pH в интервале 4,4–4,79. С 2005 г. не было зарегистрировано ни одного случая осадков с pH выше 7,2. В последний год наблюдений впервые был зафиксирован случай выпадения осадков с pH, равным 3,66, что представляет собой рекордно низкое значение, заре-

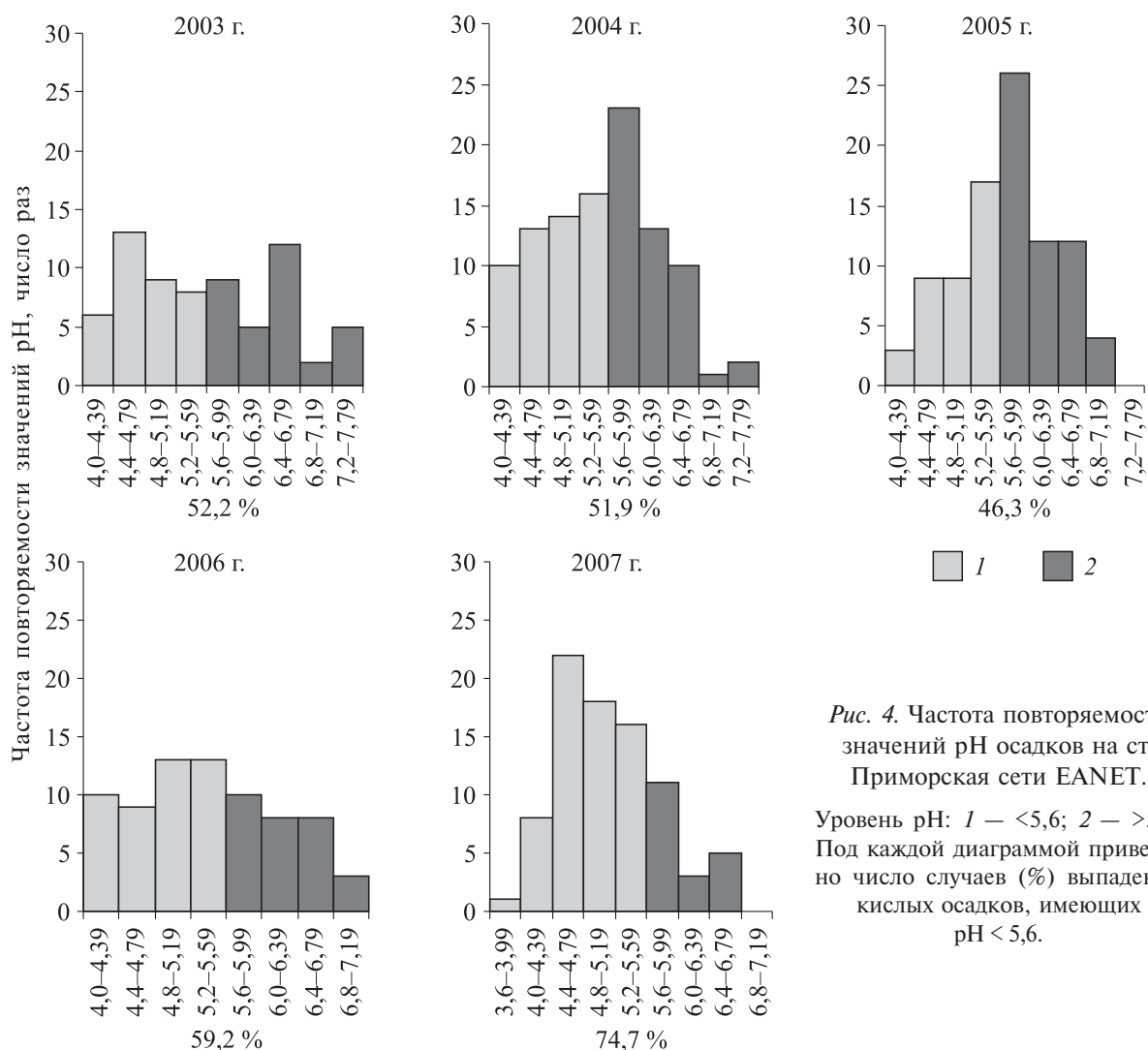


Рис. 4. Частота повторяемости значений pH осадков на ст. Приморская сети EANET. Уровень pH: 1 — <5,6; 2 — >5,6. Под каждой диаграммой приведено число случаев (%) выпадения кислых осадков, имеющих pH < 5,6.

гистрированное на юге региона. Видимо, основную роль в столь быстром повышении кислотности осадков сыграли более частые выносы воздушных масс с юго-восточных румбов при все возрастающем потоке выбросов загрязняющих веществ в Китае.

При общем застое в экономике и отсутствии значительных источников эмиссии в Дальневосточном регионе России тенденция к понижению рН осадков может быть объяснена только трансграничным переносом кислотообразующих поллютантов из сопредельных стран, главным образом из Китая. От кислотных осадков в первую очередь страдают лишенофлора и гидробионты пресноводных водоемов.

На юге Дальнего Востока давно отмечаются все более широкое распространение лишайников, устойчивых к атмосферному загрязнению, и угнетенное состояние или исчезновение чувствительных к загрязнению [15]. Для гидробионтов особую опасность представляют залповые повышения кислотности вод в период весеннего таяния снега, когда почва еще не оттаяла и кислые талые воды скатываются в реки и озера. Кислотные осадки негативно сказываются на численности и составе бактерий и грибов почвы, приводят к усыханию хвойных лесов и понижению урожайности сельскохозяйственных культур, ускоряют коррозию металлических конструкций и разрушение архитектурных памятников.

К непрерывно растущему загрязнению атмосферы в городах, где проживает основная часть населения Дальнего Востока, добавляется загрязнение, приносимое воздушными потоками из-за границы. Если ареалы и уровни локального загрязнения относительно невелики (кроме больших городов) и управляемы, то трансграничный перенос оказывает воздействие на всю территорию, и изменение ситуации возможно только по воле сопредельных стран. Если не произойдет кардинальных изменений в циркуляции атмосферы, что маловероятно, негативное воздействие на окружающую среду региона отчетливо проявится в следующем десятилетии. Уже сейчас необходимо донести эту информацию до властных структур государства и начать исследования состояния природных сред, учитывая влияние атмосферного трансграничного переноса загрязняющих веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю. А., Назаров И. М., Пресман А. Я. и др. Кислотные дожди. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 203 с.
2. National Report of Japan on Atmospheric Deposition of Contaminants into the Marine and Coastal Environment in the NOWPAP Region: Report of the 1st Joint Meeting of Northwest Pacific Action Plan and Pollution Monitoring Regional Activity Center Working Groups. — Vladivostok, 2004. — 50 p.
3. Kato N. Analysis of structure of energy consumption and dynamics of emission of atmospheric species related to the global environmental change (SO_x, NO_x, and CO₂) in Asia // Atmos. Environment. — 1996. — Vol. 30, № 5. — P. 757–785.
4. Streets D. G., Waldhoff S. T. Present and future emissions of pollutants in China: SO₂, NO_x and CO // Atmos. Environment. — 2000. — № 34. — P. 363–374.
5. Dastoor F. P., Pudykiewicz J. A numerical global meteorological sulfur transport model and its application to arctic air pollution // Atmos. Environment. — 1996. — Vol. 30, № 9. — P. 1501–1522.
6. Feichter J., Kjellstrom E., Rodhe H. et al. Simulation of the tropospheric sulfur cycle in a global climate model // Atmos. Environment. — 1996. — Vol. 30, № 10–11. — P. 1693–1707.
7. Kim J., Cho S.Y. A numerical simulation of present and future acid deposition in North East Asia using a comprehensive acid deposition model // Atmos. Environment. — 2003. — № 37. — P. 3375–3383.
8. Murano K., Mukai H., Hatakeyama S. et al. Trans-boundary air pollution over remote islands in Japan: observed data and estimates from a numerical model // Atmos. Environment. — 2000. — № 34. — P. 5139–5149.
9. Park S-U., Lee E-H. Long-range transport contribution to dry deposition of acid pollutants in South Korea // Atmos. Environment. — 2003. — № 37. — P. 3967–3980.
10. Terada H., Ueda H., Wang Z. Trend of acid rain and neutralization by yellow sand in east Asia — a numerical study // Atmos. Environment. — 2002. — № 36. — P. 503–509.
11. Кондратьев И. И., Качур А. Н., Юрченко С. Г. и др. Синоптические и геохимические аспекты аномального выноса пыли на юге Приморского края // Вестн. ДВО РАН. — 2005. — № 3. — С. 55–65.
12. Кондратьев И. И., Качур А. Н. Роль орографических и климатических факторов в формировании химического состава снежного покрова Сихотэ-Алинского биосферного региона // География и природ. ресурсы. — 2004. — № 1. — С. 112–117.
13. Кондратьев И. И. Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии в Восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестн. ДВО РАН. — 2008. — № 1. — С. 107–113.
14. Тенденции в динамике рН осадков в Дальневосточном регионе Российской Федерации // Метеорол. и гидр. — 2007. — № 4. — С. 89–100.
15. Скирина И. Ф., Коженкова С. И. Лихеноиндикация загрязнения приземного воздуха города Находка (Приморский край) // Ботан. журн. — 2005. — № 8. — С. 1184–1196.