

И.И. КОНДРАТЬЕВ*, **М.А. ГРИШИНА****, **Л.И. МЕЗЕНЦЕВА***

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690049, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия, igor@tig.dvo.ru

**Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
690009, Владивосток, ул. Фонтанная, 24, Россия, lilium-90@yandex.ru, LMezenceva@ferhri.ru

ЗАВИСИМОСТЬ ВЛАЖНЫХ ВЫПАДЕНИЙ СУЛЬФАТОВ И НИТРАТОВ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ ОТ ТРАЕКТОРИИ ЦИКЛОНОВ

Проведен анализ траекторий циклонов за 2003–2013 гг. с целью исследования влияния их генезиса на формирование потока влажных выпадений кислотообразующих веществ на территории Приморского края и части акватории Японского моря. Учитывались все циклоны, пересекающие границы района в исследуемый период. В зависимости от мест формирования и траекторий движения выделено семь типов циклонов. Для каждого из них показаны годовая и сезонная изменчивость количества, а также давления в центре циклонов. Для осадков, выпадавших на станции ЕАНЕТ Приморская, рассчитаны концентрации и потоки выпадений сульфатов и нитратов для каждого типа циклонов. Показано, что более половины всех сульфатов и нитратов выпадало на станции с осадками, вызванными выходом циклонов, сформировавшихся за пределами территории Российской Федерации. Об общих источниках поступления кислотообразующих веществ в осадки пяти типов циклонов свидетельствует наличие значимой корреляционной зависимости изменчивости среднегодовых потоков выпадений сульфатов и нитратов в осадках этих циклонов.

Ключевые слова: количество осадков, сульфаты, нитраты, плотность выпадений, трансграничный перенос, корреляционный анализ.

I.I. KONDRATYEV*, **M.A. GRISHINA****, **L.I. MEZENTSEVA****

*Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
690049, Vladivostok, ul. Radio, 7, Russia, igor@tig.dvo.ru

**Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
690009, Vladivostok, ul. Fontannaya, 24, Russia, lilium-90@yandex.ru, LMezenceva@ferhri.ru

DEPENDENCE OF WET DEPOSITIONS OF SULFATES AND NITRATES IN PRIMORSKII KRAI ON CYCLONE TRAJECTORIES

An analysis is made of the cyclone trajectories for 2003–2013 in order to gain insight into the influence of their genesis on the generation of the flow of wet depositions of acid-forming substances over the territory of Primorsky krai and a part of the water area of the Sea of Japan. All the cyclones crossing the region of interest during the period under investigation have been considered. Seven types of cyclones have been identified according to the location of their genesis and trajectories. Annual and seasonal variability of their number of occurrence as well as variability in pressure at the cyclone center has been shown for each of them. Using precipitation data from EANET monitoring station Primorskaya, concentrations and deposition fluxes of sulfates and nitrates have been calculated for each cyclone type. It is shown that more than half of all sulfates and nitrates deposited at the stations with precipitation caused by the cyclones originating outside the territory of the Russian Federation. A significant correlation of variability in mean annual deposition fluxes of sulfates and nitrates in precipitation of these cyclones is indicative of the common sources of input of acid-forming substances into precipitation of the five cyclone types.

Keywords: precipitation amount, sulfates, nitrates, deposition density, transboundary transport, correlation analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Приморский край, как и большая часть юга Дальнего Востока, относится к муссонной области умеренной зоны [1, 2]. Распределение большинства метеорологических параметров имеет явно выраженный сезонный характер. Так, порядка 80 % осадков выпадает в летний период [3, 4]. Наряду с чрезвычайно дождливыми, в Приморье бывают и засушливые годы. Среднее годовое количество

осадков, выпадавших во Владивостоке за период с 1941 по 2010 г., изменялось от 510 мм в 1997 г. до 1272 мм в 1974 г. [5]. Одна из особенностей летних процессов — это выход тайфунов на юг Дальнего Востока, которые представляют собой одну из главных причин катастрофических наводнений в Приморском и Хабаровском краях [6].

Основная масса осадков выпадает в результате выхода циклонов, которые также могут вызвать наводнения. При этом затопляются сельскохозяйственные угодья и населенные пункты. В то же время недостаток осадков приводит к засухам и проблемам водоснабжения городов юга Дальнего Востока. С осадками на подстилающую поверхность поступают вещества, в том числе и загрязняющие, которые могут негативно влиять на биоту и нарушать баланс круговорота веществ в природных средах. Вещества вымываются из атмосферы в процессе выпадения осадков, последние также могут быть изначально загрязнены в местах формирования циклонов. В тех случаях, когда загрязненные осадки приносятся с территорий сопредельных государств, говорят о трансграничном переносе.

В Северо-Восточной Азии проблема трансграничного переноса загрязняющих веществ становится все более актуальной в связи с растущей эмиссией в промышленных центрах региона. Крупнейший источник выбросов в атмосферу представляет собой Китай. В первые десятилетия быстрого экономического роста в КНР не обращали внимание на проблемы экологии. В конце XX в. на Китай приходилось до 40 % всех выбросов оксидов серы и азота в Северо-Восточной Азии, и эмиссия продолжает расти [7–10]. В последние десятилетия в стране принимаются меры по снижению выбросов в атмосферу. За последние 20 лет значительно сократилось использование каменного угля в промышленных центрах, но за пределами промышленных районов его потребление осталось на прежнем уровне [11]. Изменение состава потребляемого топлива в промышленных центрах сказалось на составе выбросов. Уменьшилась эмиссия оксидов серы, но продолжился рост выбросов оксидов азота [11]; данные вещества повышают кислотность осадков и могут переноситься воздушными потоками на большие расстояния.

Для контроля трансграничного переноса кислотных осадков странами Северо-Восточной Азии была создана международная сеть станций мониторинга химического состава осадков (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia – EANET). Одна из станций EANET (Приморская) функционирует с 2002 г. в Приморском крае.

Анализ данных мониторинга показал, что на юге Дальнего Востока на протяжении последних 30 лет наблюдается повышение кислотности осадков и рост концентраций кислотообразующих веществ [12–15]. Объемы выбросов в атмосферу на территории Дальнего Востока значительно сократились в 1990-х гг. и только в 2000-х гг. достигли уровня конца 1980-х гг. [16, 17]. Поэтому небезосновательно предположение, что рост кислотности осадков происходит в результате их трансграничного переноса.

Осадки на юг Дальнего Востока приносят циклоны, которые, как правило, формируются за его пределами, в том числе и в загрязненной атмосфере Восточного Китая. Анализ их траектории показал, что осадки циклонов, переместившихся на Приморский край с территории КНР, содержали повышенные концентрации кислотообразующих веществ [18].

В данной работе представлены результаты, которые являются продолжением ранее опубликованных исследований [18]. Учитывая накопленный опыт, на 10° по широте уменьшен район, в котором регистрировались циклоны, проведен анализ сезонной изменчивости их количества и давления в центре. Для каждого типа определены годовое количество осадков, потоки влажных выпадений сульфатов и нитратов на станции EANET Приморская. Исследования проведены для периода 2003–2013 гг. Актуальность исследования определяется как климатическим, так и экологическим воздействием осадков, оказываемым на окружающую среду и хозяйственную деятельность в регионе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Закономерности перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Азии изучались в 1950-х гг. В.Л. Архангельским, который обобщил обширный материал за период с 1945 по 1955 г. [19].

Исследования траекторий циклонов, скоростей их перемещения и наиболее вероятных мест формирования в Восточной Азии были проведены учеными из КНР для периода 1958–2001 гг. [20]. Использовался компьютерный метод выявления местоположения циклонов на основе алгоритма объективной оценки локальных минимумов давления. Было показано, что существуют три основных региона циклогенеза: Монголия (центральная область), восточное побережье Китая — северо-западная часть Тихого океана (восточная область) и Западносибирская равнина (западная область). Было показано, что продолжительность жизни циклонов изменяется от 1 до 7 сут, но, как правило, состав-

ляет 1–2 сут. Относительно более короткая продолжительность жизни характерна для зимних циклонов. По сравнению с ручным объективный метод обнаружения и отслеживания областей пониженного давления более производительен и позволяет выявлять на 10–15 % больше циклонов [20].

Основная цель настоящей работы — это исследование изменчивости потока влажных выпадений кислотообразующих веществ в зависимости от типа циклонов, принесших осадки на юг Приморского края. Для этого был проведен анализ траекторий циклонов для района, ограниченного 40 и 50° с. ш. и 130 и 140° в. д., включающего территорию Приморского края и часть акватории Японского моря (рис. 1). Учитывались циклоны, очерченные хотя бы одной изобарой, в том числе частные и волновые, траектории центров которых пересекали границы выделенного района. Траектория прослеживалась минимум за трое суток до и после пересечения границ. Для всех циклонов фиксировались даты их пребывания в районе.

Попытка провести анализ для периода с начала 1980-х гг. не увенчалась успехом. Карты сборной кинематики для отдельных периодов имели различное и часто недостаточное разрешение, что приводило к потере данных. Наиболее репрезентативными были материалы Отдела метеорологических прогнозов Приморского УГМС, начиная с 2002 г. Нами была использована классификация циклонов по признаку траекторий, предложенная В.Л. Архангельским [19].

В зависимости от районов формирования и путей перемещения циклонов были выделены семь типов циклонов (см. рис. 1). Каждому из них присваивался уникальный номер и статус (тип), который определялся траекторией его перемещения: 1 — ныряющие циклоны, перемещаясь над Сибирью, в восточном секторе изменяют свое направление на юго-восточное и часто выходят на территорию Приморского края; 2 — западные-1 циклоны зарождаются над Забайкальем и Монголией, обычно перемещаются по долине Амура и выходят на Приморье севернее 45° с. ш.; 3 — западные-2 формируются в Монголии и северо-восточных провинциях Китая; 4 — юго-западные зарождаются над Желтым морем, восточными провинциями Китая (Аньхой, Чжэцзян, Цзянсу), Корейским полуостровом и перемещаются в северо-восточном направлении; 5 — южные циклоны (часто это циклоны

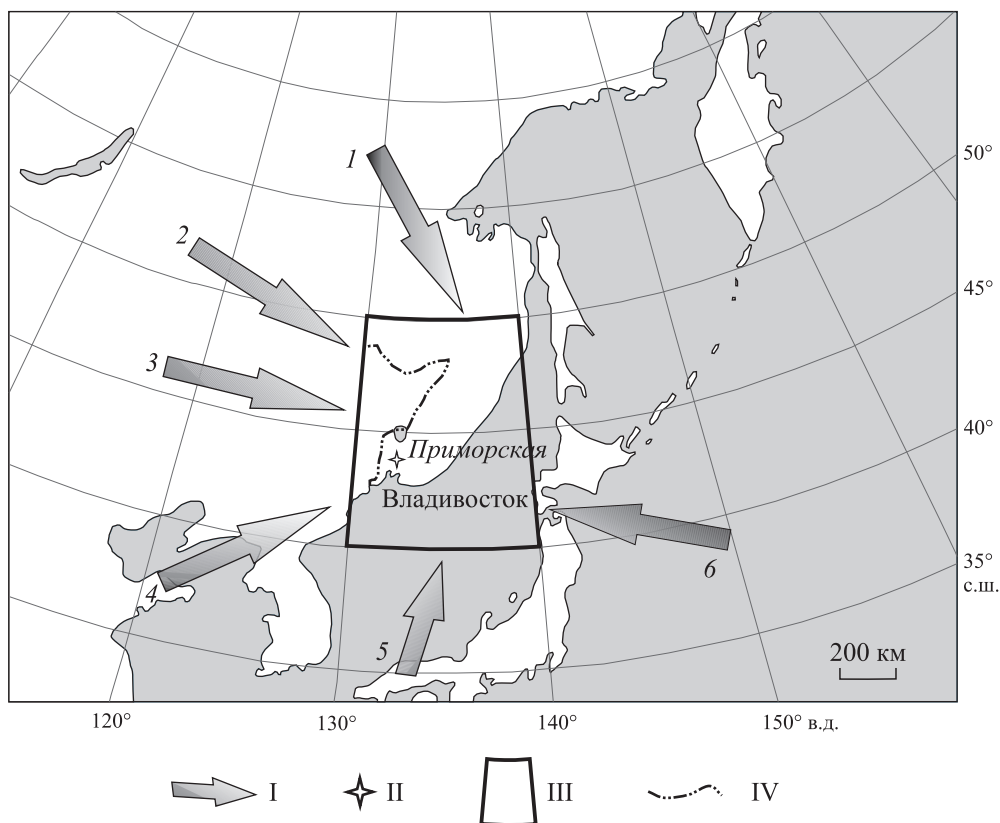


Рис. 1. Район воздействия циклонов различных категорий.

Типы циклонов: 1 — ныряющие, 2 — западные-1, 3 — западные-2, 4 — юго-западные, 5 — южные, 6 — восточные.

тропического происхождения или образующиеся вблизи юго-восточного побережья Азии), как правило, выходят по меридиональным траекториям с юга на север, вынося с собой воздушные массы тропического происхождения; 6 — восточные циклоны перемещаются с востока, юго-востока на северо-запад, запад. Была выделена еще одна категория циклонов — частные. К ним отнесены циклоны, которые зародились непосредственно над выделенной территорией, а также те, чей статус было затруднительно определить.

Для анализа изменчивости химического состава осадков и их количества были использованы данные станции Приморская международной сети EANET. Станция расположена примерно в 100 км севернее г. Владивостока и 30 км восточнее г. Уссурийска. Осадки отбираются на станции унифицированным для всей сети EANET методом. Анализ химического состава осадков производился в лаборатории мониторинга загрязнения атмосферы и почв Приморского центра мониторинга окружающей среды. 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 анализов систематически тестируются как в лаборатории, проводящей анализы, так и в центре EANET.

На этой станции пробы осадков в случае их выпадения отбираются каждые сутки в 9 ч по местному времени. В них определялись концентрации: SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , HCO_3^- , а также показатель pH и электропроводность. Для анализа использовались данные о количестве осадков, суммарные за год данные плотности потока влажных выпадений сульфатов и нитратов на этой станции. Рассматривались только те циклоны, осадки которых были зарегистрированы на этой станции, т. е. при совпадении дат выпадения осадков и выхода зарегистрированных циклонов в выделенный район. Количество циклонов и осадков, а также потоки влажных выпадений были рассортированы в соответствии с типами циклонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период с 2002 по 2013 г. в выделенный район наиболее часто циклоны направлялись с юго-запада, северо-запада и запада, в среднем за год на эти направления приходилось 73,5 % всех случаев выхода циклонов (табл. 1). Для оценки степени воздействия трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Приморского края наибольший интерес представляют юго-западные и западные-2 (выходящие южнее 45° с. ш.) циклоны, которые формируются в загрязненной атмосфере урбанизированных районов Китая. Количество таких циклонов за период с 2002 по 2013 г. составляло 31 и 16 % соответственно от общего их числа всех типов циклонов.

Динамика циклонической активности в анализируемый период проявилась в увеличении частоты выхода юго-западных циклонов в 2008, 2009 и 2010 гг. В 2009 г. было зарегистрировано максимальное количество циклонов (101), в основном за счет юго-западных и западных-1. В последующие годы

Таблица 1

Количество циклонов шести типов, вышедших на территорию Приморского края в 2002–2013 гг.

Год	Тип циклона							
	Все типы	Ныряющие	Западные-1	Западные-2	Юго-западные	Южные	Частные	Восточные
2002	85	16	20	12	27	7	2	1
2003	76	20	22	11	18	5	0	0
2004	98	16	23	15	35	7	1	1
2005	75	11	21	14	26	3	0	0
2006	83	23	19	9	28	4	0	0
2007	77	17	15	13	27	5	0	0
2008	87	9	27	12	34	4	1	0
2009	101	15	26	23	36	1	0	0
2010	78	6	24	13	29	4	1	1
2011	70	20	15	13	18	3	1	0
2012	68	6	25	10	11	12	4	0
2013	74	15	19	13	14	7	6	0
Сумма	972	174	256	158	303	62	16	3
Среднее	81,0	14,5	21,3	13,2	25,3	5,2	1,3	0,3

исследуемого периода частота выхода юго-западных циклонов сокращалась и достигла минимума в 2012 г. По частоте выхода в выделенный район циклоны распределялись в следующем порядке: юго-западные, западные-1, ныряющие, западные-2, южные, частные и восточные. За период 2002–2013 гг. было зарегистрировано только три восточных циклона.

Наиболее часто в изучаемый район циклоны выходили в феврале и весенние месяцы (табл. 2). В среднем меньшее их количество регистрировалось в июне. Кроме южных и частных циклонов все остальные регистрировались во все месяцы года. Западные-1 и западные-2 циклоны были наиболее активны в первую половину года, юго-западные чаще оказывали влияние на Приморье в мае и октябре, а ныряющие — в зимние месяцы, марте и апреле.

Сезонная изменчивость среднемесячного давления для западных-2, юго-западных и ныряющих циклонов характеризовалась его понижением от зимних месяцев к летним с минимумом в июне–июле. Для южных характерен обратный годовой ход — давление в их центре растет к лету и в августе достигает максимума. В среднем наиболее глубокими были южные циклоны, а наименее — ныряющие (табл. 3). Минимальное за год количество осадков в период 2003–2013 гг., по данным станции Приморская, было зарегистрировано в 2003 г., максимальное — в 2007 г. За анализируемый период больше всего осадков было вызвано выходом юго-западных циклонов, на них приходилось в среднем 44 % от общей суммы всех осадков (рис. 2). Максимальное количество осадков, вызванных циклонами этой категории, было зарегистрировано в 2007 г. — 683 мм/год, что составляло 73 % от общей суммы. При этом в выделенный район вышло только 27 юго-западных циклонов в год, что меньше их максимального количества, зарегистрированного в 2009 г. (см. табл. 1). Начиная с 2010 г. наблюдалось постепенное сокращение количества осадков, причиной которых были юго-западные циклоны. Вклад южных циклонов в суммарное количество осадков за весь анализируемый период составил 15 % и достиг максимума в 2012 г. — 38 % (345 мм/год).

Количество осадков, вызванных выходом ныряющих циклонов, варьировало от 3,4 мм/год в 2003 г. до 121 мм/год в 2013 г., западных-1 — от 25 мм/год в 2004 г. до 130 мм/год в 2008 г., западных-2 — от 19 мм/год в 2003 г. до 195 мм/год в 2009 г. Максимальное количество осадков, ставших результатом частных циклонов, отмечалось в 2005 (194 мм/год) и 2012 гг. (185 мм/год). Можно предположить, что частные циклоны преимущественно сформировались как волновые в границах выделенного района.

Таблица 2

Среднемесячное количество шести типов циклонов, вышедших на территорию Приморского края в 2002–2013 гг.

Тип циклона	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Все типы циклонов	5,9	7,9	7,8	8,0	7,5	4,9	6,7	6,2	5,6	7,2	6,9	6,6
Ныряющие	1,9	2,1	1,7	2,0	0,9	0,7	0,3	0,8	0,6	0,6	0,8	2,2
Западные-1	1,4	1,9	2,5	2,0	2,0	1,3	1,8	1,3	1,5	1,8	2,0	1,7
Западные-2	0,7	2,0	1,9	1,5	1,4	0,8	1,1	0,3	0,7	1,1	1,1	0,9
Юго-западные	1,8	1,8	1,4	2,0	2,9	1,8	2,6	2,7	1,5	2,9	2,5	1,3
Южные	0,0	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,8	1,0	1,3	0,6	0,3	0,3
Частные	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблица 3

Среднемесячное давление в центрах шести типов циклонов в 2002–2013 гг.

Тип циклона	Месяц												Среднее
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Ныряющие	1015	1012	1005	1005	1002	1001	999	1004	1010	1007	1012	1012	1008
Западные-1	0013	1010	1003	1002	1000	1000	1001	1001	1003	1008	1008	1013	1005
Западные-2	1017	1009	1007	1003	1003	1002	1001	1001	1008	1009	1010	1014	1007
Юго-западные	1004	1001	998	1001	999	998	1001	1001	1006	1006	1005	1003	1002
Южные	—	—	985	985	996	997	1000	1001	997	998	997	996	997

Примечание. Прочерк — нет данных.

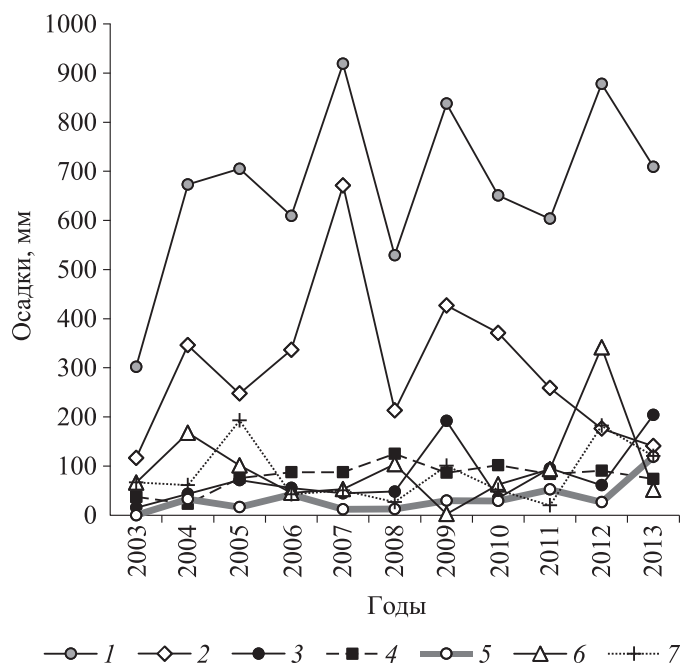


Рис. 2. Годовое количество осадков циклонов различных категорий на станции Приморская в 2003–2013 гг.

Суммарное годовое количество осадков, выпавших в результате: 1 — всех циклонов, 2 — ныряющих, 3 — западных-1, 4 — западных-2, 5 — юго-западных, 6 — южных, 7 — частных.

В среднем за 11-летний период юго-западные циклоны за счет большего количества осадков давали наибольший вклад в суммарный поток влажных выпадений сульфатов и нитратов (соответственно, 43 и 40 % от всех типов циклонов). В 2007 г. вклад этих соединений в осадках данных циклонов достигал 70 и 64 %, а в 2012 г. сократился до 14 и 10 % соответственно (табл. 4).

В 2011 г. было зарегистрировано превышение потока выпадений нитратов над сульфатами. От всех типов циклонов поток выпадений сульфатов в этом году составлял

0,68 г/м² в год, а нитратов — 1,35 г/м² в год. Поток выпадений нитратов в 2011 г. увеличился преимущественно за счет осадков юго-западных и западных-2 циклонов. Безошибочно определить тип циклона в месте пересечения границы выделенного участка в отдельных случаях бывает затруднительно, поэтому часть юго-западных циклонов могла быть отнесена к западным-2 и наоборот. Если объединить эти циклоны в одну группу, то на пришедшие с территории Китая приходилось в среднем за 11-летний период 47 % всех циклонов, 55 % осадков, 55 % потока сульфатов и 57 % потока нитратов, выпавших с осадками на станции Приморская. Если присоединить к данной группе южные циклоны, то на очевидно трансграничный перенос приходится 65 % сульфатов и 68 % нитратов.

В 2012 г. заметно увеличилось количество осадков южных циклонов (до 345 мм в год), поток влажных выпадений сульфатов и нитратов составил, соответственно, 36,3 и 36,8 % от общей суммы выпадений этих ионов в ходе всех типов циклонов в год. В 2013 г. суммарный поток сульфатов и нитратов был близок к средним значениям за период наблюдений и определялся в основном западными-1 циклонами.

Таблица 4

Плотность потока выпадений сульфатов и нитратов (г/(м²·год)) в осадках шести типов циклонов на станции Приморская в 2003–2013 гг.

Год	Тип циклонов											
	ныряющие		западные-2		западные-1		юго-западные		южные		частные	
	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃
2003	0,00	0,00	0,18	0,07	0,05	0,01	0,31	0,11	0,07	0,05	0,12	0,07
2004	0,11	0,05	0,02	0,03	0,15	0,16	0,77	0,69	0,26	0,20	0,21	0,07
2005	0,20	0,04	0,64	0,17	0,35	0,21	1,49	0,47	0,24	0,05	0,66	0,26
2006	0,44	0,12	0,28	0,14	0,22	0,14	1,62	0,68	0,08	0,05	0,31	0,12
2007	0,08	0,05	0,58	0,29	0,11	0,05	2,97	1,13	0,11	0,06	0,39	0,17
2008	0,12	0,05	0,67	0,35	0,22	0,11	0,77	0,46	0,47	0,31	0,11	0,07
2009	0,13	0,09	0,38	0,22	0,98	0,49	1,17	0,66	0,02	0,01	0,45	0,25
2010	0,04	0,02	0,54	0,27	0,21	0,08	1,28	0,55	0,23	0,12	0,20	0,10
2011	0,05	0,14	0,20	0,25	0,21	0,40	0,47	0,75	0,13	0,15	0,06	0,04
2012	0,13	0,16	0,34	0,25	0,25	0,32	0,34	0,18	0,87	0,70	0,46	0,28
2013	0,36	0,14	0,34	0,10	0,65	0,42	0,37	0,11	0,14	0,08	0,37	0,17
Среднее	0,15	0,08	0,38	0,19	0,31	0,22	1,05	0,53	0,24	0,16	0,30	0,15

Коэффициенты корреляции и доверительные интервалы среднегодовых выпадений сульфатов и нитратов шести типов циклонов, вызвавших осадки на станции Приморская в 2003–2013 гг.

		1		2		3		4		5		6	
		SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃	SO ₄	NO ₃
1	SO ₄		0,096	0,972	0,404	0,324	0,444	0,801	0,732	0,727	0,637	0,237	0,469
1	NO ₃	0,502		0,443	0,777	0,249	0,007	0,373	0,710	0,324	0,172	0,611	0,346
2	SO ₄	-0,011	-0,245		0,008	0,768	0,572	0,113	0,663	0,597	0,966	0,229	0,264
2	NO ₃	-0,266	0,091	0,719		0,973	0,995	0,311	0,278	0,285	0,340	0,905	0,745
3	SO ₄	0,312	0,361	0,095	-0,011		0,002	0,737	0,693	0,497	0,502	0,141	0,085
3	NO ₃	0,244	0,731	-0,181	0,002	0,800		0,244	0,643	0,961	0,772	0,343	0,175
4	SO ₄	0,082	-0,283	0,481	0,320	-0,108	-0,364		0,002	0,305	0,198	0,247	0,525
4	NO ₃	-0,111	-0,120	0,140	0,341	-0,128	-0,149	0,789		0,247	0,285	0,959	0,668
5	SO ₄	-0,113	0,312	0,170	0,337	-0,218	0,016	-0,324	-0,363		0,000	0,691	0,316
5	NO ₃	-0,152	0,422	-0,014	0,302	-0,215	0,094	-0,400	-0,336	0,970		0,996	0,463
6	SO ₄	0,370	0,164	0,376	-0,039	0,452	0,300	0,362	-0,017	0,128	0,002		0,000
6	NO ₃	0,232	0,298	0,350	0,105	0,517	0,419	0,204	-0,139	0,317	0,234	0,934	

Примечание. 1–6 — типы циклонов (см. табл. 4). Серым цветом выделены доверительные вероятности, жирным шрифтом — коэффициенты корреляции.

Статистический анализ с помощью программы Past3 показал, что весь массив данных годовых плотностей выпадений сульфатов и нитратов всех типов циклонов имеет нормальное распределение с $R = 0,87$, $\sigma = 0,0168$ и $t = 14,86$, где R — коэффициент корреляции; σ — среднеквадратическое отклонение; t — статистика, проверки наличия корреляции [20].

Для выявления корреляционной зависимости изменчивости выпадений сульфатов и нитратов за анализируемый период была использована табл. 4. Чтобы получить квадратную матрицу (12×12), были добавлены значения, осредненные за 11 лет. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5. Правее, выше диагонали, — доверительные интервалы, ниже — коэффициенты корреляции. При доверительной вероятности 0,02 положительная корреляционная зависимость годового потока выпадений сульфатов и нитратов составила для: западных-1 циклонов — 0,72, западных-2 — 0,8, юго-западных — 0,8, южных — 0,97 и неопределенных — 0,93. Для этих типов циклонов суммарные за год потоки выпадений сульфатов и нитратов в анализируемый период изменялись с большей или меньшей синхронностью. При этом не выявлено значимой зависимости изменчивости потоков сульфатов и нитратов для ныряющих циклонов. Между изменчивостью плотности выпадений для различных типов циклонов существует корреляционная зависимость только для нитратов, выпавших в результате ныряющих и западных-2 циклонов ($R = 0,73$). Проведенный анализ показал, что в среднем за 11-летний период каждый из шести типов циклонов отличался по плотности потоков выпадений и имел свои особенности соотношения сульфатов и нитратов в осадках. Для отдельных лет, а тем более отдельных осадков, характерна вариабельность концентраций и потоков выпадений для всех типов циклонов. На изменчивость потока влажных выпадений в анализируемый период на юге Приморского края, по-видимому, оказали влияние изменения состава выбросов в основных зонах эмиссии в Восточной Азии. Но основными факторами воздействия стали природные, а именно, изменчивость количества осадков, приносимых циклонами, формирующимися в различных географических зонах Восточной Азии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рост кислотности осадков на юге Дальнего Востока регистрируется с начала 1980-х гг. и по времени совпадает с быстрым экономическим развитием КНР. Широкое использование каменного угля, стремительный рост количества автомобилей определили все возрастающие объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в Китае. Учитывая западно-восточный перенос воздушных масс, естественно предположить, что рост кислотности осадков на Дальнем Востоке происходит в результате их переноса с территорий сопредельных стран. Для идентификации источников поступления кислотных осадков был предложен и апробирован метод совместного анализа химического состава осадков и синоптического материала. Анализировалась изменчивость потоков выпадений сульфатов и

нитратов в осадках циклонов, сформировавшихся в различных географических районах. В зависимости от мест формирования и траекторий их перемещения было выделено семь типов циклонов. Каждый тип различался частотой выхода в исследуемый район, количеством выпавших осадков и атмосферным давлением. Анализ материалов показал, что основной поток выпадений сульфатов и нитратов на юге Приморского края определяется осадками циклонов, сформировавшимися и перемещавшимися над территорией Китая.

Корреляционный анализ позволил выявить наличие значимых корреляционных зависимостей изменчивости потоков влажных выпадений сульфатов и нитратов для пяти типов циклонов. При этом корреляционная зависимость между изменчивостью различных типов отсутствует. Это свидетельствует о специфичности соотношения кислотообразующих веществ в осадках каждого типа циклонов, сформировавшихся в различных географических зонах. Предложенный метод позволяет идентифицировать источники поступления с осадками загрязняющих веществ, а также исследовать изменчивость гидрохимических и синоптических параметров циклонов, сформировавшихся в различных географических зонах. Представленный анализ проведен для траекторий циклонов и отличается от широко применяемого метода анализа обратных траекторий движения воздушных масс. Сравнение двух методов анализа, а также расширение ряда исследуемых ионов в осадках является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова М.К. Климат холодных регионов земли. — Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. — 206 с.
2. Кобышева Н.В., Костин С.И., Струнников Э.А. Климатология. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 344 с.
3. Свиных Г.В., Жежко Р.Я. О месячной ритмичности некоторых синоптических процессов на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. — 1973. — Вып. 38. — С. 46–54.
4. Свиных Г.В., Свиных В.Г., Кондратьев И.И. Исследования и краткосрочный прогноз загрязнения воздуха в городах Приморского края. — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1993. — 95 с.
5. Кубай Б.В., Мендельсон Э.А., Цурикова Т.В. Изменяется ли климат в Приморском крае? — Владивосток: Примгидромет, 2012. — 129 с.
6. Мамедов Э.С., Павлов Н.И. Тайфуны. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 139 с.
7. Streets D.G., Waldhoff S.S. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO // Atmospheric Environment. — 2000. — N 34. — P. 363–374.
8. Aardenne J.A. van, Carmichael G.R., Levy I.H., Street D., Hordijk I. Anthropogenic NO_x emissions in Asia in the period 1990–2020 // Atmospheric Environment. — 1999. — Vol. 33. — P. 633–646.
9. Guttikunda S.K., Carmichael G.R., Calori G., Eck C., Woo J.-H. The contribution of megacities to regional sulfur pollution in Asia // Atmospheric Environment. — 2003. — N 37. — P. 11–22.
10. Kim J., Cho S.Y. A numerical simulation of future acid deposition in North Asia using a comprehensive acid deposition model // Atmospheric Environment. — 2003. — N 37. — P. 3375–3383.
11. 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.
12. 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. 107–112.
13. Кондратьев И.И. Трансграничный фактор в изменчивости химического состава осадков на юге Дальнего Востока России // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 3. — С. 31–37.
14. Кондратьев И.И. Трансграничный атмосферный перенос аэрозоля и кислотных осадков на Дальний Восток России. — Владивосток: Дальнаука, 2014. — 299 с.
15. 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. 45–54.
16. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае / Под ред. В.В. Петухова. — Владивосток: Примиздат, 2012. — 73 с.
17. Коженкова С.И., Кондратьев И.И., Литвиненко Н.В. Загрязнение атмосферы города Владивостока // Современные проблемы регионального развития: Материалы 1 межрегион. науч. конф. — Биробиджан: Дальнаука, 2006. — С. 82–85.
18. Mukha D.E., Kondratev I.I., Mezentseva L.I. Transboundary transport of acid precipitation by cyclones of East Asia to South of the Russian Far East // Geography and Natural Resources. — 2012. — Vol. 33, N 2. — P. 119–125.
19. Архангельский В.Л. Пути и скорости перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. — 1956. — Вып. 1. — С. 97–113.
20. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. — М.: Наука, 1971. — 576 с.

Поступила в редакцию 27.11.2018

После доработки 26.03.2019

Принята к публикации 25.12.2019