

Е.В. Моложникова, Е.В. Кучменко*, О.Г. Нецветаева, Н.А. Кобелева

Анализ механизмов формирования ионного состава атмосферных осадков юга Восточной Сибири

Лимнологический институт СО РАН,

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 13.01.2003 г.

Уточняется механизм антропогенного влияния на состав атмосферных аэрозолей и осадков. Для исследований использовались материалы снегосъемки, проводившейся в течение 5 лет в Иркутске, а также в 2000 г. в г. Слюдянка. Значительное внимание уделялось выявлению зависимости ионного состава атмосферных осадков от особенностей функционирования промышленных источников выбросов. Предпринята попытка формирования баланса серосодержащих соединений в атмосфере населенных пунктов различного типа (с использованием локальной и региональной моделей переноса).

Для оценки антропогенного влияния на состав осадков в регионе необходимо иметь четкое представление о природных механизмах, формирующих фоновые характеристики. При отсутствии влияния человека тот или иной состав атмосферных осадков определяется, в первую очередь, источником и, соответственно, районом формирования ядер конденсации, а также состоянием атмосферы по пути следования воздушных масс, несущих осадки в регион. Для фоновых и промышленных районов Прибайкалья определены траектории воздушных масс, для которых характерны наиболее минерализованные атмосферные осадки.

Химический состав атмосферных осадков (АО) определяется источником и районом формирования ядер конденсации, а также состоянием атмосферы по пути следования воздушных масс (ВМ), несущих осадки в регион. Цель данной работы – выявление механизмов формирования химического состава АО в зависимости от направления движения ВМ (дальний перенос) и влияния локальных источников антропогенного загрязнения. В статье анализируются материалы по химическому составу отдельных АО, выпавших в г. Иркутске за период 1999–2002 гг., и снежного покрова, отбравшегося в конце зимы в течение 5 лет (1998–2002 гг.) в Иркутске, в 2000 г. – в г. Слюдянка.

Для построения траекторий движения ВМ использовалась модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) National Oceanic and Atmospheric Administration [1]. По архивным метеорологическим данным построены обратные траектории для разных сезонов года (не менее 30 дней в каждом сезоне). Было выделено 12 наиболее часто встречающихся типов траекторий для ВМ на высоте 3000 и 5000 м, в том числе «местная циркуляция» (МЦ), соответствующая слабым скоростям ветра. В ходе выполнения исследований было подтверждено, что на юге Восточной Сибири преобладает западный, северо-западный и юго-западный перенос, реже всего встречаются ВМ, приносимые с востока (с учетом юго-восточного и северо-восточного направлений – от 3 до 10%) (табл. 1).

При западных и северо-западных траекториях движения ВМ отмечается повышение среднегодо-

вых концентраций ионов в АО (в первую очередь сульфатов), причем наиболее явно эту зависимость

Таблица 1

Повторяемость траекторий различных типов, %

Направление	Среднее за год			
	1999	2000	2001	2002
С	9,6	4,2	5,8	6,0
С-С-З	0,8	2,5	2,2	0,7
С-З	15,7	12,5	11,5	6,7
З-З-С	15,7	17,2	14,5	17,3
З	19,0	15,5	16,4	23,3
З-З-Ю	13,2	15,2	16,2	12,0
Ю-З	6,9	10,0	9,3	14,0
Ю-Ю-З	3,8	4,4	5,8	8,0
Ю	2,5	3,9	2,5	1,3
В	1,4	1,4	6,0	1,3
С-В	3,3	2,2	2,7	1,3
МЦ	8,2	11,1	7,1	8,0

можно проследить на данных для холодного периода (рис. 1,а), что, по-видимому, связано с влиянием антропогенных источников аэрозолей, расположенных в Иркутско-Черемховском ТПК, а также в Красноярском крае вдоль северо-западной траектории движения ВМ. Аналогичный анализ среднегодовых данных (за 1999 г.) для станции Монды позволяет утверждать, что в фоновых районах наибольшее содержание основных ионов отмечается в АО, принесенных с юго-запада – из Монголии и Казахстана [2].

В теплый период (май–октябрь) также сохраняется преобладание западного переноса, но увеличивается повторяемость меридиональных типов циркуляции, причем повторяемость случаев юго-западной

циркуляции возрастает до 30%, северо-западной уменьшается до 15%, и к тому же возрастает количество местных циркуляций.

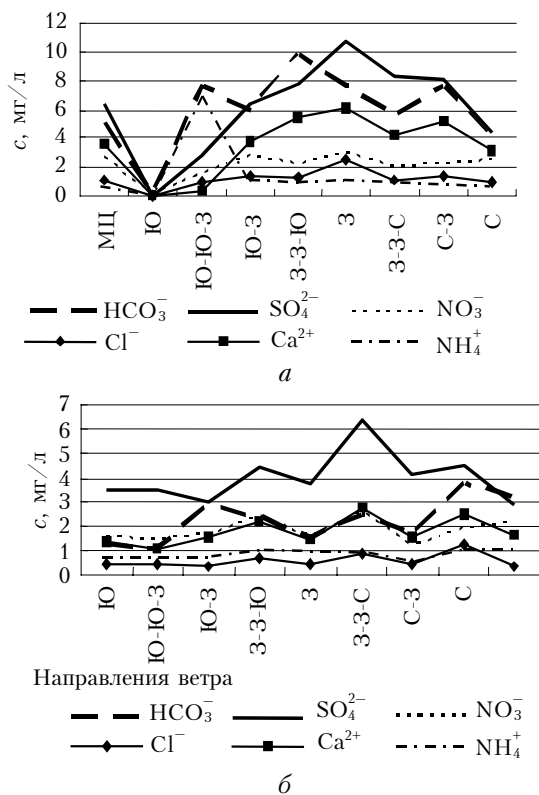


Рис. 1. Изменение химического состава атмосферных осадков в г. Иркутске в зависимости от траектории ВМ: а – зимний период; б – летний период

Наиболее загрязненные осадки также приходят с запада и северо-запада (рис. 1, б). Сумма ионов в АО Иркутска летом уменьшается в среднем в два раза (концентрация ионов в АО зимнего периода 24 мг/л, летнего – 11,6 мг/л). Можно предположить,

что этот минимум обусловлен, по крайней мере, четырьмя причинами:

- 1) увеличением общего количества осадков (в 2,7 раза) и числа дней с осадками, что способствует ускорению процессов самоочистки атмосферы;
- 2) изменением траекторий движения воздушных масс, в том числе уменьшением повторяемости северо-западных траекторий;
- 3) уменьшением скорости ветра по сравнению с весенними месяцами, что приводит к снижению выноса почвенных аэрозолей;
- 4) окончанием отопительного сезона и, соответственно, резким снижением количества антропогенных выбросов за счет предприятий теплоэнергетики.

Рассматривая среднемесячный химический состав АО в Иркутске (рис. 2), можно отметить, что наибольшие пики загрязнений приходятся на зимние (февраль) и весенние (апрель–май) месяцы. Очевидно, основной причиной увеличения минерализации АО весной является увеличение скоростей ветра, приводящее к увеличению концентраций почвенных аэрозолей в атмосфере. Кроме того, этот период характеризуется малым количеством осадков. По нашим данным, на апрель–май приходилось от 2,1 (1999 г.) до 12,6% (2001 г.) годового количества осадков.

Можно предположить, что зимний максимум обусловлен большими объемами выбросов антропогенных источников, в первую очередь предприятий теплоэнергетики, а также плохим рассеиванием в этот период. Из рис. 2 виден ежегодный вторичный максимум минерализации, в основном приходящийся на октябрь, а в 2001 – на ноябрь. Резкое увеличение концентрации ионов в этот период связано с уменьшением случаев и количества выпадающих осадков, с большими перерывами между ними, а также с увеличением повторяемости траекторий северо-западного типа, несущих более загрязненные воздушные массы (см. рис. 2) и увеличением скоростей ветра.

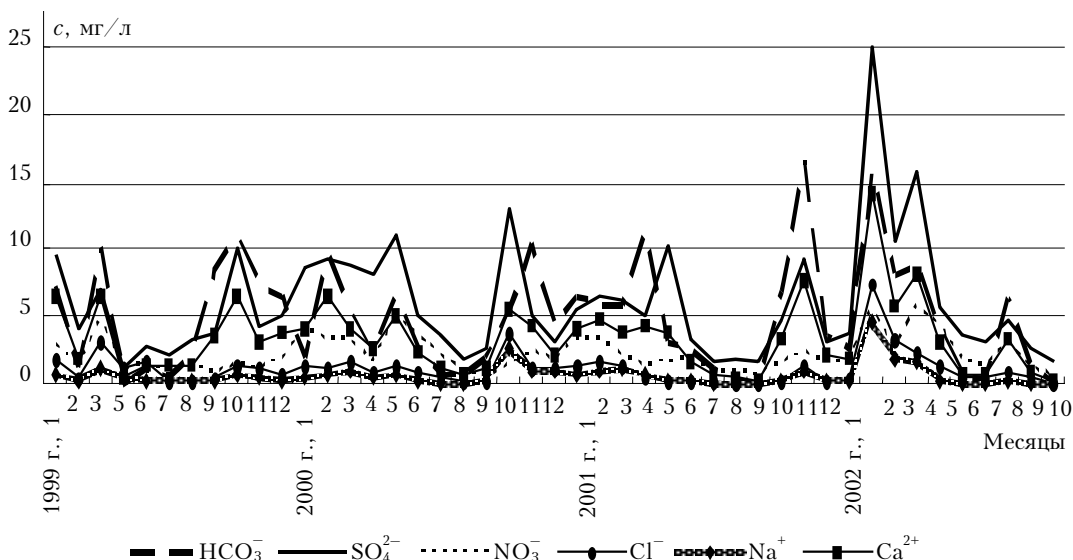


Рис. 2. Среднемесячный химический состав атмосферных осадков в Иркутске за 1999–2002 гг.

Последующее снижение минерализации АО (до 9 мг/л), наблюдающееся в различные годы в ноябре или декабре, связано с установлением снежного покрова и, соответственно, снижением выноса почвенных аэрозолей, причем не только непосредственно в пункте наблюдения, но и по пути следования ВМ. Минимум минерализации осадков, приходящийся в некоторые годы на декабрь, можно объяснить большим количеством выпадающих осадков.

Результаты снегосъемки также позволяют сделать ряд выводов о роли антропогенных источников выбросов различного типа в процессах изменения состава АО [3, 4]. При этом Иркутск рассматривается как характерный для Восточной Сибири промышленный центр, Слюдянка – как орографически изолированный населенный пункт, имеющий несколько промышленных предприятий и сеть мелких теплоисточников.

Следует пояснить, что Иркутск – административный центр Иркутской области с населением свыше 600 тыс. чел. Доля выбросов предприятий энергетики составляет 86% валового выброса и 99% выбросов оксидов серы [6]. На территории города функционируют 236 промышленных и коммунальных котельных и одна крупная ТЭЦ. В некоторых районах сохраняется печное отопление.

Город Слюдянка расположен на берегу оз. Байкал в его юго-западной оконечности в долинах рек Слюдянка и Похабиха между отрогами хребта Хамар-Дабан. Население города составляет 21,1 тыс. чел. Производственная основа города – предприятия горнодобывающей промышленности, строительных материалов, металлообработки. В Слюдянке находится одна из крупных железнодорожных станций. В городе расположен целый ряд мелких котельных, хотя в последние годы их количество значительно сократилось. Большая часть населения проживает в частных домах с печным отоплением.

В конце зимнего сезона на территории Иркутска ежегодно проводится снегомерная съемка и выполняется ионный анализ состава проб. Определяются концентрации анионов SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- и катионов Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ . Обычно на территории города отбирали не более 10 проб в различных районах, что позволяло оценить загрязнение осадков в Иркутске по сравнению с другими пунктами и фоновыми точками. Однако для детального изучения структуры загрязнения города и идентификации источников выбросов в последние три года количество проб было увеличено. В марте 2000 г. было отобрано 36 проб (19 точек) в Иркутске и еще три в ближайших окрестностях города, а в 2001 г. – 70 проб (38 точек), в 2002 г. – 26 проб (13 точек). Кроме того, в 2002 г. было отобрано 17 проб (10 точек) в г. Слюдянка и его окрестностях, а также 5 проб (5 точек) вдоль трассы Иркутск – Слюдянка.

В качестве реперного соединения рассматривался сульфат-ион, поскольку серосодержащие соединения в гг. Иркутске и Слюдянке присутствуют только в выбросах предприятий энергетики. Для сопоставления данных снегосъемки с данными о вы-

бросах и оценки влияния разных источников на загрязнение снега использовались численные модели рассеивания выбросов [5]. Основная часть расчетов проводилась с помощью стационарной локальной модели на основе гауссова факела, которая в настоящее время получила наиболее широкое распространение в природоохранных организациях Европейского сообщества, США (версия ISC3). Сравнение конфигурации экспериментальных и расчетных полей загрязнения сульфатами позволяет говорить об их удовлетворительном согласовании.

Для оценки влияния антропогенных выбросов на состав АО в локальном и региональном масштабах была предпринята попытка составить баланс серосодержащих соединений для гг. Иркутск и Слюдянка (табл. 2).

Таблица 2

Баланс серосодержащих соединений по данным снегосъемки в гг. Иркутск и Слюдянка

Характеристика	Иркутск	Слюдянка
Число пунктов отбора	13	8
Годы наблюдений	2000–2002	2002
Число котельных	236	21
Выбросы, т	27198,2	567,8
Выпадение, т	191,5	10,45
Выпадение (%) от выброса	0,70	1,8
Коэффициент корреляции	0,7	0,93

Для Слюдянки составление баланса оказалось более простой задачей, чем для Иркутска, несмотря на такие особенности, как сложный рельеф и неоднородность подстилающей поверхности, которые существенно усложняют расчет рассеивания. Коэффициент корреляции между расчетными и измеренными характеристиками выпадения сульфатов для Слюдянки достигает 0,93, в то время как для Иркутска составляет всего лишь 0,7. Теоретически выпадение в локальной зоне для котельных должно составлять от 5 до 10% выброса.

Полученное нами соотношение (0,7–1,8%) между выбросом и выпадением обусловлено, во-первых, завышением расчетных выбросов в г. Иркутске, по крайней мере в 2 раза; во-вторых, занижением величины выпадений серы при оценке их по результатам снегосъемки, что связано с миграцией сульфатов в период оттепелей (до 30% потерь) [6]. Кроме того, потеря серы обусловлена тем, что ее определение производится в фильтрованной снеговой воде. При этом сера, содержащаяся в нерастворимом виде, остается на фильтре и не учитывается в общем балансе.

Следует отметить, что по результатам снегосъемки концентрации ионов Ca^{2+} и HCO_3^- в Слюдянке выше, чем в Иркутске, хотя суммарный выброс золы в Иркутске на несколько порядков больше (табл. 3).

Таблица 3

Состав анионов по данным снегосъемки, % экв

Пункт	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
Слюдянка	53,1	35,4	0,5	11
Иркутск	20,5	55,1	11,5	12,9

Это явление обусловлено совместным действием двух факторов:

- воздействием мраморного карьера, расположенного в нескольких километрах от города на отроге хр. Хамар-Дабан;

- отсутствием очистных сооружений и неэффективным сжиганием угля в малых котельных г. Слюдянка, а также крайне низкими скоростями рассеивания выбросов в атмосфере, что обусловлено как сложным рельефом города, так и наличием приподнятых инверсий температуры, формирующихся в зимнее время под воздействием оз. Байкал.

Разделение степени и сферы влияния этих двух факторов требует дальнейших исследований, однако значимость второго из них доказывает следующий факт. Максимальные концентрации кальция, а также гидрокарбонатов и сульфатов обнаруживаются непосредственно в зоне действия котельных.

Результаты снегосъемки позволяют утверждать, что в небольших населенных пунктах загрязнение снежного покрова может быть сопоставимо с таковым в крупных промышленных центрах. Так, в среднем для всех проб снежного покрова, отобранных в Иркутске в конце зимы 2001/02 г., сумма ионов составляет 29,1 мг/л, а для проб, отобранных в Слюдянке, — 33,2 мг/л.

Такой высокий уровень загрязнения снежного покрова в небольших городах обусловлен функционированием большого числа мелких котельных, неграмотной их эксплуатацией, отсутствием систем очистки выбросов, а также неэффективным сжиганием топлива. При этом в снеге возрастает доля ионов HCO_3^- , связанных в первую очередь с выбросами золы, в то время как в крупных городах значительно выше доля сульфатов, образующихся при высокотемпературном сжигании углей (см. табл. 3).

Таким образом, статистический анализ данных о химическом составе АО гг. Иркутска и Слюдянки дает возможность сделать следующие выводы:

E.V. Molozhnikova, E.V. Kuchmenko, O.G. Netsvetaeva, N.A. Kobleva. Analysis of mechanisms in formation of ionic composition of precipitation in Southeastern Siberia.

The objective of the paper is to specify the mechanisms of anthropogenic impact on the composition of atmospheric aerosols and precipitation. The studies employed the snow sampling data collected for 5 years in Irkutsk and in 2002 in Slyudyanka. Attention was focused on revealing the relationship between the ion composition of atmospheric precipitation and the operating characteristics of industrial emission sources. An attempt was undertaken to balance sulfur containing compounds in the atmosphere of various populated settlements (by using local and regional transport models).

Estimation of the anthropogenic impact on the precipitation composition in the region calls for the knowledge of natural mechanisms that form background characteristics. With no anthropogenic impact, the composition of the atmospheric precipitation is determined, first of all, by the source and area of condensation nuclei formation as well as the atmospheric pollution on the way of air mass that carries precipitation. The trajectories of air mass that is characterized by the most mineralized atmospheric precipitation were determined for the background and industrial areas of the near-Baikal region.

- наибольшие величины сумм ионов в АО, выпадающих в г. Иркутске, наблюдаются при западном переносе ВМ;

- концентрация ионов в АО зимнего периода в среднем в два раза больше, чем летнего;

- химический состав АО в больших и малых городах Прибайкалья зимой в основном определяется локальными антропогенными источниками выбросов;

- в весенние (апрель–май) и осенние (сентябрь, октябрь) месяцы при отсутствии снежного покрова и больших скоростях ветра возрастает роль природных аэрозолей почвенно-эрозионного происхождения, что ведет к повышению минерализации АО.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 01-02-16643.

1. *Draxler R.R., Hess G.D.* An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition // *Meteorol. Magazine*. 1998. № 47. С. 295–308.
2. *Моложникова Е.В., Кучменко Е.В., Невцетаева О.Г., Кобелева Н.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В.* Сравнение экспериментальных и расчетных данных ионного состава атмосферных осадков юга Восточной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 446–449.
3. *Ранута В.Ф., Коковкин В.В.* Методы интерпретации данных мониторинга загрязнения снежного покрова // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2002. Т. 10. № 5. С. 669–682.
4. *Смоляков С.Б.* Проблемы кислотных выпадений в Западной Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2002. Т. 10. № 5. С. 521–554.
5. *Кучменко Е.В., Моложникова Е.В., Филиппов С.П.* Идентификация данных о выбросах объектов теплоэнергетики на основе химического анализа состава осадков // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 541–545.
6. *Ломоносов И.С.* Основные процессы техногенного рассеяния и концентрирования элементов и принципы их оценки // *Геохимия техногенных процессов*. М.: Наука, 1990. С. 26–60.