

В.Г. Аршинова, Б.Д. Белан, Т.М. Рассказчикова, Д.В. Симоненков

Влияние города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 2.02.2008 г.

Оценка влияния города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое производилась путем организации нескольких экспериментов по проведению синхронных измерений в двух пунктах. Первый пункт находился в 5 км севернее от пос. Киреевск и в 60 км на запад от г. Томска; второй — на восточной окраине города в Академгородке. При преобладающем западно-восточном переносе воздушная масса сначала проходит Киреевский — фоновый — пункт, а затем Томск и Академгородок с расположенным в нем пунктом измерений.

Показано, что определяющими факторами формирования аэрозольного поля среднего города являются предыстория воздушных масс, а летом еще и активность эрозионных процессов. Влияние прямых антропогенных выбросов города на мезомасштабную изменчивость атмосферного аэрозоля незначительно. Помимо увеличения счетной концентрации аэрозоля в городе, дисперсный состав в целом изменяется мало. Однако, по всей видимости, происходит существенная трансформация структуры распределения элементов и ионов по частицам разной дисперсности. Отмечаются появление дополнительных пиков в области мелких ($d < 0,5$ мкм) и грубых частиц ($d > 10$ мкм) у тяжелых металлов, смещение пиков распределения в более грубодисперсную область у ионов и элементов преимущественно природного происхождения.

Антропогенный вклад в массу аэрозоля атмосферы Земли оценивается в среднем величиной 11,5% [1]. При этом важно учитывать, что почти все выбросы искусственных аэрозолей осуществляются на 3% площади урбанизированной территории суши, где проживает большая половина населения планеты. Это свидетельствует о чрезвычайной актуальности исследования состава и структуры аэрозольных полей в таких районах. Об этом говорит и возрастающее в последние годы число публикаций на эту тему [2–9].

В районе г. Томска оценка мезомасштабной изменчивости аэрозольных и газовых компонентов производилась путем организации нескольких экспериментов по проведению синхронных измерений в двух пунктах: первый располагался вблизи от пос. Киреевск (5 км севернее) на 60 км западнее Томска; второй — на восточной окраине города в Академгородке. При преобладающем западно-восточном переносе воздушная масса сначала проходит Киреевский (фоновый) пункт, а затем Томск и Академгородок с расположенным в нем пунктом измерений.

С 1997 по 2002 г. серии синхронных измерений проходили ежегодно с продолжительностью каждой из них от 20 до 50 дней (табл. 1).

Отбор проб начинался утром и продолжался в течение суток ежедневно или с периодичностью 1 раз в 2–3 дня, в зависимости от кампании. Средний объем прокачиваемого воздуха через фильтр составлял примерно 200 м³. Счетная концентрация аэрозоля измерялась в диапазоне размеров $d = 0,4–10$ мкм модернизированным счетчиком аэрозоля АЗ-5 по 12

каналам ежечасно, с осреднением за 10 мин. Как видно из табл. 1, за 6 лет было проведено 4 кампании в летний период и по одной осенью и весной.

Таблица 1

Периоды и количество отобранных синхронных пар проб аэрозоля

Год	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Период отбора проб	Лето 31.07– 24.08	Лето 15.07– 25.08	Осень– зима 22.10– 15.11	Лето 29.06– 27.06	Зима– весна 07.03– 26.04	Лето 8– 27.08
	Количество пар проб	25	28	7	15	43

Обратимся к рассмотрению статистики случаев переноса в периоды проведения экспериментов (табл. 2). С учетом мезомасштабного характера измерений (разнесенность пунктов составляла около 70 км) доминирующие на линии Киреевск–Томск среднесуточные румбы воздушных переносов определялись по картам абсолютной топографии АТ-700 и АТ-850. Анализ синоптических карт для суток измерений с отбором проб (см. табл. 2) позволяет сделать следующие выводы. Повторяемость западной составляющей в данном районе изменялась от 43% в летней серии измерений 1998 г. до 100% в дни отбора проб осенью 1999 г. Абсолютное доминирование западной компоненты переноса наблюдалось именно в переходные периоды. Помимо уже отмеченной осенней серии 1999 г., западная составляющая присутствовала в 90% случаев весенней кампании 2001 г. Учитывая, что результаты двух первых

летних серий (и самых репрезентативных из них как по числу проб, так и по числу случаев переноса) уже публиковались [2], в настоящей статье остановимся подробнее на результатах измерений в переходные периоды.

Таблица 2

Преобладающий воздушный перенос во время измерений в районе (%) по синоптическим картам АТ-700/АТ-850

Румб переноса	Лето 1997	Лето 1998	Осень 1999	Лето 2000	Весна 2001	Лето 2002
0	17	25	—	27	10	—
45	7	14	—	—	—	—
90	3	11	—	—	—	—
135	—	—	—	—	—	—
180	3	7	—	7	—	17
225	28	7	29	13	28	33
270	31	25	57	27	53	33
315	10	11	14	27	10	17

Вначале обратим внимание на общее изменение от серии к серии средней суммарной концентрации определявшихся компонентов и на соотношение отдельных компонентов в двух точках в каждом из экспериментов (рис. 1).

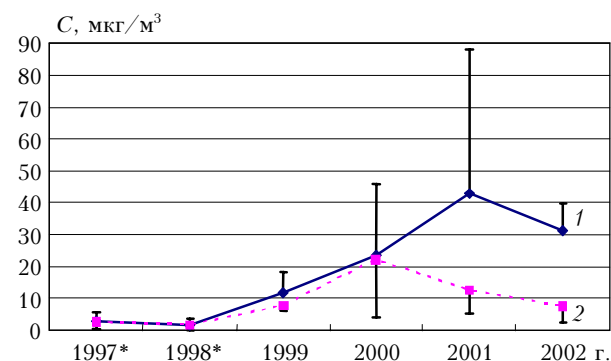


Рис. 1. Ход средней суммарной концентрации определявшихся компонентов и среднеквадратические отклонения в Академгородке (1) и пос. Киреевск (2) в различных сериях измерений (* — без кремния и алюминия)

Видно, что межгодовая и межсезонная изменчивость суммы неорганической матрицы аэрозоля может достигать порядка величины, а разница концентраций между фоновым пунктом и восточным пригородом — нескольких раз. В летних сериях эта разница имеет как положительный, так и отрицательный знак и, как правило, незначительна. Исключение составляет 2002 г., который отягощен продуктами торфяных пожаров в Томь-Обском междуречье, в районе Томского водозабора в непосредственной близости от города. В этом случае западный перенос, являющийся, кстати, наиболее доминирующим из всех летних серий (83%), переносил продукты горения через город, что и фиксировал пункт измерения в Академгородке. Более значительная определенность положительной разницы концентраций аэрозоля Томск–Киреевск в измерениях в переходные периоды является реальным проявлением влияния города.

Рассматривая в составе аэрозоля отношение концентраций отдельных компонент в Томске и Киреевске (табл. 3), можно увидеть, что от серии к серии наблюдается устойчивое превышение в Томском пункте нитрат-аниона, свинца и титана. Первые два из них являются общепризнанными антропогенными реперами [3]. Титан также можно причислить к числу таковых. Поэтому можно применять эти вещества в качестве реперов для анализа отдельных серий измерений.

Таблица 3

Отношения средних концентраций компонентов Томск/Киреевск в различных сериях измерений

Компонент	Лето 1997	Лето 1998	Осень 1999	Лето 2000	Весна 2001	Лето 2002
Al	1,53	—	1,24	1,02	1,09	10,01
Ba	1,07	3,28	4,51	1,18	1,61	—
Br ⁻	0,45	—	0,65	2,22	1,29	7,63
Ca	1,25	0,27	1,19	1,32	1,66	2,93
Cl ⁻	0,50	3,49	1,90	3,23	1,55	6,42
Cr	0,13	3,05	0,47	1,99	0,34	3,52
Cu	0,68	0,05	0,63	6,34	3,10	0,49
F ⁻	2,12	0,77	—	0,96	2,88	17,48
Fe	2,72	0,13	1,37	0,80	1,67	9,65
K ⁺	0,89	0,46	1,34	2,13	2,51	1,09
Mg	0,93	2,32	1,11	0,90	3,66	3,77
Mn	1,01	1,20	0,57	1,76	2,35	40,47
Mo	0,62	0,31	1,18	0,24	1,04	—
Na ⁺	2,01	1,83	1,47	0,07	1,50	2,13
NH ₄ ⁺	9,51	—	—	1,86	0,98	0,62
Ni	0,97	1,71	0,11	1,46	9,12	0,91
NO ₃ ⁻	2,22	1,21	1,47	1,15	1,16	4,34
Pb	1,24	4,78	2,46	4,47	1,64	2,65
Si	1,33	—	1,23	2,57	5,37	3,08
SO ₄ ²⁻	1,46	0,91	2,01	1,00	0,91	1,02
Ti	2,05	5,91	1,21	2,24	—	2,96
V	2,21	1,43	0,38	1,71	0,33	—
Sum	1,16	0,8	1,51	1,07	3,34	4,19

Сначала кратко охарактеризуем синоптическую обстановку и предысторию преобладающих во время экспериментов воздушных масс в период осенне-зимней 1999 г. и зимне-весенней 2001 г. серий синхронных измерений.

Началу осеннего эксперимента 1999 г. предшествовало прохождение 20–21 октября целой системы атмосферных фронтов, последние из которых привели к обширному вторжению холодной арктической массы с осадками в виде снега. Как следствие этого процесса произошли очищение атмосферы и установление устойчивого снежного покрова. В середине последней декады октября наблюдалось непродолжительное вторжение субтропической воздушной массы. Снеговой покров частично растаял, но вновь восстановился после прохождения в самом конце октября очередной серии холодных фронтов с возвратом арктического воздуха. Ветровой режим в период осеннего эксперимента характеризовался слабыми или умеренными скоростями. Направление большинства обратных траекторий вблизи района измерений — западное, юго- или северо-западное, далее — северное, вдоль Урала с Ледовитого океана, или северо-западное, с Атлантики через север Европы или район Балтики.

Синоптическая обстановка в период проведения весеннего эксперимента 2001 г. была более сложной и изменчивой по сравнению с периодом осенних измерений. В марте наблюдались частые вторжения теплого воздуха, сопровождавшиеся осадками (даже в виде дождя) 10, 16 марта и во второй половине последней декады марта. Тем не менее устойчивый снеговой покров в фоновом районе сохранялся до середины апреля, в котором наблюдались частые холодные вторжения со снегом. Большая часть обратных траекторий в период проведения весеннего эксперимента на микро- и мезомасштабном удалении совпадала с осенними. При этом траектории кардинально отличались на макромасштабном уровне. Они имели юго-западное происхождение, проходя через район Средней Азии и Казахстана, со Средиземноморья, Ближнего Востока или южной части Западной Европы.

На рис. 2 представлены средние значения концентраций со среднеквадратическими отклонениями осенне-зимней серии синхронных измерений 1999 г.

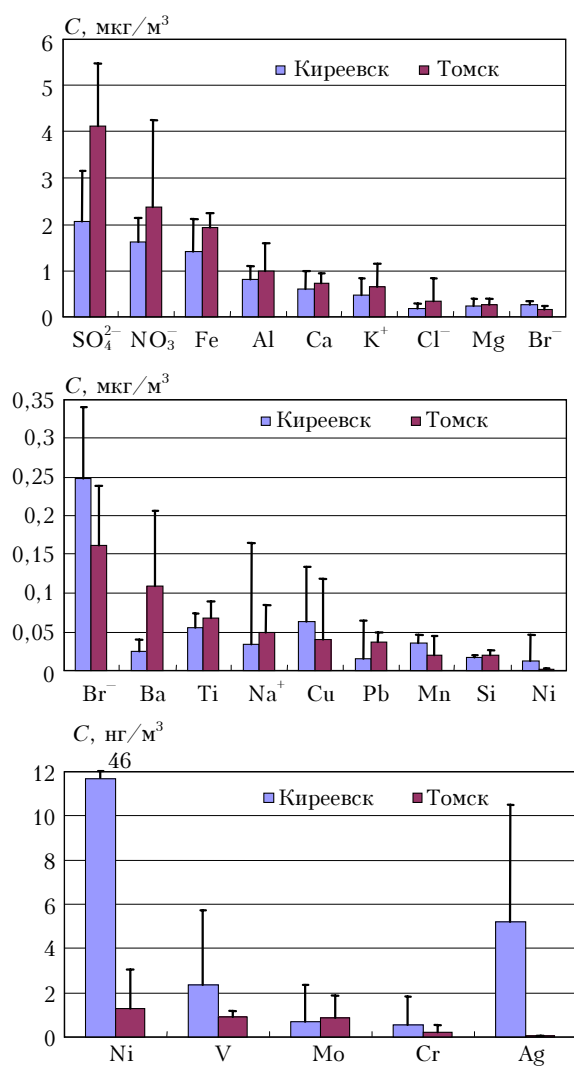


Рис. 2. Средние концентрации неорганических компонентов в составе аэрозоля и среднеквадратические отклонения в осенней серии измерений 1999 г.

Видно, что по макроэлементам и ионам, составляющим основу неорганической матрицы аэрозоля, в антропогенном пункте действительно наблюдается прирост в среднем в 1,5 раза. Самое большое обогащение наблюдается для двух микроэлементов — свинца и бария — в 2,5 и 4,5 раза соответственно. Однако для остальных микроэлементов, многим из которых также приписывается преимущественное антропогенное происхождение, наблюдается снижение их содержания в городском аэрозоле. Чтобы понять этот парадокс, следует обратиться к весенней серии измерений, для которой также характерны изолированность почвы снежным покровом или его нейтрализация за счет переувлажнения, а также господствующий западный перенос, но с южным выносом.

Общий временной ход суммарной концентрации ионов и элементов за весь период измерений с 7 марта до 27 апреля приведен на рис. 3.

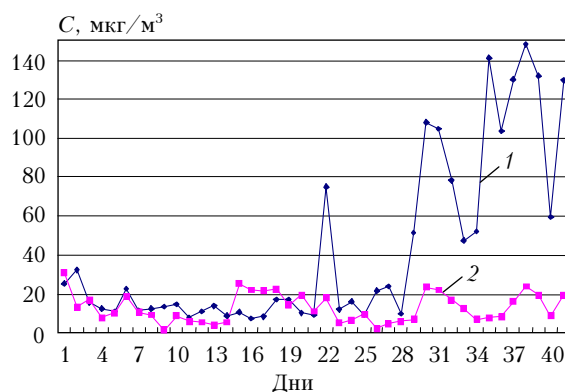


Рис. 3. Временной ход среднесуточных концентраций сумм ионов и элементов в составе аэрозоля, отобранного синхронно в двух пунктах за весь период весенней серии измерений 2001 г. (1 — Томск, 2 — Киреевск)

К марту, таким образом, относятся первые 25 значений временной оси абсцисс; далее — апрельские значения (с выбраковкой некоторых дней). Из рис. 3 видно, что по соотношению наблюдаемых суммарных концентраций данную серию измерений можно довольно четко, с примерно недельным переходом, разбить на два периода. Март — когда, за редким исключением, мы имеем сопоставимые концентрации; и апрель — с резким возрастанием суммарной массы в Академгородке в разы и даже до порядка величины по сравнению с фоновой точкой.

Трудно предположить, что причиной этого является возрастание городских выбросов в атмосферу, тем более что обе кривые имеют вполне синхронный ход: коэффициент корреляции между рядами составляет 0,314, что для данного числа измерений ($n = 41$) является значимым по уровню достоверности 0,95. Это означает, что в данном регионе в рассматриваемый период на мезомасштабном уровне общая динамика приземного аэрозоля определялась глобальными источниками.

Однако город существенно изменяет проходящий через него состав аэрозоля. Если в зимний период основой этого изменения является прямое влияние за счет выбросов теплоэнергетических предприятий,

автотранспорта и т.п., то в условиях наступившей весны — по ряду причин. Во-первых, из-за объективной неравномерности развития атмосферных процессов на сопредельных территориях, связанной, в частности, с возрастающей разнородностью подстилающих поверхностей (различие в альбедо). Во-вторых, роль факторов, способствующих как деструкции приходящего аэрозоля, так и процессам генерации новых аэрозольных частиц, также становится неоднозначной.

Чтобы оценить влияние этих факторов на состав аэрозоля в двух пунктах, мы произвели искусственное разделение выборки на март и апрель и приводим на рис. 4 средние значения в эти отдельные периоды.

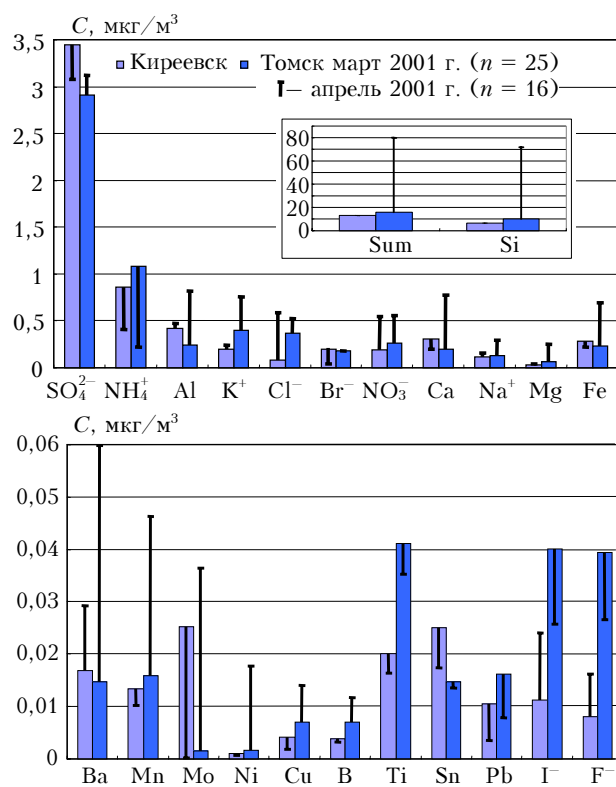


Рис. 4. Средние значения концентраций компонентов неорганической фракции аэрозоля за 2 подпериода наблюдений зимне-весенней серии 2001 г.

Для фонового района (пункт в Киреевске) с наступлением весны характерно некоторое снижение содержания минеральной компоненты в составе аэрозоля. Это, по-видимому, связано с осаждением крупных частиц на сильно увлажненную тающими снеговыми массами почву, которая в данный период не способна продуцировать эрозионный аэрозоль. Водорастворимая фракция (большинство галогенид-ионов, нитраты), напротив, с усилением солнечной инсоляции вовлекается в процессы испарения и аэрозолеобразования *in situ*. Из ионов существенно понижает свое содержание, причем как в природных условиях (в 2 раза), так и в городской среде (в 3 раза), лишь катион аммония. Подобный сезонный ход аммония отмечают многие исследователи [4–6], нередко

объясняя его сезонным же снижением содержания контрагента — сульфат-аниона. Однако в нашем случае содержание последнего в фоновом районе снижается незначительно, а в городе даже немного возрастает. Вероятно, механизм этого явления сложнее. Возможно, что соли аммония имеют в рассматриваемых условиях, особенно в городе, тенденцию к гидролизной деструкции до аммиака. Тем не менее результирующая всех этих процессов дает в фоновой точке в целом нейтральный ход суммарной неорганической компоненты.

Для городского аэрозоля характерна почти противоположная фоновому тенденция: отрицательный или нейтральный ход ионной компоненты и резкое возрастание минеральной фракции в аэрозоле, в значительной степени за счет кремния и других элементов. По-видимому, рост концентрации кремния и прочих минералов в аэрозоле связан с нарушением устойчивой стратификации атмосферы в проходящей над городом воздушной массе из-за усиления турбулентных потоков в весенний период.

Сочетание многообразия источников аэрозоля в городской среде в весенний период, наряду с развитием других процессов, а также с наличием в это время такого природного феномена, как «весенняя дымка», дает основание утверждать, что в этот период мы имеем на урбанизированной территории наиболее сложное по составу аэрозольное поле.

Это отличие в не меньшей степени проявляется и в дисперсном составе аэрозоля (рис. 5). По сравнению с мартом в апреле в городе счетная концентрация может возрастать до 2–3 раз, а с фоном это различие может превысить порядок величины. В то же время в фоновом районе доминирующими факторами, определяющими дисперсность среды, по всей видимости, являются как природные, так и региональные процессы.

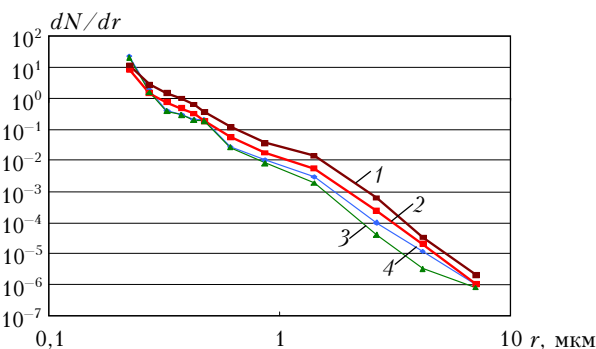


Рис. 5. Средние дифференциальные кривые дисперсного состава аэрозоля в разных пунктах и разные периоды зимне-весенней 2001 г. серии синхронных измерений. Томск: 1 — апрель, 2 — март; Киреевск: 3 — апрель, 4 — март

Возвращаясь к осенним измерениям, можно сделать вывод, что они по характеру происходящих процессов схожи с периодом ранней весны (март). И другая предыстория воздушной массы в этом случае дает инверсное соотношение город-фон, особенно по микроэлементам, содержание которых в фоновой арктической массе может быть весьма значительным [10]. Этому, по всей видимости, способствует

аккумуляция ряда из них в парогазовой форме [11]. В городской среде, вероятно, они активно сосаждаются, конденсируясь на крупных частицах. Это проявляется на дифференциальных кривых дисперсного состава (рис. 6): для Киреевска характерен небольшой пик в области 0,4–0,5 мкм, который характеризует «молодой» аэрозоль. В аэрозольной массе, прошедшей Томск, такой пик уже отсутствует.

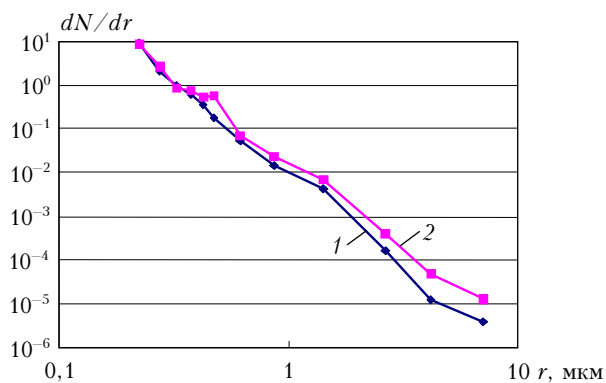


Рис. 6. Средние дифференциальные кривые дисперсного состава аэрозоля в разных пунктах в осенней 1999 г. Серии синхронных измерений (1 – Томск, 2 – Киреевск)

Интересно распределение элементов и ионов на частицах разного размера. Из сопоставления интегральных значений концентраций химических компонентов и осредненных за периоды отбора проб измеренных счетных концентраций аэрозоля в диапазоне $d = 0,4-10$ мкм в наиболее репрезентативной весенней серии построены корреляционные кривые (рис. 7, 8), которые качественно характеризуют распределение компонентов по частицам разных размеров.

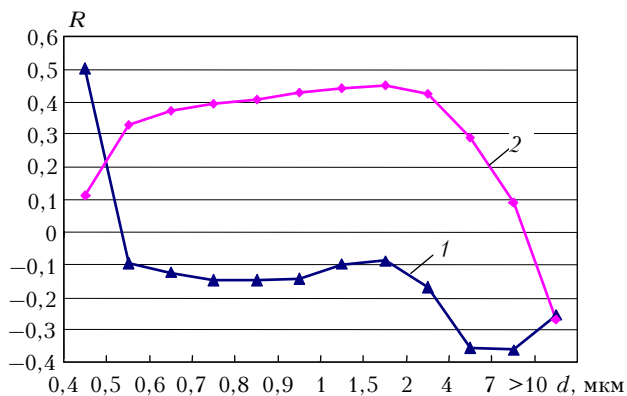


Рис. 7. Корреляционные кривые распределения свинца по частицам аэрозоля в двух пунктах измерений, построенные по результатам весенней серии измерений 2001 г. (1 – Томск, 2 – Киреевск)

Из рис. 7 видно, что для свинца в городском аэрозоле характерно многомодальное распределение, причем очевидна тенденция его концентрации в парогазовой фазе. Наряду со свинцом подобные распределения характерны для ряда других тяжелых металлов – ванадия, никеля, меди. Ход кривых для компонентов, имеющих приоритетно природное происхождение, имеет больше сходства между собой

для обоих пунктов, хотя, несомненно, некоторая трансформация со смещением пика распределения (см. рис. 8) все же наблюдается и в этом случае.

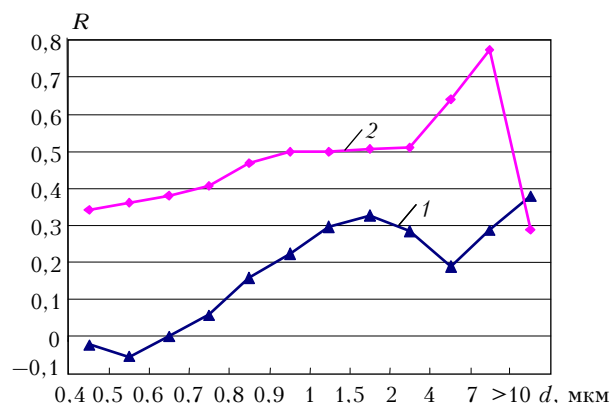


Рис. 8. Корреляционные кривые распределения ионов натрия по частицам аэрозоля в двух пунктах измерений, построенные по результатам весенней серии измерений 2001 г. (1 – Томск, 2 – Киреевск)

Таким образом, подводя итог исследованию, можно сделать следующие выводы.

Определяющими факторами формирования аэрозольного поля среднего города являются предыстория воздушных масс, а летом еще и активность почвенно-эрозионных процессов. Влияние прямых антропогенных выбросов города на мезомасштабную изменчивость атмосферного аэрозоля незначительно. Состав основы неорганической химической матрицы аэрозоля меняется мало. Но из-за дестабилизирующего действия городского «острова тепла» и развитой турбулентности в пограничном слое городской атмосферы происходит высыпание природного аэрозоля в приземный слой, что особенно проявляется в весенний период, в который суммарная масса неорганической компоненты в антропогенном пункте измерений резко возрастает в разы.

Помимо увеличения счетной концентрации аэрозоля в городе, дисперсный состав в целом также изменяется незначительно. Однако, вероятно, происходит существенная трансформация структуры распределения элементов и ионов по частицам разной дисперсности: отмечаются появление дополнительных пиков в области мелких ($d < 0,5$ мкм) и грубых ($d > 10$ мкм) частиц у тяжелых металлов; смещение пиков распределения в более грубодисперсную область у ионов и элементов преимущественно природного происхождения.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 16, программ Отделения наук о Земле РАН № 9 и 11, грантов РФФИ № 06-05-08104, 07-05-00645, 08-05-10033э_к и проекта МНТЦ № 3032.

1. *Аэрозоль и климат* / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеопиздат, 1991. 544 с.
2. Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Мезомасштабные различия в химическом составе атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14. № 4. С. 322–326.

3. Петрухин В.А., Бурцева Л.В., Виженский В.А., Лапенко Л.А., Юшкан Е.И. О возможности использования геохимических соотношений для выделения антропогенной составляющей в загрязнении атмосферы тяжелыми металлами // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 2. Л.: Гидрометеонздат, 1984. С. 71–78.
4. Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П. Сезонная динамика ионного состава атмосферных аэрозолей и осадков в Новосибирской области // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 464–470.
5. Yamamoto N., Nishiura H., Honjo T., Ishikawa Y., Suzuki K. A long-term study of atmospheric ammonia and particulate ammonium concentrations in Yokohama, Japan // Atmos. Environ. 1995. V. 29. N 1. P. 97–103.
6. Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П., Павлюк Л.А., Филимонова С.Н. Динамика ионного состава атмосферных аэрозолей в Западной Сибири в 1996–2004 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 6. С. 492–498.
7. Голобокова Л.П., Латышева И.В., Мордвинов В.И., Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. Особенности химического состава атмосферного аэрозоля на фоне экстремальных погодных условий на юге Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 688–693.
8. Чипанина-Моложникова Е.В., Голобокова Л.П., Кучменко Е.В., Нецветова О.Г., Ходжер Т.В. Условия формирования химического состава атмосферных аэрозолей и осадков над Байкальской природной территорией // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 10. С. 900–905.
9. Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Павлюк Л.А., Филимонова С.Н., Смирнова А.И. Мониторинг ионного состава атмосферных аэрозолей в Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 572–577.
10. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29. № 4. С. 437–458.
11. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 414 с.

V.G. Arshinova, B.D. Belan, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov. Influence of the Tomsk city on the chemical and disperse composition of the surface aerosol.

The influence of the Tomsk city on the chemical and disperse composition of atmospheric aerosols has been estimated by means of carrying out several continuous measurement campaigns at two different sites. One of them is located at the rural area (Kireevsk Village, 60 km west of Tomsk), and another one — at the eastern end of the city. In the conditions of prevalent zonal westerlies, an air mass passes, at first, through the rural site, then Tomsk and finally reaches the suburban measurement site.

It is shown that the determining factors in the formation of aerosol field over a big enough city are a previous history of air masses and a strength of erosion processes during summertime. The influence of the direct anthropogenic city emissions on the mesoscale variability of atmospheric aerosol is insignificant. As a whole aerosol disperse composition changes not much except for an increase in the number density in the city. However, to all appearance, a significant transformation occurs in the structure of element and ion distribution over particles of different dispersion: additional peaks of the concentration of heavy metals were found in the region of fine ($d < 0.5 \mu\text{m}$) and coarse ($d > 10 \mu\text{m}$) particles; a bias of peaks in the distribution of ions and elements of natural origin tends to the region of coarse particles.