

УДК 535.536

*Т.В. Андрухова, В.И. Букатый, И.А. Суторихин***Микрофизические параметры твердофазного атмосферного аэрозоля Барнаула в 1991–2010 гг.***T.V. Andrukhova, V.I. Bukaty, I.A. Sutorikhin***Micro-Physic Characteristics of Solid-Phase Atmospheric Aerosol in Barnaul in 1991–2010**

Рассмотрена динамика загрязнения приземной атмосферы Барнаула за период с 1991 по 2010 г. Изучена микроструктура аэрозоля и проанализирована динамика концентрации химических элементов в пробах. Приведены экспериментальные данные.

*Ключевые слова:* атмосферные загрязнения, аэрозоль, счетная и массовая концентрации, элементный состав.

В последнее время проблема загрязнения атмосферы в районах промышленных городов аэрозольными частицами техногенного происхождения становится достаточно острой. По данной тематике опубликовано большое количество работ, в том числе обзорного характера, например, [1, с. 555]. Цель наших исследований – мониторинг состояния приземного аэрозоля Барнаула в 1991–2010 гг. и обобщение ранее полученных экспериментальных данных [2, с. 48; 3, с. 79–80; 4, с. 579–582; 5, с. 1341–1343; 6, с. 174; 7, с. 37–46].

Систематические исследования микрофизических параметров приземного твердофазного атмосферного аэрозоля в Барнауле проводятся сотрудниками ИВЭП СО РАН и АлтГУ начиная с 1991 г. и по настоящее время. В различных опорных пунктах города изучались следующие параметры аэрозоля: форма и размеры частиц, их счетная и массовая концентрация, качественный и количественный элементный состав материала частиц твердофазного аэрозоля. На основании проведенных измерений были получены временные зависимости микрофизических характеристик аэрозоля от метеоусловий (температура, влажность, атмосферное давление и скорость ветра). Наибольшую опасность для здоровья людей представляют атмосферные частицы так называемой респираторной фракции [3], с размером 0,3–5 мкм, поэтому исследования счетной концентрации аэрозоля представляются актуальными. Данные регистрировались по семи каналам с граничными размерами 0,3–0,4; 0,4–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–5; 5–10; 10–100 мкм. Усреднение проводилось по измерениям, полученным в течение 15–20 мин. В экспериментах изучались суточная, недельная и сезонная зависимости счетной концентрации частиц в различных опорных пунктах. Практически во всех

The work is devoted to studying dynamics of pollution of a bottom atmosphere layer in Barnaul in the period from 1991 to 2010. The microstructure of aerosol is investigated and dynamics of concentration of chemical elements in samples is analyzed. Experimental data are resulted.

*Key words:* atmosphere pollution, aerosol, countable and density concentration, elements composition.

измерениях счетной концентрации в указанный период было отмечено максимальное присутствие аэрозоля с размерами 0,3–0,4 мкм, т.е. имела место одномодальная функция распределения частиц по размерам. Для примера на рисунке 1 представлен недельный ход счетной концентрации в опорном пункте по ул. Молодежная, 1 (административный центр Барнаула) в период март–апрель 2010 г. На рисунке 2 показан месячный ход счетной концентрации в том же опорном пункте с 15 марта по 13 апреля 2010 г.

Первые измерения полной (суммарной) концентрации приземного аэрозоля Барнаула проведены в 1991 г. По всем опорным пунктам суммарная счетная концентрация за 1991–2010 гг., измеряемая в дискретных диапазонах от 0,3 до 100 мкм, варьировала в интервале от  $3,0 \cdot 10^3$  до  $20,0 \cdot 10^4$   $\text{дм}^{-3}$ . Было обнаружено, что максимум полной концентрации приходился на зимние периоды, а минимум – на весенне-летние периоды. Так, среднесуточная полная счетная концентрация частиц, измеренная 17–18 апреля 1991 г. (опорный пункт ул. Гоголя, 85), составила  $2,5 \cdot 10^5$   $\text{дм}^{-3}$ , причем минимальное ее значение ( $2,4 \cdot 10^3$   $\text{дм}^{-3}$ ) было зафиксировано в 11.20 17 апреля 1991 г. при юго-восточном ветре 1–2 м/с,  $t = 6^\circ\text{C}$  влажности 90%, а максимальное ( $9,4 \cdot 10^5$   $\text{дм}^{-3}$ ) – в 23.10 в тот же день при юго-восточном ветре 0–1 м/с,  $t = 5^\circ\text{C}$  и относительной влажности 45%. Этот район наиболее низкий в городе, сильно подвержен загрязнению от котельных, автотранспорта, печного отопления домов, промышленных предприятий и т.д.

В опорном пункте на пр. Красноармейском, 90 (административный центр города) измерения динамики микрофизических характеристик аэрозоля проводились 19–20 апреля 1995 г. [5]. На рисунке 2

представлены данные о суточной динамике счетной концентрации  $N_C$ , а также величин  $\delta_{50}$  и  $\sigma$ , являющихся параметрами нормального логарифмическо-

го распределения, характеризующими медианный диаметр и степень полидисперсности частиц. Изменение температуры за этот период составило 8 °С.

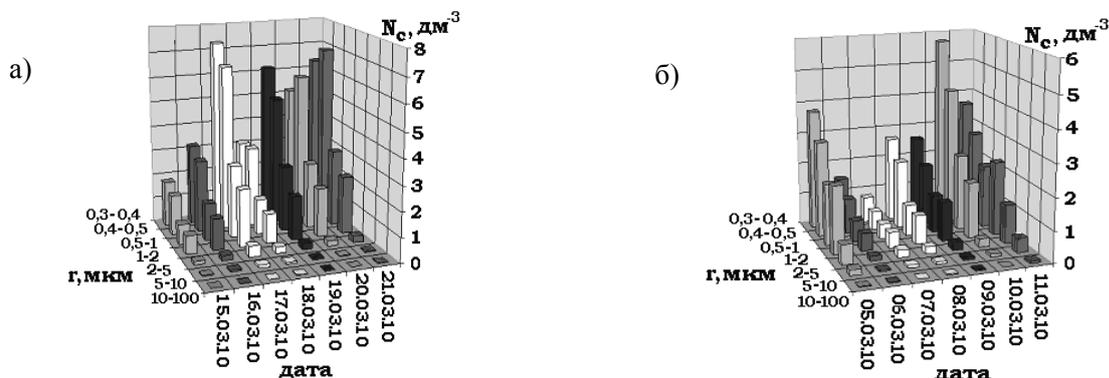


Рис. 1. Недельный ход счетной концентрации аэрозольных частиц: а) с 15 по 21 марта 2010 г.; б) с 5 по 11 апреля 2010 г.

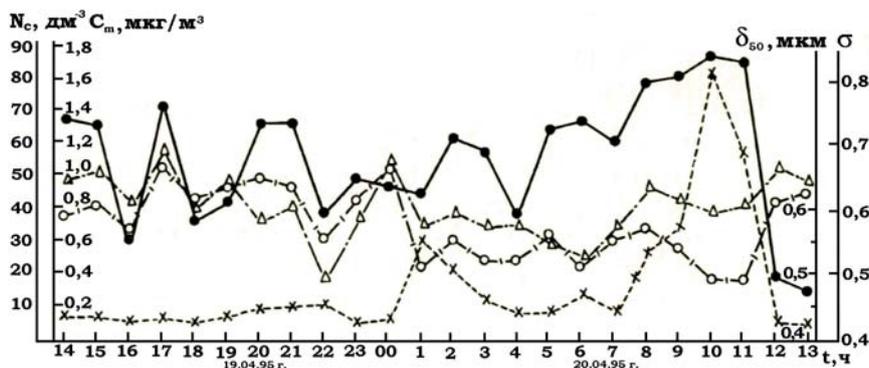


Рис. 2. Суточная динамика микрофизических характеристик городского аэрозоля:  $x$  –  $N_C$  – счетная концентрация;  $\bullet$  –  $C_m$  – массовая концентрация;  $\Delta$  –  $\sigma(t)$  – степень полидисперсности;  $\circ$  – медианный диаметр

Значения полной счетной концентрации в течение суток варьировали в интервале  $3,37 \cdot 10^3 - 8,21 \cdot 10^4 \text{ дм}^{-3}$ , медианный диаметр изменялся от 0,49 до 0,66 мкм. В первой части эксперимента (с 14.00 до 24.00 19 апреля 1995 г.) значение  $N_C$  оставалось практически стабильным ( $4 - 11 \cdot 10^3 \text{ дм}^{-3}$ ), значения  $\delta_{50}$  колебались в небольших пределах (0,3–0,5 мкм). С 0.00 до 3.00 часов 20 апреля 1995 г. отмечено наличие пика счетной концентрации  $N_C \approx 3,44 \cdot 10^4 \text{ дм}^{-3}$  при  $\delta_{50} \approx 0,5 - 0,55 \text{ мкм}$ , причем степень полидисперсности аэрозоля снизилась относительно усредненного значения за период с 14.00 до 24.00 19 апреля 1995 г. Такое повышенное содержание мелких частиц было вызвано, на наш взгляд, ночным выбросом загрязнителей городской ТЭЦ-3. С 7.00 до 11.00 прослеживался стабильный рост  $N_C$  в связи с возрастанием интенсивности движения транспорта, функционированием отопительных печей в частном секторе. Минимум полной счетной концентрации зафиксирован в 23.00, а максимум – в 10.00 20 апреля 1995 г.,  $\delta_{50}$  снизилось до 0,49 мкм. С 12.00 до 13.00 метеоусловия изменились, пошел дождь,

и значение счетной концентрации достигло минимума при  $\delta_{50} \approx 0,61 - 0,62 \text{ мкм}$ . Резкое уменьшение счетной концентрации частиц было обнаружено ранее в экспериментах от 15 мая 1994 г., при продолжительности дождя порядка 50 мин с интенсивностью 10–14 мм объемная концентрация частиц приземного аэрозоля в диапазоне 0,3–10 мкм изменилась с 36200 до 15100 частиц на  $1 \text{ дм}^{-3}$  за счет процессов вымывания (рис. 3).

В суточном эксперименте 27–28 апреля 2010 г. (рис. 4) максимум полной счетной концентрации ( $14,5 \cdot 10^3 \text{ дм}^{-3}$ ) был зафиксирован в 4.00, при температуре 16,4 °С, влажности 24%, скорости ветра 1,9 м/с (направление 240°), а минимум ( $2,5 \cdot 10^3 \text{ дм}^{-3}$ ) – в 10.00, при температуре 14,3 °С, влажности 61% и скорости ветра 5 м/с (направление 165°). А в 12.00 27 апреля 2010 г. при влажности 17%, температуре 20,4 °С, скорости ветра 2,4 м/с (направление 149°) полная счетная концентрация составила  $3,3 \cdot 10^3 \text{ дм}^{-3}$ , а в 14.00 этого же дня при температуре 25 °С, влажности 44%, скорости ветра 2,4 м/с (направление 144°) полная счетная концентрация составила  $4,2 \cdot 10^3 \text{ дм}^{-3}$ .

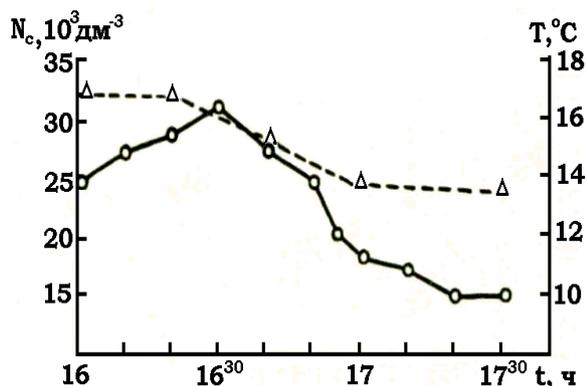


Рис. 3. Динамика счетной концентрации и температуры в период выпадения дождя:  $\circ$  –  $N_c(t)$ ;  $\Delta$  –  $T(t)$

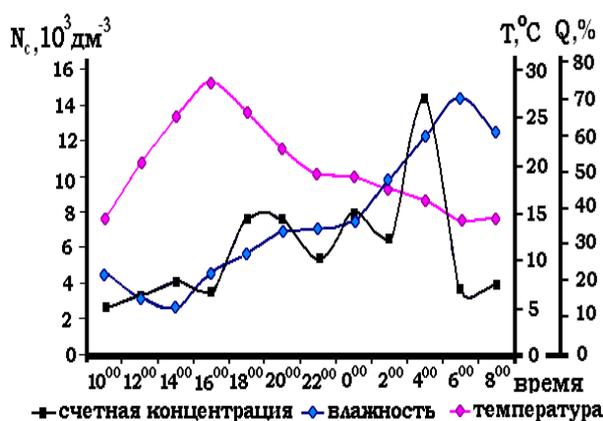


Рис. 4. Суточный ход полной счетной концентрации аэрозольных частиц, температурной зависимости, изменения влажности с 27 по 28 апреля 2010 г.

При возрастании влажности и температуры полная счетная концентрация также увеличивается. Это можно объяснить конденсацией водяных паров на поверхности частиц, что привело к их укрупнению, а это в свою очередь привело к увеличению концентрации в диапазоне регистрируемых размеров частиц, так как более мелкие, неучтенные частицы обводнялись, переходя из мелкодисперсной в среднедисперсную фракцию. Кроме того, наблюдалось снижение счетной концентрации при падении температуры до  $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и усилении ветра до  $7\text{ м/с}$  при мало меняющейся влажности ( $72\%$ ). Далее при увеличении температуры и уменьшении влажности до  $62\%$  начинается слабый рост полной счетной концентрации.

Интересными представляются измерения счетной концентрации частиц в апреле 2010 г. после извержения вулкана в Исландии. Из сибирских городов в зону распространения вулканического пепла попали Тюмень, Омск, Томск, Новосибирск, Красноярск и Барнаул. Взятые 23 апреля пробы счетной концентрации аэрозольных частиц в 18.00 и 20.00 показали увеличение количества частиц

в диапазоне от 2 до 100 мкм. Время забора проб характеризуется слабо меняющимися метеопараметрами (температура  $7,5\text{--}8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , влажность  $34\text{--}39\%$ , скорость ветра  $1\text{--}2\text{ м/с}$ , направление ветра  $340\text{--}350^{\circ}$ ). Данные приведены на рисунке 5.

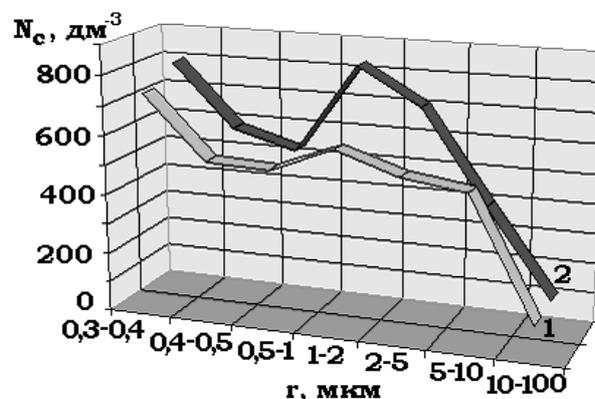


Рис. 5. Распределение частиц по размерам 23 апреля 2010 г.: 1 – 18.00; 2 – 20.00

Для определения массовой концентрации частиц, взвешенных в атмосферном воздухе, через каждый фильтр прокачивалось от 500 до 1800 л городского аэрозоля на высоте около 10 м от поверхности земли. Фильтр взвешивался на аналитических весах, с точностью  $10^{-8}\text{ г}$ , до и после забора пробы. По разнице полученных значений масс определялась масса аэрозольных частиц. Массовая концентрация  $C_m = m/V$ , где  $m$  – масса аэрозольных частиц;  $V$  – объем прокачанного воздуха.

При измерении массовой концентрации в течение суток с 19 по 20 апреля 1995 г. (данные представлены на рисунке 2) (изменение температуры от  $1$  до  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ее величина изменялась в пределах от  $0,37$  до  $1,76\text{ мг/м}^3$ . С 14.00 до 24.00 часов значение  $C_m$  колебалось в пределах  $0,7\text{--}1,4\text{ мг/м}^3$ . В период с 7.00 до 11.00 часов прослеживался стабильный рост  $C_m$  в связи с возрастанием интенсивности движения транспорта и работой отопительных печей в частном секторе. Максимальное значение  $C_m$  отмечено в 10.00 часов. С 12.00 до 13.00 шел дождь, и  $C_m$  достигла своего минимального значения [5].

На рисунке 6 представлен временной ход массовой концентрации в течение суток в весенний период, полученный в опорном пункте (пр. Красноармейский, 90) [7]. Измерения массовой концентрации в весенний период 2007–2009 гг. в течение суток показали, что она достигает максимальных значений с 16.00 до 18.00 и с 6.00 до 10.00 часов, а минимальных – с 2.00 до 5.00 часов. Такое поведение массовой концентрации обусловлено, на наш взгляд, тем, что в начале и конце рабочего дня движение автотранспорта наиболее интенсивно, а также к 18.00 часам атмосферный воздух хорошо прогревается.

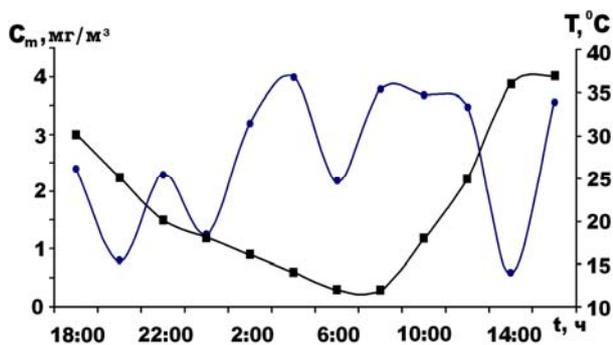


Рис. 6. Временной ход массовой концентрации аэрозольных частиц в течение суток 24–24 апреля 2007 г.: ● – массовая концентрация частиц; ■ – температура

Результаты измерений недельного хода говорят о существовании зависимости массовой концентрации аэрозоля от температуры атмосферного воздуха. Прогретый воздух обладает большой кинетической энергией, что позволяет конвективным потокам увлекать более крупные частицы с подстилающей поверхности, что приводит к уменьшению массовой концентрации аэрозоля (рис. 7).

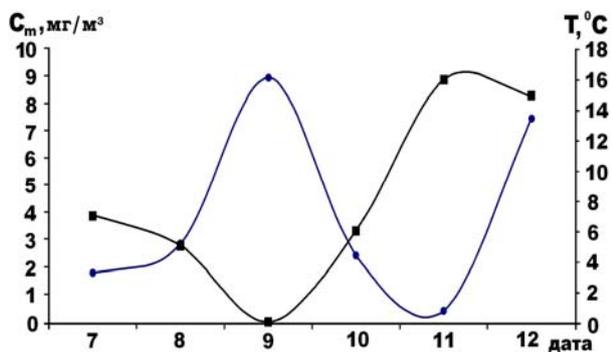


Рис. 7. Временной ход массовой концентрации аэрозольных частиц в течение недели 7–12 апреля 2008 г.: ● – массовая концентрация частиц; ■ – температура

На рисунке 8 представлена сезонная динамика массовой концентрации атмосферного аэрозоля за 2006–2008 гг. Из графика видно, что в летнее время массовая концентрация атмосферного аэрозоля в несколько раз превышает значение массовой концентрации, измеренной зимой. Это связано с тем, что в летнее время с открытой земной поверхности в атмосферу Барнаула эмитируется гораздо больше частиц в основном дисперсионного происхождения. Значения массовой концентрации аэрозольных частиц во всех случаях превышают значения среднегодового ПДК в несколько раз.

С 1991 по 2010 г. среднесуточная массовая концентрация аэрозоля изменялась в пределах от 0,5 до 5,0 мг/м<sup>3</sup>, что примерно в 3–30 раз превышает среднесуточную ПДК, равную 0,15 мг/м<sup>3</sup>. Максимально разовая массовая концентрация варьирова-

ла в диапазоне 3,0–18,3 мг/м<sup>3</sup>, что выше максимально разовой ПДК, составляющей 0,5 мг/м<sup>3</sup>, в 6–36 раз. Для городов с численностью от 500 тыс. до 1 млн человек максимально разовая ПДК для пыли составляет 2,96 мг/м<sup>3</sup>. Более 21% значений массовой концентрации, полученных в ходе проведенных экспериментов, превышают максимально разовую ПДК.

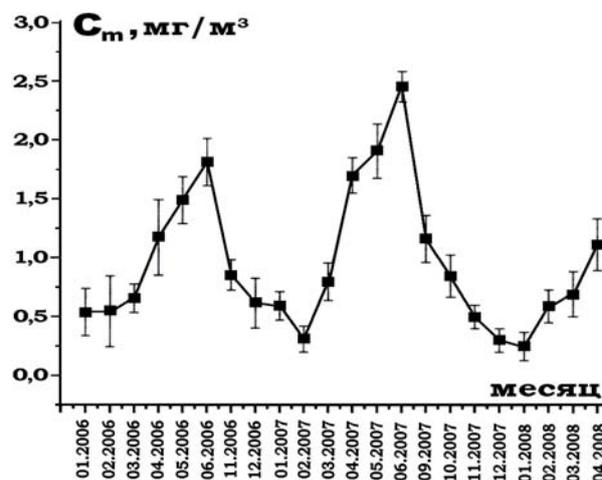


Рис. 8. Динамика массовой концентрации атмосферного аэрозоля в 2006–2008 гг.

Определение элементного состава материала частиц твердого приземного аэрозоля осуществлялось с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа и синхротронного излучения. Элементный анализ проводился в аналитических центрах Алтайского и Томского госуниверситетов, а также в Центре синхротронного излучения ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Приборы для отбора проб аэрозоля в приземном слое атмосферы, преимущественно опасной респираторной фракции в диапазоне 0,3–5 мкм, устанавливались как на борт передвижной лаборатории экологического мониторинга атмосферы ИВЭП СО РАН, так и на стационарных опорных пунктах Барнаула. С 1991 по 2010 г. была изучена динамика концентраций химических элементов в пробах атмосферного аэрозоля.

В 1992–1995 гг. в Барнауле проводились комплексные исследования массового содержания в атмосферном аэрозоле города 15 микроэлементов: Mn, Cu, Zn, Co, Pb, Mo, V, Cd, B, Ni, Hg, Ba, As, Cr, Be [6]. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что содержание исследуемых элементов в аэрозоле подвержено существенным пространственным и временным (сезонным) вариациям, а также зависит от метеорологических, ландшафтных особенностей, структуры застройки, расположения предприятий, автотранспортных и железнодорожных магистралей. Наиболее высокие концентрации элементов в течение года практически всегда регистрировались во второй половине апреля – начале мая. Это связано со сходом снежно-

го покрова и обогащением приземной атмосферы токсичной пылью. Второй, менее выраженный максимум в сезонном ходе содержания микроэлементов отмечался во второй половине сентября – начале октября, что сопряжено с листопадом, сжиганием мусора. На рисунке 9 (для примера) представлена сезонная динамика отдельных микроэлементов (Железнодорожный район Барнаула) по результатам среднемесячных измерений в 1995 г. [6]. Опорные точки контроля, в которых проводились отборы проб аэрозоля с помощью передвижной лаборатории, располагались внутриквартально. Динамика концентрации химических элементов в 2006–2008 гг. представлена на рисунке 10. С наступлением весны концентрация отдельных элементов увеличивается, что связано с исчезновением снегового покрова и увеличением эмиссии в атмосферу аэрозоля с поверхностных слоев почвы и грунта. Для некоторых аэрозолей (обычно антропогенного происхождения) возможна обратная картина, так как зимой наблюдается усиление мощности техногенных источников, а наличие инверсии температуры не позволяет аэрозолю покидать пределов приземной области атмосферы.

За весь период исследования не было отмечено существенного превышения ПДК для перечисленных выше элементов, кроме свинца и никеля. Например, для свинца максимальная разовая предельно допустимая концентрация составляет  $0,001 \text{ мг/м}^3$ , а среднесуточная –  $0,0003 \text{ мг/м}^3$ .

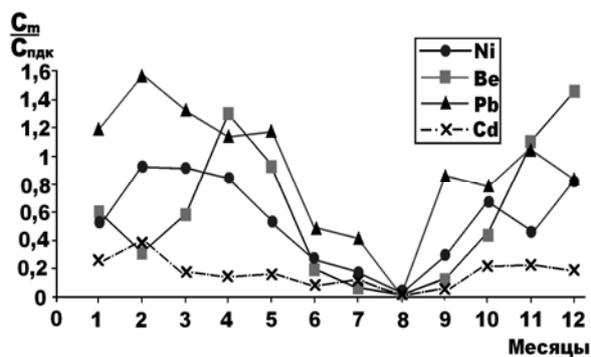


Рис. 9. Сезонная динамика относительной (к уровню ПДК) концентрации микроэлементов на примере Ni, Be, Pb, Cd за 1995 г.

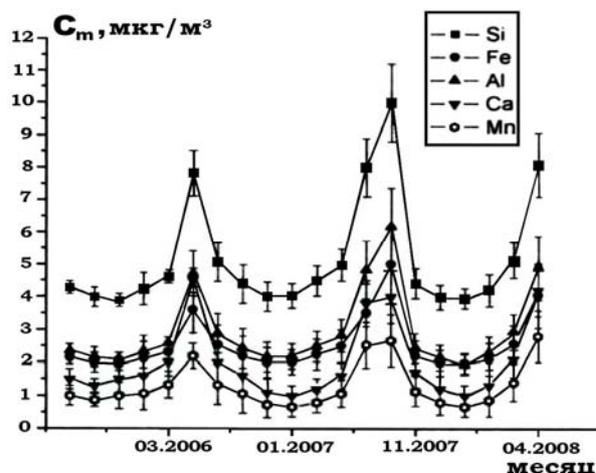


Рис. 10. Динамика концентрации химических элементов в 2006–2008 гг.

## Библиографический список

1. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С. Климатология аэрозолей и облачности. Природные и техногенные аэрозоли. – СПб., 2008. – Т. 1.
2. Суторихин И.А., Моношкина В.Г. Опасная респираторная фракция частиц атмосферного аэрозоля // Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды: мат. Всерос. конф. – Томск, 1995.
3. Андрухова Т.В., Каплинский А.Е., Суторихин И.А. Динамика микроструктуры натурального аэрозоля в поле мощного лазерного излучения // Сборник докладов XII Межреспубликанского симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. – Томск, 1993.
4. Каплинский А.Е., Суторихин И.А. Динамика физико-химических параметров городского аэрозоля при про-

хождении холодного фронта // Оптика атмосферы и океана. – Томск, 1994. – Т. 8, №4.

5. Каплинский А.Е., Кисляк Н.В., Суторихин И.А. Динамика накопления дымового аэрозоля в пониженной части территории г. Барнаула // Оптика атмосферы и океана. – Томск, 1998. – Т. 11, №12.

6. Отчет по госбюджетной тематике за 1996–1998 гг. Разработка методов мониторинга воздушной среды. Исследование влияния подстилающей поверхности на структуру и состав приземного аэрозоля / науч. рук. В.Л. Мионов, отв. исп. И.А. Суторихин. – Барнаул, 1999.

7. Андрухова Т.В., Букатый В.И. Концентрация атмосферного аэрозоля г. Барнаула с 1991 по 2009 г. // Вестник алтайской науки. – 2010. – №1(8).