

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.В. Симоненков, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов

## Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферных компонентов над территорией Сибири и некоторые его результаты. 2. Аэрозольный состав

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 25.07.2006 г.

Выполнен анализ результатов многолетнего мониторинга микродисперсной фракции аэрозоля в приземном слое воздуха и в свободной атмосфере. Выявлено, что, несмотря на максимум генерации аэрозольобразующих веществ, в летний период наблюдается минимум концентрации наночастиц в приземном слое. Это объясняется их оттоком в более высокие слои, так как их содержание находится в обратной зависимости от высоты слоя перемешивания.

### Введение

В первой части работы [1] описана созданная в результате международной кооперации многоуровневая система мониторинга парниковых и окисляющих атмосферных компонентов, а также приведены некоторые результаты, полученные к настоящему времени по исследованию газового состава на территории Сибири.

Напомним, что мониторинг ведется по трем программам и предполагается в дальнейшем расширение ареала исследований. В первую программу входит определение эмиссии парниковых газов на Иксинском (Бакчарском) болоте. Здесь установлены камеры, из которых по трубкам производится прокачка воздуха через два датчика, чувствительных к концентрации метана и двуокиси углерода.

Вторая программа посвящена мониторингу потоков в приземном слое воздуха. Измерение пространственного распределения парниковых газов производится с помощью высотных мачт, расположенных: станция Карасево, Томская область; д. Березоречка, Томская область; г. Ноябрьск, Ямало-Ненецкий АО; п. Демьянское, Тюменская область; п. Игрим, Ханты-Мансийский АО. Каждая мачта оснащается комплексом однотипных приборов. Измерения производятся непрерывно с переключением заборных устройств, расположенных на двух высотах.

Третья программа нацелена на изучение пространственного распределения. Измерение вертикального распределения парниковых газов в пограничном слое атмосферы осуществляется с борта самолета Ан-2. Полеты выполняются еженедельно. Для экспериментов по оценке регионального вклада в глобальный баланс используются самолеты Ан-30. Забор проб и измерение газового состава воздуха производятся ежемесячно в 20-х числах, в зависимости от погодных условий. Место зондирования

выбрано юго-западнее г. Новосибирска, чтобы шлейф от города не влиял на показания приборов. Маршрут работ находится над сосновым бором, вблизи населенных пунктов Завьялово и Ордынское. Диапазон высот 500–7000 м. В 2006 г. стартовал проект УАК-1, в ходе которого измерения на Ан-30 теми же приборами осуществляются по маршруту Новосибирск–Якутск–Новосибирск с переменным по высоте профилем полета.

Параллельно с измерением газовых компонентов на ряде измерительных комплексов ведется мониторинг аэрозольного состава. В статье приводятся результаты анализа дисперсного состава аэрозольных частиц.

### 1. Сезонный ход микродисперсной фракции аэрозоля в приземном слое атмосферы

Ранее нами был подробно проанализирован суточный ход микродисперсной фракции аэрозоля в приземном слое атмосферы [2, 3]. В данной статье рассмотрена сезонная динамика этой фракции.

По аналогии с суточным ходом концентрации нуклеационной субфракции аэрозоля, который явно отображает процессы образования аэрозоля в точке проведения измерений, в сезонном ходе следовало бы ожидать наличия летнего максимума. Однако из рис. 1 видна практически обратная картина. Минимум среднемесячных значений как общей концентрации микродисперсного аэрозоля, так и частиц нуклеационной моды приходится на летние месяцы. Другой характерной особенностью годового хода является то, что один из максимумов наблюдается в весеннее время и его можно считать характерным, так как он выделяется на всех кривых, представленных на рис. 1. Подобный годовой ход характерен и для субмикронных частиц  $0,1 < d < 1,0$  мкм [2].

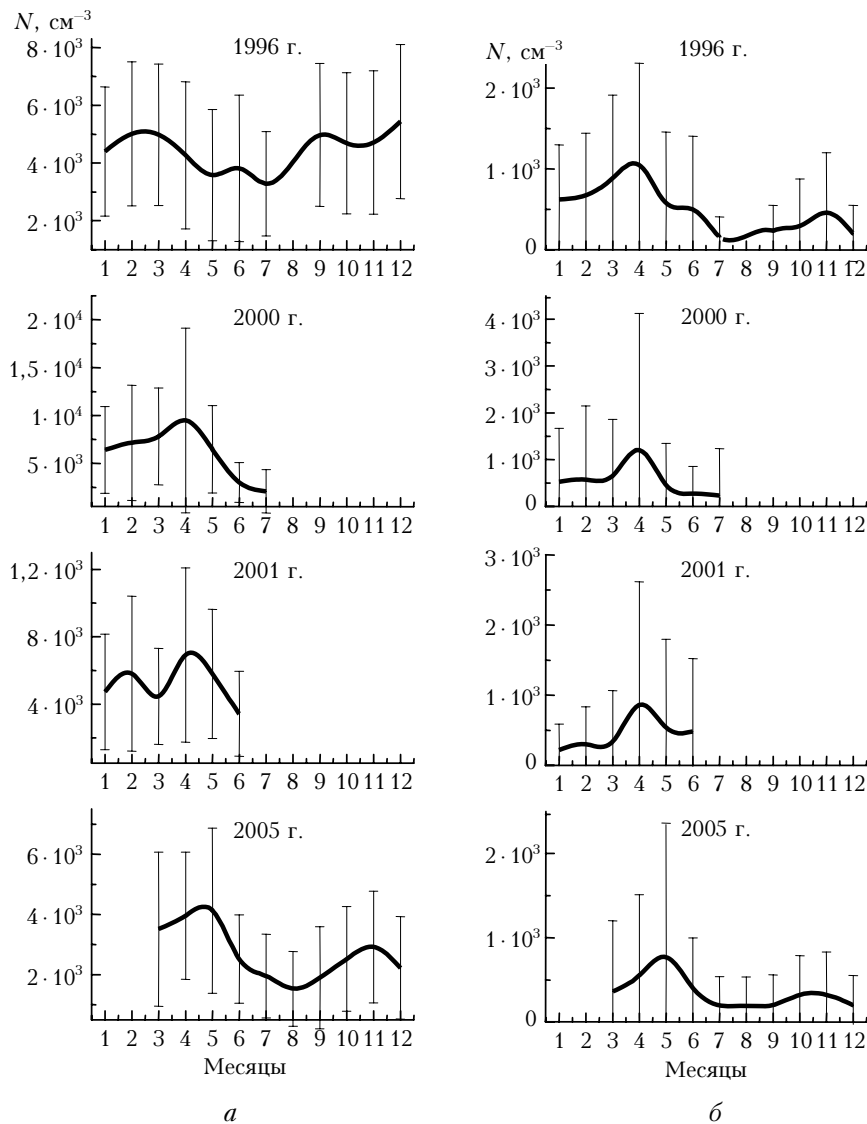


Рис. 1. Годовой ход общей (а) счетной концентрации микродисперсного аэрозоля и частиц нуклеационной моды (б)

Оценки скоростей образования частиц [3] указывают на то, что процессы нуклеации не ослабевают в летнее время, а скорости образования частиц незначительно превышают зимние значения. Тогда, в силу локальности процессов *in situ*, можно утверждать, что интенсивность генерации микродисперсного аэрозоля не имеет жесткой сезонной зависимости. На первый взгляд кажется, что это несколько нелогично, поскольку источником как первичного аэрозоля, так и веществ — предшественников вторичного аэрозоля является подстилающая поверхность, а значит, «строительного материала» для формирования микродисперсного аэрозоля должно быть больше летом. Напомним, что согласно классической теории нуклеации [4, 5] скорость образования стабильных зародышей очень сильно зависит от температуры воздуха, т.е. при одинаковой концентрации паров аэрозолеобразующих соединений (ПАОС) скорость нуклеации будет выше при низких температурах. С другой стороны,

обилие ПАОС летом приводит к повышению скорости нуклеации и подвижности кластеров, чей размер при этом уменьшается. Тогда вероятность образования аэрозольных наночастиц значительно падает, так как зародыши быстро стекают на присутствующий в атмосфере аэрозоль.

Таким образом, если характер генерации аэрозоля остается относительно постоянным в течение года, то концентрация аэрозоля в приземном слое должна определяться объемом, в котором он рассеивается, т.е. высотой слоя перемешивания. По данным же самолетного зондирования над Западной Сибирью [6, 7], годовой ход высоты слоя перемешивания имеет прямо противоположный ход с максимумом в летние месяцы, а это значит, что летом приземная концентрация будет разбавляться за счет турбулентного перераспределения аэрозольных частиц в большем объеме воздуха пограничного слоя атмосферы. Это же обстоятельство, скорее всего, сказывается и на «размытии» максимума

в суточном ходе общей счетной концентрации микродисперсной фракции [3], так как летом высота слоя перемешивания претерпевает и значительные суточные изменения. Чтобы проверить этот факт, нужна информация о вертикальном распределении аэрозольных частиц в тропосфере. Такая информация получена нами с помощью самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э».

## 2. Сезонная динамика вертикального распределения наночастиц

Вначале рассмотрим сезонный ход концентрации микродисперсных частиц на разных высотах в тропосфере, представленный на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что на высоте 500 м, как и в случае с приземным слоем, один из минимумов концентрации приходится на летние месяцы. При этом отличительной особенностью в данном случае является резкое падение концентраций зимой. Причиной этого является запирающий слой, возникающий из-за температурных инверсий, наблюдавшихся во время проведения полетов в зимние месяцы,

вследствие чего аэрозоль, образующийся в приземном слое, не мог достичь высоты 500 м.

На высоте 7000 м явно выраженные максимумы концентрации частиц  $d_p < 70$  нм проявились только в годовом ходе 2003 и 2005 гг. В 2004 г. концентрация на этой высоте претерпевала незначительные изменения в течение года, колеблясь около значения  $\sim 10^2$  см $^{-3}$ .

Концентрации аэрозольных частиц, как  $d_p < 70$  нм, так и  $d_p > 70$  нм, на высоте 3000 м отражают динамику пограничного слоя, т.е. возможность проникновения аэрозоля из нижних слоев за счет вертикального перемешивания. Схожая картина должна наблюдаться и на других высотах в пограничном слое атмосферы.

## 3. Обсуждение результатов

Теперь вернемся к вопросу, является ли летний минимум в приземном и пограничном слоях следствием только изменения высоты слоя перемешивания. Для этого нужно рассчитать интегральное содержание аэрозоля в вертикальном столбе воздуха,

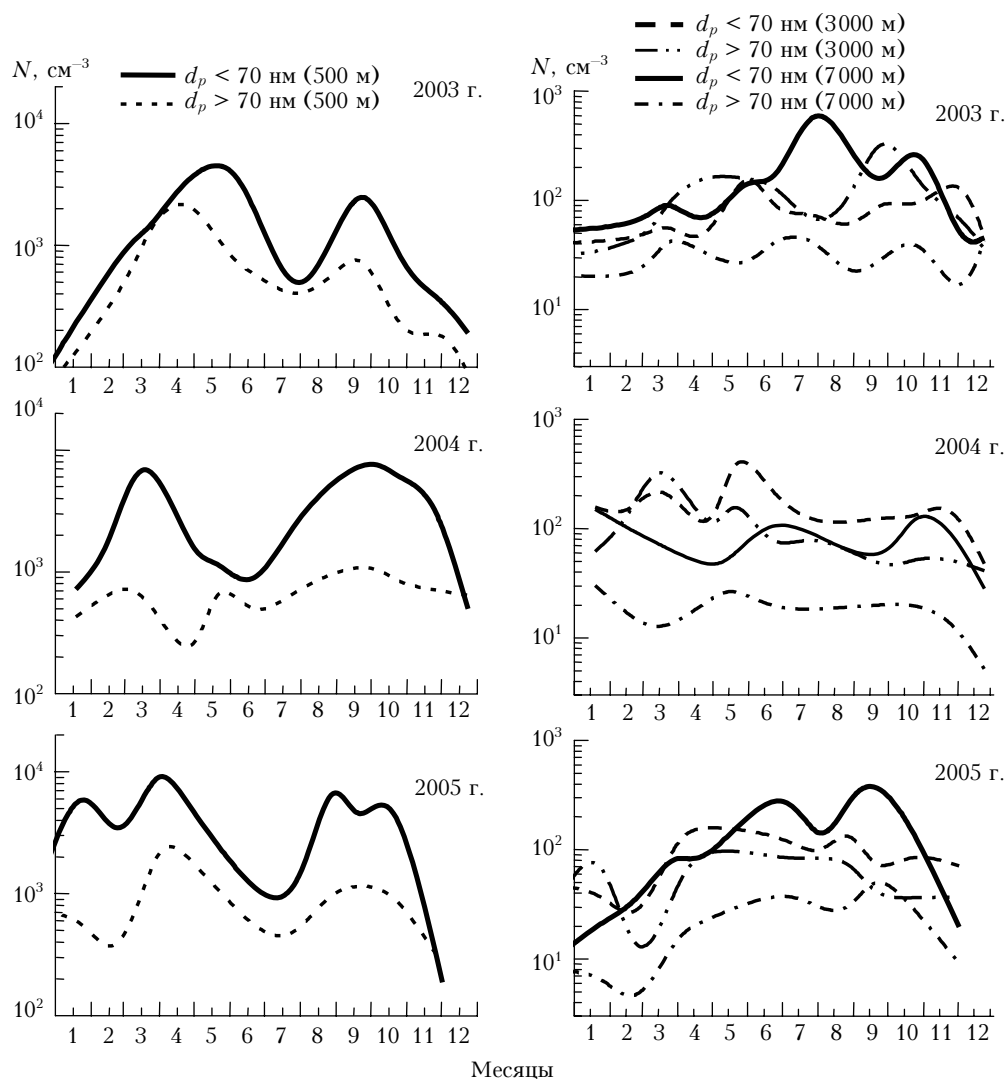


Рис. 2. Концентрация аэрозольных частиц на разных высотах в тропосфере над югом Западной Сибири

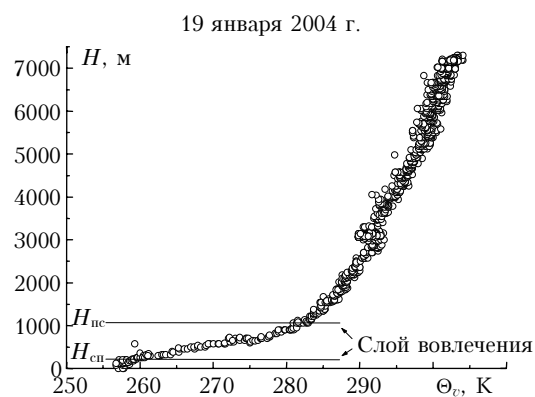
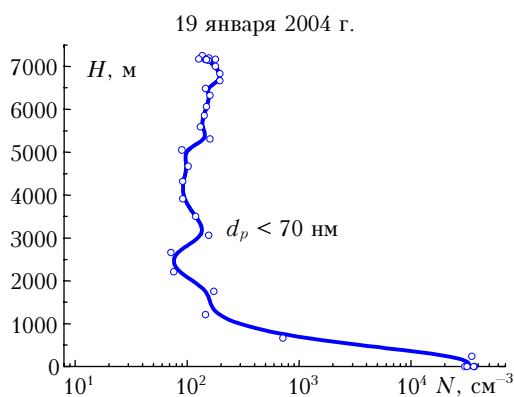
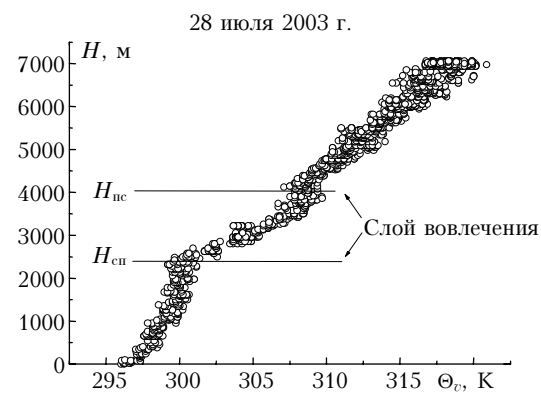
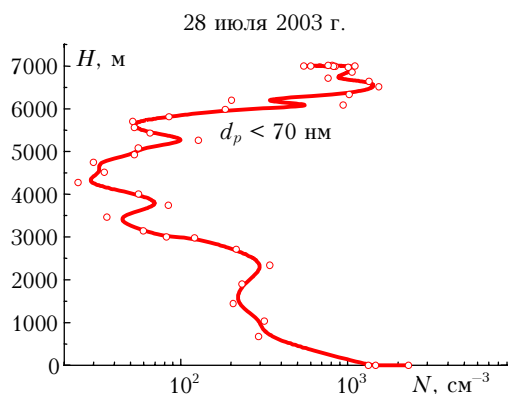
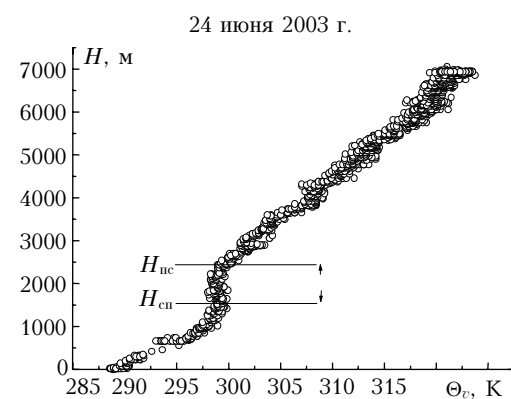
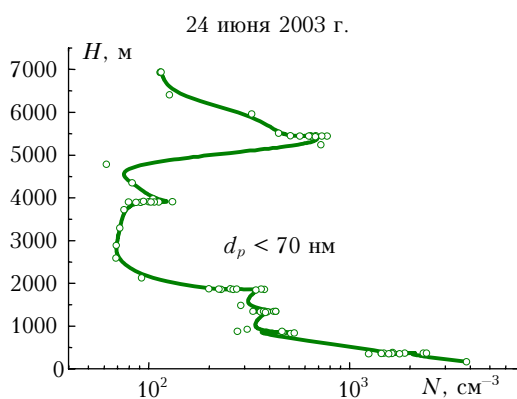
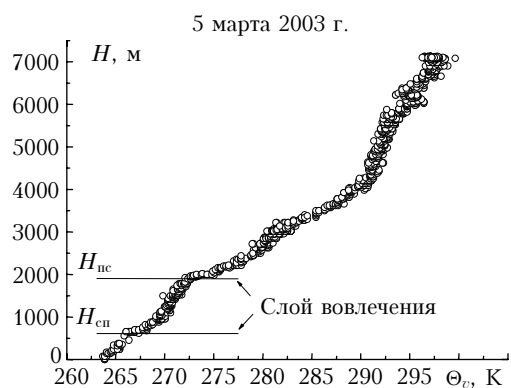
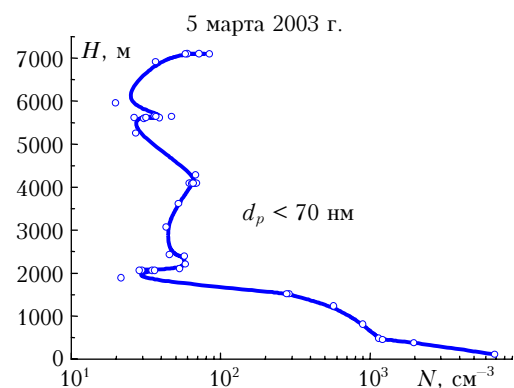


Рис. 3. Вертикальные профили концентрации аэрозольных частиц  $d_p < 70$  нм и виртуальной потенциальной температуры ( $H_{сп}$  — высота слоя перемешивания;  $H_{ис}$  — высота пограничного слоя)

верхней границей которого будет высота слоя перемешивания. Сама же высота как слоя перемешивания, так и пограничного слоя атмосферы определялась с использованием метеорологических параметров, регистрируемых бортовым научным оборудованием самолета лаборатории Ан-30 «Оптик-Э». В настоящее время для этого в мире применяется метод, использующий виртуальную потенциальную температуру  $\Theta_v$  [8]:

$$\Theta_v = T_v \left( \frac{p_0}{p_H} \right)^{R/c_p} = T(1 + 0,608q) \left( \frac{p_0}{p_H} \right)^{R/c_p}, \quad (1)$$

где  $p_0$  — давление на уровне Земли;  $p_H$  — давление на высоте  $H$ ;  $T_v$  — виртуальная температура, К;  $T$  — температура окружающего воздуха (К) на высоте  $H$ ;  $R$  — удельная газовая постоянная сухого воздуха (287,05 Дж/(кг·К));  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении (1005 Дж/(кг·К));  $q$  — массовая доля водяного пара (в граммах на 1 г сухого воздуха), которая рассчитывается через температуру и относительную влажность:

$$q = 0,622 \frac{rhE(T)}{p}, \quad (2)$$

где  $rh$  — относительная влажность (0–1);  $E(T)$  — давление насыщенного водяного пара;  $p$  — давление.

Результаты расчетов виртуальной потенциальной температуры представлены на рис. 3. Высота слоя перемешивания и пограничного слоя определяется по точкам перегиба в вертикальном профиле виртуальной температуры. На рис. 4 приведена сезонная динамика высоты слоя перемешивания, определенная из профилей  $\Theta_v$ .

Теперь, взяв за основу высоту слоя перемешивания, полученную из профилей виртуальной потенциальной температуры, рассчитаем интегральное содержание аэрозоля в вертикальном столбе воздуха сечением 1 см<sup>2</sup>. Сезонная динамика интегрального содержания аэрозоля в слое перемешивания показана на рис. 5, из которого видно, что наши предположения относительно летнего минимума оправдались. Однако сезонная зависимость в годо-

вом ходе содержания аэрозоля все же осталась. Как и в случае со счетной концентрацией, выделяются весенний и осенний максимумы. Это означает, что в эти сезоны в атмосферу происходит повышенный выброс паров аэрозолеобразующих соединений.

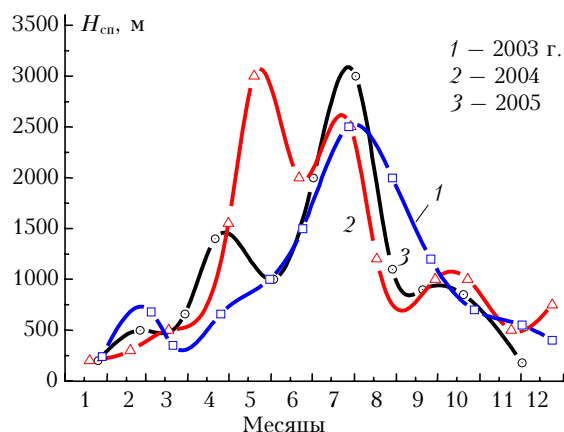


Рис. 4. Сезонный ход высоты слоя перемешивания

Но если для весны дополнительную эмиссию ПАОС можно объяснить испарениями при таянии снега и вегетационной активностью сибирских лесов, выделяющих фотохимически активные вещества, по аналогии с озоном, то причина осеннего максимума пока не совсем очевидна.

В данном случае наиболее вероятно, что вторичный максимум, наблюдаемый осенью, обусловлен обратным биологическим процессом, а именно гниением. Например, известно [4, 5, 9, 10], что в фоновых районах суши основным источником газообразных соединений серы и оксидов азота являются продукты жизнедеятельности микроорганизмов при разложении растительных остатков тканей. Однако для подтверждения этого требуются проведение комплексного эксперимента по исследованию пространственно-временной изменчивости аэрозоля, газов-предшественников аэрозоля и, что самое главное и наиболее проблематичное на данный момент времени, — определение физико-химических характеристик ПАОС.

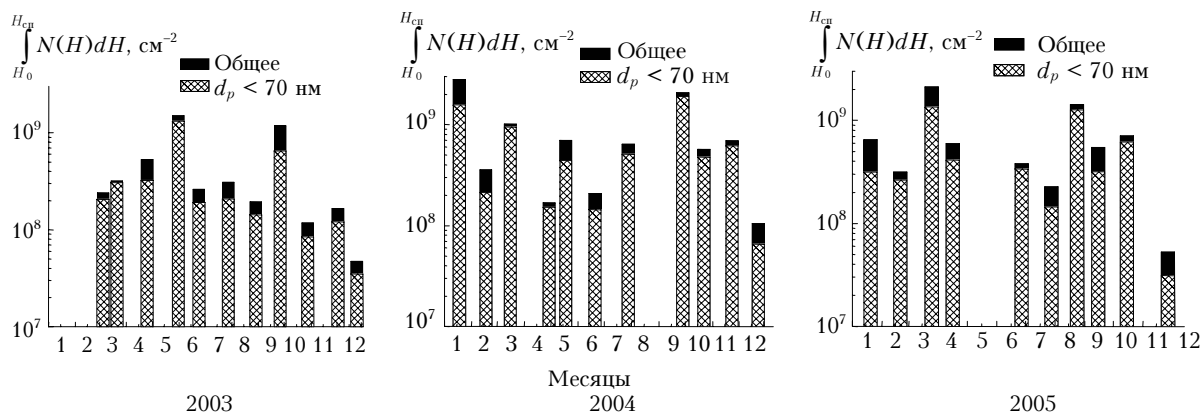


Рис. 5. Интегральное содержание аэрозоля в вертикальном столбе воздуха сечением 1 см<sup>2</sup>

Другой особенностью сезонного поведения интегрального содержания аэрозоля является тот факт, что абсолютный минимум за весь период исследований наблюдался в декабре по причине минимального притока солнечного излучения, необходимого для фотохимических преобразований, а также низкого влагосодержания.

### Заключение

Выполненный анализ сезонной динамики микродисперсной фракции аэрозоля в приземном и пограничном слоях воздуха показал, что содержание наночастиц в атмосфере определяется балансом аэрозолеобразующих соединений и оттоком образовавшихся частиц в более высокие слои атмосферы. Поэтому в летний период, когда генерация ПАОС максимальна, в приземном слое наблюдается минимум концентрации микродисперсных частиц. Сама концентрация находится в обратной зависимости от высоты слоя перемешивания.

Работа выполнена по программе СО РАН № 24.3, при поддержке программы Президиума РАН № 16, программ отделения наук о Земле РАН № 9 и 11, грантов РФФИ № 04-05-64559, 06-05-79036, 06-05-08104, 04-05-65179, проекта Роснауки РФ № 02.451.11.7030, проекта МНТЦ № 3032 и Лаврентьевского конкурса молодежных проектов СО РАН, проект № 45.

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Краснов О.А., Мачида Т., Максюттов Ш.,

Недэлэк Ф., Рамонет М., Сиас Ф., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонентов над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 10. С. 905–908.

2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Толмачев Г.Н. Результаты климато-экологического мониторинга на TOR-станции. Ч. 3. Атмосферный аэрозоль // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1185–1190.

3. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 983–990.

4. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York: Wiley and Sons, 1998. 1327 p.

5. Pandis S.N., Wexler A.S., Seinfeld J.H. Dynamics of tropospheric aerosols // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. P. 9646–9659.

6. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1045–1054.

7. Панченко М.В., Терпугова С.А. Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1033–1044.

8. Stull R.V. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass., 1988. P. 688.

9. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 425 с.

10. Исидоров В.А. Экологическая химия. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.

*M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. Organization and some results of monitoring of green house and oxidizing atmosphere components over Siberia. 2. Aerosol composition.*

Results of many-year monitoring of aerosol fine fraction in the ground air layer and free atmosphere have been analyzed. It is shown that despite maximal generation of aerosol-forming matters, minimal concentration of nanoparticles in the ground layer is observed in summer period. This can be explained by their transfer to higher layers, because their concentration inversely depends on the mixing layer height.