

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

**Анализ связи конденсационной активности
приземного аэрозоля с его химическим составом
и относительной влажностью воздуха по измерениям
на Звенигородской научной станции**

А.Н. Груздев, А.А. Исаков, Л.М. Шукурова*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 16.04.2013 г.

По данным ИК-спектров пропускания аэрозольных проб и результатам измерений оптических характеристик приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции исследуется статистическая связь параметра конденсационной активности Хенела с относительной влажностью воздуха и основными химическими компонентами аэрозоля: сульфатным, нитратным и минеральным, – содержащимися в частицах диаметрами 1–2 мкм. Выявлено, что параметр Хенела приземного аэрозоля, содержащего нитраты, уменьшается с ростом относительной влажности воздуха. Увеличение доли нитратов в микронных частицах приводит, вероятно, к небольшому увеличению параметра Хенела. Наличие малорастворимых минеральных частиц в составе 2-микронной фракции аэрозоля приводит к уменьшению параметра Хенела. Значения параметра Хенела, характерные для сульфатного аэрозоля, вероятно, заключены в пределах 0,4–0,6. Сезонные изменения параметра Хенела в определенной степени обусловлены изменениями химического состава аэрозоля.

Ключевые слова: аэрозоль, конденсационная активность, параметр Хенела, химический состав; aerosol, condensation activity, Hänel parameter, chemical composition.

Введение

Трансформация аэрозоля при изменении относительной влажности воздуха приводит к изменению микрофизических и оптических свойств аэрозоля. Это отражается на радиационных свойствах атмосферы и, тем самым, может оказывать влияние на климат [1, 2]. Гигроскопические свойства аэрозоля зависят от микроструктуры и химического состава аэрозольных частиц [3–5]. Способность аэрозоля поглощать водяной пар в значительной степени обусловлена неорганическими солевыми компонентами [3, 5]. Однако на эту способность могут существенно влиять и органические компоненты аэрозоля – как растворимые, так и нерастворимые в воде соединения [5, 7, 8].

В зарубежных работах для изучения гигроскопических свойств аэрозоля обычно применяются tandem дифференциальные анализаторы подвижности (tandem differential mobility analyzer – TDMA), измеряющие зависимость размеров частиц от относительной влажности воздуха [4–6, 8]. Этот метод позволяет подробно исследовать влияние влажности на распределение частиц по размерам. Однако для

описания изменения оптических характеристик аэрозоля при изменении относительной влажности воздуха приходится привлекать дополнительные модельные представления.

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН для экспериментального изучения гигроскопических свойств атмосферного аэрозоля применяется метод, основанный на изменении измеренного оптического отклика аэрозоля в ответ на изменение относительной влажности воздуха. Он основан на эмпирических формулах Хенела и Кастена [9, 10], в соответствии с которыми для коэффициента направленного светорассеяния D под углом 45° можно записать:

$$D = D_0(1 - f)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где D_0 – коэффициент направленного светорассеяния, обусловленный сухой основой аэрозоля; f – относительная влажность воздуха; γ – параметр конденсационной активности (ПКА, или параметр Хенела). Измеряя значения D_1 и D_2 , соответствующие двум различным значениям f_1 и f_2 относительной влажности, можно получить оценку γ :

$$\gamma = \frac{-\ln(D_1/D_2)}{\ln((1 - f_1)/(1 - f_2))}. \quad (2)$$

* Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Андрей Александрович Исаков (a.a.isakov@mail.ru); Людмила Михайловна Шукурова (lshukurova@mail.ru).

По результатам многолетних измерений ПКА приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции ИФА (ЗНС) и в г. Томске выполнен анализ его временной изменчивости на временных масштабах от нескольких суток до нескольких лет [11–14].

Формулы (1), (2) предполагают неизменность значения γ при изменении относительной влажности воздуха. Однако результаты недавних исследований показывают, что это предположение может не выполняться [15–17].

Параметр γ при прочих равных условиях зависит от химического состава и распределения по размерам частиц сухой основы аэрозоля. На ЗНС эпизодически осуществляется сбор проб приземного аэрозоля с последующим анализом их молекулярного состава по спектрам пропускания в ИК-области [18]. Одновременно выполняются измерения массовой концентрации и ПКА приземного аэрозоля [13]. В настоящей статье представлены результаты анализа статистической связи параметра конденсационной активности с химическим составом аэрозоля и относительной влажностью воздуха.

Методы измерений и использованные данные

Анализ химического состава аэрозоля выполнялся по спектрам пропускания аэрозольных проб, осаждаемых с помощью каскадного импактора на прозрачные в ИК-области германиевые подложки (оптические окна) с разделением по трем градациям размеров частиц, соответствующим примерно значениям 0,7, 1–1,3 и 2 мкм по диаметру [18]. Каждая проба собиралась (с перерывами) 24 ч в течение 2–3 дней. Частицы размерами 0,7–1,3 мкм осаждаются на одну и ту же подложку и распределены вдоль радиуса подложки таким образом, что в центре формируется круглое пятно с более крупными частицами (диаметрами примерно 1–1,3 мкм), а дальше от центра – кольцо с частицами меньшего размера (среднее значение $\sim 0,7$ мкм).

Содержание сульфатов, нитратов, органических и минеральных веществ в аэрозольной пробе оценивалось по глубинам соответствующих полос поглощения и затем нормировалось на среднее по периоду сбора пробы значение массовой концентрации аэрозоля, полученное с помощью спектрополяриметра (см. ниже). Отметим, что ввиду распределения по большей площади плотность кольца осажденных частиц диаметром $\sim 0,7$ мкм на подложке не всегда достаточна для уверенной идентификации содержащихся в них химических компонентов.

Содержание сульфатов (группа SO_4^{2-}) в составе аэрозоля определялось по полосе поглощения в спектральной области $1080\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, нитратов (NO_3^-) – по полосе $1350\text{--}1380\text{ см}^{-1}$, минерального компонента – силикатов (Si-O) – по полосе в окрестности 1030 см^{-1} . На рис. 1 приведены примеры спектров пропускания аэрозольных проб для фракций ~ 1 и 2 мкм в различных сочетаниях по результатам измерений в 2010 г. Микронная фракция за 23–24 фев-

раля содержит сульфат аммония, а 2-микронная фракция – нитраты (рис. 1, а). В обеих фракциях 3–4 марта обнаружены нитраты (рис. 1, б). Микронная фракция за 3–4 июня содержит сульфат аммония, а в 2-микронной фракции выявлены силикаты и карбонаты (рис. 1, в).

В работе использованы результаты анализа около 160 аэрозольных проб, собранных в 2000–2005 и 2010 гг. В распределении по сезонам основная часть проб соответствует периоду с февраля по апрель.

Для измерений массовой концентрации и параметра конденсационной активности приземного аэрозоля использован спектрополяриметр, регистрирующий поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния под углом 45° на длине волны $0,54$ мкм. Аппаратура и методика измерений описаны в [11, 13]. Погрешность определения индикатрисы рассеяния составляет 5–7% и в основном обусловлена естественными флуктуациями концентрации аэрозоля. Значения ПКА определяются по значениям индикатрисы рассеяния D_1 и D_2 , полученным при разных значениях относительной влажности воздуха f_1 и f_2 в рабочей камере прибора. Начальное значение f_1 равняется значению относительной влажности в атмосфере, а конечное, более низкое значение f_2 достигается путем быстрого нагрева. Ошибки определения ПКА составляют в среднем около 0,1.

Относительная влажность в атмосфере во время измерений ПКА определяется стандартным способом на метеостанции, расположенной в 50 м от пункта аэрозольных измерений, с точностью около 5%. Относительная влажность в рабочей камере прибора после осушки аэрозоля рассчитывается по изменению температуры, которая измеряется непрерывно с точностью $0,2^\circ\text{C}$ с помощью малоинерционного температурного датчика, установленного непосредственно в рассеивающем объеме.

Процесс осушки аэрозоля занимает доли секунды и, на наш взгляд, не должен приводить к сколь угодно существенным изменениям его химического состава. Таким образом, ПКА есть рассчитанный по формуле (2) оптический отклик аэрозоля на уменьшение относительной влажности воздуха, полученное путем нагревания. Чтобы увеличить диапазон изменения относительной влажности в процессе измерений ПКА, они выполнялись преимущественно утром, при относительно более высоком значении относительной влажности атмосферного воздуха.

В период сбора аэрозольных проб в 2010 г. схема измерений ПКА была несколько иной. Нагрев был ослаблен, и уменьшение относительной влажности при измерениях ПКА составляло около 10% (при этом начальные значения f_1 варьировались ото дня ко дню). Если формула (2) справедлива, то при значениях $\gamma > 0,3$ такого уменьшения относительной влажности достаточно, чтобы обеспечить изменение коэффициента аэрозольного рассеяния, превышающее погрешность его определения. Однако при меньших значениях γ изменение коэффициента рассеяния D будет в пределах погрешности при малых значениях относительной влажности воздуха.

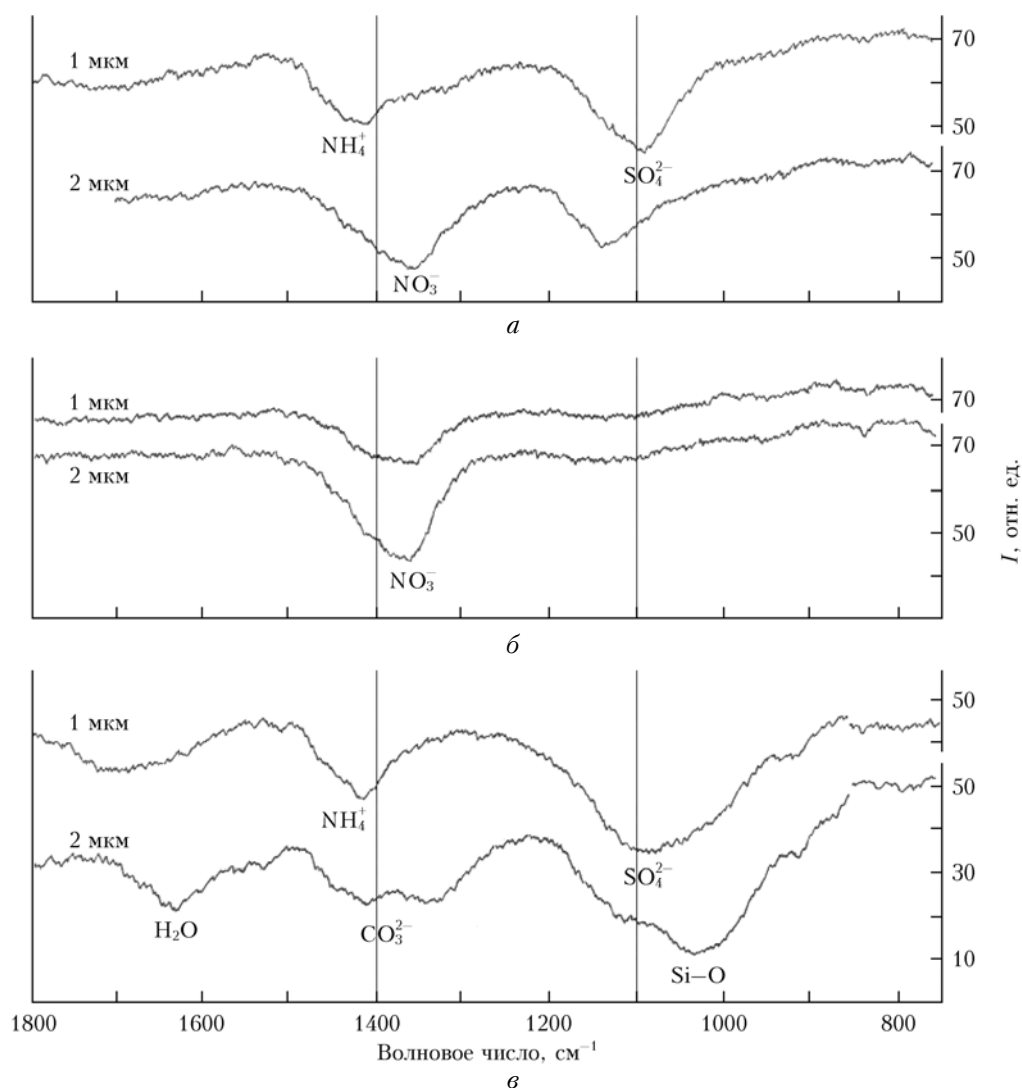


Рис. 1. ИК-спектры пропускания проб аэрозоля для фракций 1 и 2 мкм 23–24 февраля (а), 3–4 марта (б) и 3–4 июня (в) 2010 г. H₂O NH₄⁺ CO₃²⁻ Si–O SO₄²⁻ NO₃⁻ 1 мкм 2 мкм

Такая схема измерений дала возможность статистическим путем проверить зависимость γ , определяемого по формуле (2), от относительной влажности воздуха f . Следует отметить, что если γ зависит от f , то закономерность, описываемая формулой (1), нарушается.

Результаты анализа

Связь с относительной влажностью воздуха. Анализ связи параметра Хенела γ с относительной влажностью воздуха выполнен для всего массива данных, соответствующих периоду сбора аэрозольных проб в 2010 г., а также для ситуаций, когда в пробах доминировали сульфаты, в том числе для группы данных с особо глубокими полосами поглощения сульфатов, и для ситуаций проб с доминирующими нитратами в микронной и/или 2-микронной фракциях. В трех первых случаях корреляция ПКА и относительной влажности не выявлена (рис. 2, а). Только

в группе, представленной пробами с преобладающими полосами нитратов, обнаружена статистически значимая корреляция между ПКА и относительной влажностью (рис. 2, б, в). Для случаев, когда одновременно 1- и 2-микронная фракция аэрозоля содержали нитраты, коэффициент корреляции между параметром Хенела и относительной влажностью $R = -0,67$ с высокой степенью достоверности (уровень статистической значимости p очень мал), а коэффициент линейной регрессии с 95% доверительным интервалом $b = -1,6 \pm 0,4$ (рис. 2, б). На рис. 2, в представлены значения параметра Хенела как функция $-1/\ln(1 - f)$ [ср. с формулой (2)]. Коэффициент корреляции между этими величинами $R = 0,64$. Следует отметить больший разброс параметра Хенела на рис. 2, б, в при малых значениях относительной влажности, что обусловлено, вероятно, недостаточной точностью его оценки при этих значениях.

Таким образом, корреляционно-регрессионный анализ показывает, что определяемый по формуле (2) ПКА приземного аэрозоля, в котором преобладают

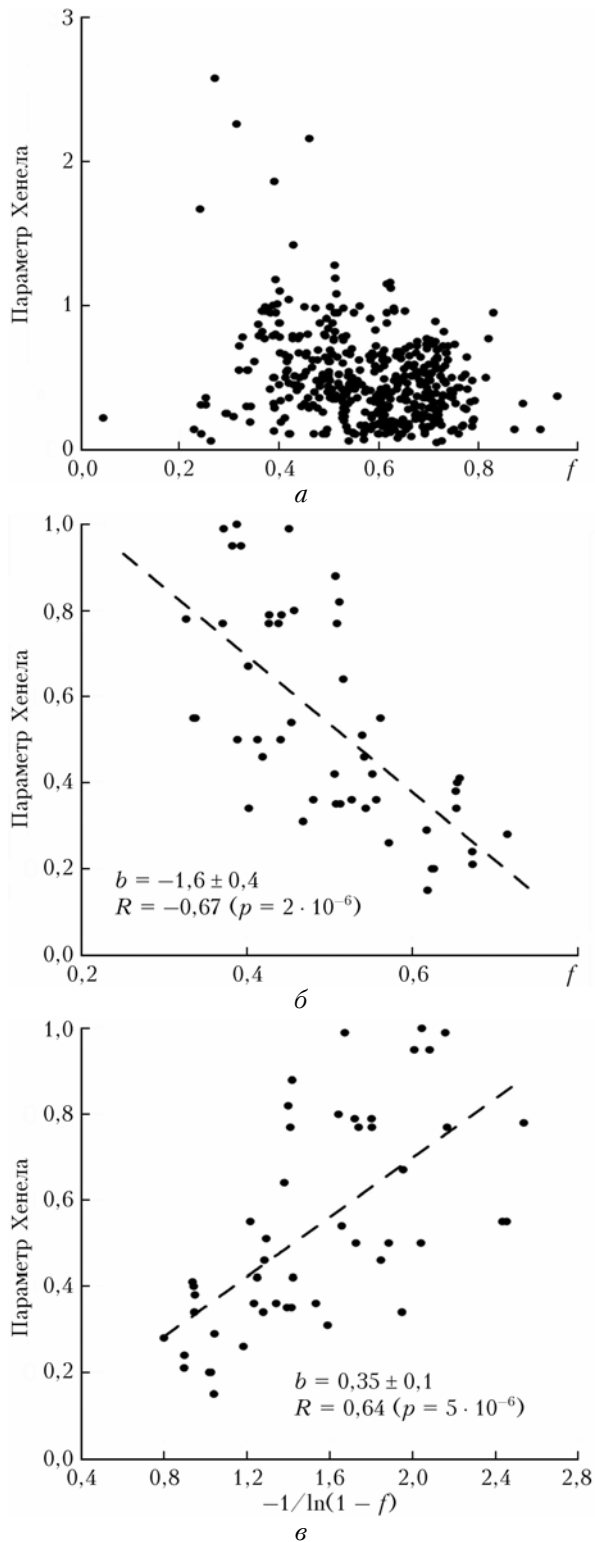


Рис. 2. Корреляционная диаграмма параметра конденсационной активности аэрозоля и относительной влажности воздуха в течение всего периода сбора аэрозольных проб в 2010 г. (а) и в случаях, когда 1- и 2-микронные фракции аэрозоля содержали нитраты (б); параметр конденсационной активности как функция $-1/\ln(1-f)$ (в). Штриховые прямые – линейные регрессии ПКА на f или $-1/\ln(1-f)$. Приведены значения коэффициентов линейной регрессии b с 95% доверительными интервалами и коэффициентов корреляции R с уровнем статистической значимости p

нитраты, в целом больше при низких значениях относительной влажности воздуха, чем при высоких. Наличие наряду с нитратами других соединений (обычно в микронной фракции) приводит к ослаблению статистической связи ПКА с относительной влажностью воздуха.

Связь с химическим составом аэрозоля. Аэрозоль представляет собой многокомпонентную смесь различных химических соединений, которые по отдельности могут обладать разной гигроскопичностью. Тем не менее нам удалось установить связь между параметром Хенела и наличием растворимых солевых и малорастворимых минеральных компонентов в составе аэрозольных частиц. На рис. 3 приведены значения ПКА аэрозоля, осредненные за интервалы сбора проб в 2002–2005 и 2010 гг., для случаев, когда пробы двухмикронной фракции содержали нитраты или минеральные частицы, в зависимости от нормированного содержания этих компонентов. Нормированное содержание определялось как отношение глубины полосы поглощения A в спектре пробы к среднему за интервал сбора пробы значению массовой концентрации аэрозоля M . Для минеральных частиц использована полоса поглощения силикатов (см. рис. 1).

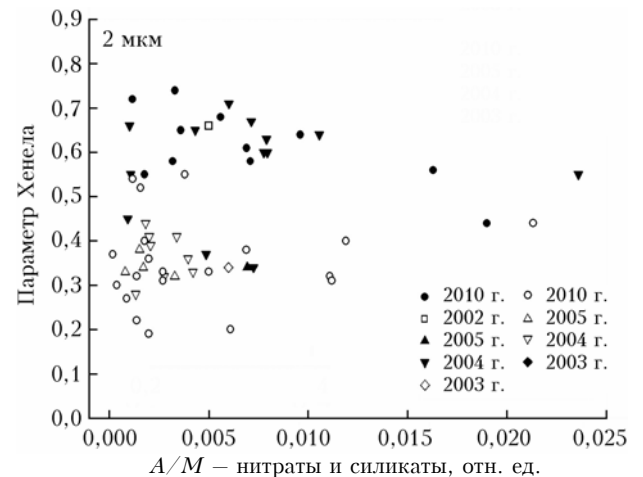


Рис. 3. Параметр Хенела в случаях, когда пробы аэрозоля с размерами частиц 2 мкм содержали нитраты (темные значки) и силикаты (светлые значки), в зависимости от содержания этих химических компонентов

Рис. 3 показывает, что аэрозоль, содержащий в грубодисперсной фракции минеральные частицы, обычно имеет значения параметра Хенела меньше 0,45. Аэрозоль с нитратными частицами в 2-микронной фракции чаще всего характеризуется параметром конденсационной активности, превышающим 0,5 (при этом микронная фракция обычно содержала нитраты или сульфаты).

Если рассмотреть случаи, когда нитраты были выявлены в микронной фракции (при этом 2-микронная фракция чаще содержала нитраты или минеральные частицы), то можно отметить слабый рост параметра Хенела с увеличением доли нитратных частиц (рис. 4).

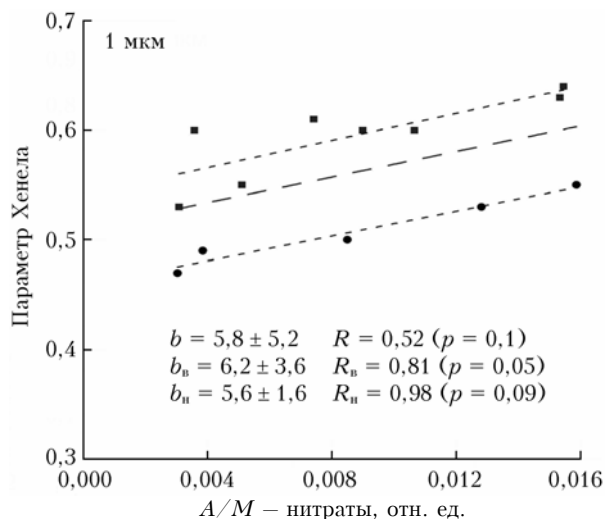


Рис. 4. Параметр Хенела в случаях, когда микронная фракция аэрозоля состояла из нитратов, в зависимости от содержания в ней нитратов. Средняя прямая соответствует линейной регрессии параметра Хенела на содержание нитратов по всем данным, верхняя и нижняя прямые — линейным регрессиям по верхней (квадраты) и нижней (кружки) группам данных. Приведены значения коэффициентов линейной регрессии b с 95% доверительными интервалами и коэффициентов корреляции R с уровнем статистической значимости p

Здесь приведены только результаты за 2002–2005 гг., когда параметр Хенела оценивался по широкому диапазону изменения относительной влажности. Коэффициент корреляции между ПКА и нормированным содержанием нитратов составляет 0,52 с уровнем значимости 0,1. Можно различить две группы данных. Коэффициенты линейной регрессии для верхней и нижней групп близки между собой, а коэффициенты корреляции достигают высоких значений 0,81 ($p = 0,05$) и 0,98 ($p = 0,09$) соответственно. Причина разделения данных на две группы не ясна. Возможно, она имеет случайный характер. Несомненно, что выявленную закономерность увеличения параметра Хенела для нитратных микронных частиц с увеличением доли нитратов необходимо проверить на более обширном материале, который обеспечил бы большую степень статистической достоверности.

Отметим, что изменения параметра Хенела в соответствии с линейными регрессиями на рис. 4 не выходят за пределы погрешности измерений параметра. В связи с этим напомним, что регрессионная модель предсказывает ожидаемое значение зависимой переменной по заданному значению независимой переменной. Это ожидаемое значение не обязательно совпадает с наблюдаемым значением, однако оно будет равно среднему значению всех таких наблюдаемых значений при наличии неограниченной выборки. Поэтому разность между ожидаемыми значениями зависимой переменной, соответствующими разным значениям независимой переменной, может быть меньше погрешности единичного наблюдения.

В большинстве аэрозольных проб, собираемых на ЗНС, в субмикронной и микронной фракциях при-

сутствуют сульфаты, при этом двухмикронная фракция обычно содержит нитраты или минеральные частицы [18]. На рис. 5 показаны значения ПКА для случаев, когда микронная фракция состояла преимущественно из сульфата аммония, в зависимости от нормированного содержания сульфатов. По мере увеличения вклада в массовую концентрацию микронных сульфатных частиц разброс значений параметра Хенела уменьшается и стремится к значениям в диапазоне 0,4–0,6. Следовательно, можно предположить, что для сульфатного аэрозоля характерны значения параметра Хенела из указанного диапазона.

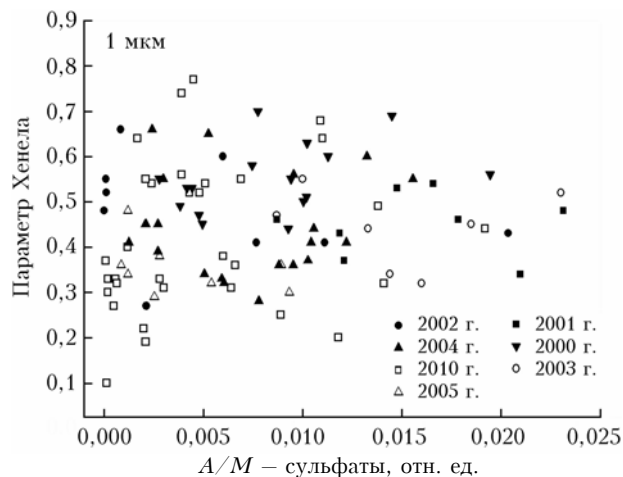


Рис. 5. Параметр Хенела для сульфатного аэрозоля

Представленные результаты показывают, что значение ПКА определяется преимущественно химическим составом частиц. В определенной степени оно зависит от химического состава крупных частиц диаметром около 2 мкм, которые на ЗНС имеют чаще всего минеральное происхождение или содержат нитраты.

Как указывалось, ПКА испытывает временные вариации, включая сезонные изменения. Химический состав аэрозоля на ЗНС тоже подвержен сезонным изменениям [18]. На рис. 6 представлены значения параметра Хенела для проб, собранных с 17 февраля по 4 июня и в период лесных пожаров августа в 2010 г. Относительно высокие значения параметра (в окрестности 0,7) в феврале–марте обусловлены, по-видимому, наличием выявленных в микронной фракции растворимых сульфатных и нитратных компонентов при незначительной доле минеральных частиц в более крупной фракции (2 мкм). По мере увеличения доли минеральных частиц (когда снег сошел на большой территории) и при наличии в воздухе пыли в мае значение параметра Хенела падает до минимального: $\sim 0,2$.

Группа точек с параметром Хенела 0,3–0,4, выделенных на рис. 6 овалом, связана с заносом почвенного аэрозоля. При этом полосы поглощения силикатов и карбонатов отмечены также и в спектрах проб микронной фракции, что для нее не характерно.

Таким образом, уменьшение параметра Хенела от зимы к лету в значительной степени обусловлено изменениями химического состава аэрозоля.

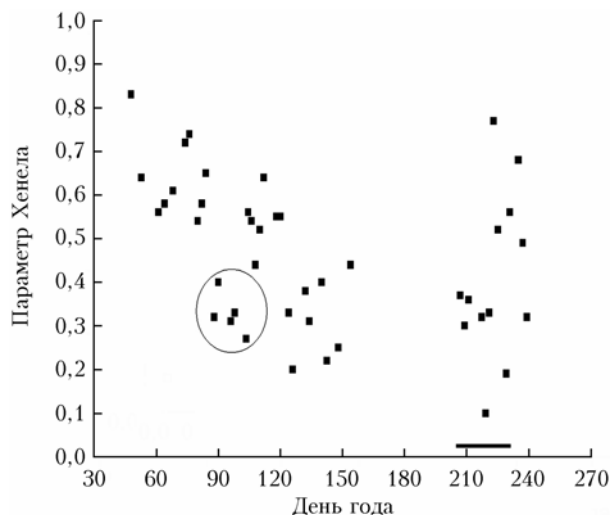


Рис. 6. Изменение параметра Хенела с 17 февраля по 4 июня и в августе 2010 г. Отмечены: группа проб почвенного аэрозоля с 29 марта по 14 апреля (овал) и период лесных пожаров в августе (черта, параллельная оси абсцисс)

Наличие силикатов в крупных частицах влияет на значения параметра Хенела и в летний период, в том числе в период лесных и торфяных пожаров летом 2010 г. (отмечен на рис. 6 горизонтальным отрезком). Низкие значения параметра Хенела в этот период, по-видимому, вызваны и наличием в аэрозоле органических соединений. Значения параметра Хенела меньше 0,4 в этот период характерны для аэрозоля, содержащего силикаты в крупной фракции. Наиболее богаты органическими соединениями пробы, которым соответствуют низкие значения параметра Хенела ~ 0,1 и 0,2. Группа высоких значений параметра Хенела в августе 2010 г. соответствует солевому аэрозолю (сульфатам и нитратам) в отсутствие силикатов в крупнодисперсной фракции, принесенному из областей вне зоны пожаров.

Заключение

На Звенигородской научной станции исследована статистическая связь параметра конденсационной активности Хенела с относительной влажностью воздуха и основными химическими компонентами атмосферного аэрозоля.

По результатам измерений в 2010 г. выявлено уменьшение параметра Хенела для аэрозоля, содержащего нитраты, с ростом относительной влажности воздуха. Для других химических компонентов какой-либо зависимости ПКА от относительной влажности воздуха не обнаружено.

Из анализа данных за 2002–2004 и 2010 гг. следует, что наличие малорастворимых минеральных частиц в составе грубодисперсной фракции аэрозоля (~ 2 мкм) приводит к уменьшению параметра Хенела. Значения параметра меньше 0,45 соответствуют случаям, когда эта фракция имела почвенное происхождение, и больше 0,5, когда она состояла из нитратов.

Для случаев, когда нитраты были выявлены в микронных частицах, получена более определенная

закономерность. Показано, что увеличение содержания нитратов в микронных частицах приводит, вероятно, к небольшому увеличению параметра Хенела.

Для сульфатного аэрозоля не выявлены какие-либо закономерности между параметром Хенела и содержанием сульфатов. Однако можно сделать вывод, что значения параметра Хенела, характерные для сульфатного аэрозоля, вероятнее всего, заключены в пределах 0,4–0,6.

На примере 2010 г., для которого имеется наиболее подробный ряд данных совместных измерений ПКА и химического состава аэрозоля, показано, что сезонные изменения параметра Хенела в определенной степени обусловлены изменениями химического состава аэрозоля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00938) и программ РАН.

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 4. С. 301–320.
2. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
3. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1982. 368 с.
4. McMurphy P.H. A review of atmospheric aerosol measurements // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 12–14. P. 1959–1999.
5. Swietlicki E., Hansson H.-C., Hämeri K., Swenningsson B., Massling A., McFiggans G., McMurphy P.H., Petäjä T., Tunved P., Gysel M., Topping D., Weingartner E., Baltensperger U., Rissler J., Wiedensohler A. Hygroscopic properties of submicrometer atmospheric aerosol particles measured with H-TDMA instruments in various environments – a review // Tellus. B. 2008. V. 60, N 3. P. 432–469.
6. Mikhailov E., Vlasenko S., Niessner R., Pöschl U. Interaction of aerosol particles composed of protein and salts with water vapor: hygroscopic growth and microstructural rearrangement // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, N 2. P. 323–350.
7. Saxena P., Hildemann L.M., McMurphy P.H., Seinfeld J.H. Organic alter hygroscopic behavior of atmospheric particles // J. Geophys. Res. D. 1995. V. 100, N 9. P. 18755–18770.
8. Shi Y., Ge M., Wang W. Hygroscopicity of internally mixed aerosol particles containing benzoic acid and inorganic salts // Atmos. Environ. 2012. V. 60, N 1. P. 9–17.
9. Hänel G. The real part of the mean complex refractive index and the mean density of samples of atmospheric aerosol particles // Tellus. 1968. V. 20, N 3. P. 371–379.
10. Kasten F. Visibility forecast in the phase of pre-condensation // Tellus. 1969. V. 21, N 5. P. 631–635.
11. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 393–399.
12. Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Полькин В.В., Яушева Е.П. Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
13. Исаков А.А., Груздев А.Н. Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции //

- Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 44, № 2. С. 245–254.
14. Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Полькин В.В., Яушева Е.П. Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 314–318.
 15. Терпугова С.А., Голобокова Л.П., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Сравнительный анализ конденсационной активности и химического состава приземного аэрозоля // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 4.
 16. Груздев А.Н., Исаков А.А., Шукурова Л.М. Связь параметра конденсационной активности приземного аэрозоля с влажностью воздуха и химическим составом аэрозоля по измерениям на Звенигородской научной станции ИФА РАН // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. С. 4–5.
 17. Терпугова С.А., Докукина Т.А., Яушева Е.П., Панченко М.В. Сезонные особенности проявления различных типов гигрограмм коэффициента рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 952–957.
 18. Шукурова Л.М., Груздев А.Н. Временная изменчивость химического состава приземного аэрозоля в Подмоскowie в 1999–2005 гг. по результатам ИК-спектроскопии аэрозольных проб // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 3. С. 332–346.

A.N. Gruzdev, A.A. Isakov, L.M. Shukurova. Analysis of relation of condensation activity of surface aerosol to its chemical composition and relative humidity of the air according to measurements at Zvenigorod Scientific Station.

Using data of IR transmittance spectra of aerosol samples and data of measurements of surface aerosol optical characteristics at Zvenigorod Scientific Station, a statistical relation of the Hänel parameter of condensation activity to air relative humidity and essential chemical components of aerosol, such as sulphates, nitrates, and minerals in particles with diameters of 1–2 μm , is studied. The Hänel parameter of surface aerosol containing nitrates has been shown to decrease with the increase of the relative humidity of air. The increase in portion of nitrates in micron particles results, probably, in a few increase in the Hänel parameter. The presence of poorly soluble mineral particles in 2- μm fraction of aerosol results in the decrease in Hänel parameter. Values of the Hänel parameter characteristic for sulphate aerosol are, probably, concluded within 0.4–0.6. Seasonal changes in the Hänel parameter are caused in part by changes in chemical composition of aerosol.