

УДК 551.510.42

## Анализ поверхностных слоев частиц атмосферных аэрозолей Восточной Сибири методом вторичной ионной масс-спектрометрии

В. П. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, С. Н. ТРУХАН<sup>1,2</sup>, Д. И. КОЧУБЕЙ<sup>1</sup>, О. Г. НЕЦВЕТАЕВА<sup>3</sup>, Т. В. ХОДЖЕР<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт катализа имени Г. К. Борескова Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 5, Новосибирск 630090 (Россия)

<sup>2</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Ленинградская, 113, Новосибирск 630008 (Россия)

<sup>3</sup>Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: vpivanov@catalysis.nsk.su

(Поступила 30.01.2002; после доработки 01.04.2002)

### Аннотация

Методом вторичной ионной масс-спектрометрии исследован элементный и фазовый состав поверхностных слоев частиц атмосферных аэрозолей (АА), отобранных зимой 1998 г. в Иркутске, Листвянке и Улан-Удэ. Установлено, что источником АА является эрозия алюмосиликатных почв. Поверхность частиц АА покрыта адсорбированными углеводородами, азотсодержащими соединениями, водой и частично органическими частицами, размеры которых составляют примерно 30 нм.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время было высказано предположение, что на поверхности твердых аэрозольных частиц в тропосфере под действием света могут протекать многие фотокаталитические реакции и тем самым оказывать существенное воздействие на глобальную химию атмосферы [1–5]. На сегодняшний день имеются лишь экспериментальные данные об объемном составе атмосферных аэрозолей, тогда как для оценки роли аэрозолей в атмосферных фотокаталитических процессах необходимо знание состава поверхности их частиц, поскольку в фотохимических процессах основную роль играет элементный и фазовый состав поверхностных слоев. Учитывая это обстоятельство, мы разработали методику исследования состава поверхностных слоев частиц атмосферных аэрозолей (АА) с изучением распределения элементов по глу-

бине методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [6]. Проведение такого анализа позволяет решить две задачи – определить химический состав поверхностных слоев частиц АА и на его основании прогнозировать возможные фотокаталитические реакции, одновременно проводя мониторинг химического состава АА, поскольку состав глубоких слоев по мере ионного травления частиц соответствует объемному составу. Для решения задач мониторинга АА метод ВИМС имеет ряд преимуществ перед другими физическими методами. Действительно, он позволяет регистрировать все элементы Периодической системы, а для анализа требуется незначительное количество анализируемого вещества без какой-либо предварительной обработки. Следует отметить, что число работ, посвященных исследованию состава поверхности частиц атмосферных аэрозолей, очень мало [7].

В данной работе методом ВИМС исследован элементный и фазовый состав поверхностных слоев частиц атмосферных аэрозолей Восточной Сибири, отобранных в январе и феврале 1998 г. в Иркутске, Листвянке и Улан-Удэ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы АА собирались в различных местах прокачкой воздуха через фильтры "Ватман" в течение нескольких часов.

Исследование элементного состава поверхностных слоев выполнено на приборе МС-7201, оснащенный монополюсным масс-анализатором с автоматизированной системой управления, сбора и обработки информации на базе ЭВМ ДВК-3 с интерфейсом КАМАК. Подробно установка и методика исследования описаны в [6]. Отметим, что диаметр первичного ионного пучка, падающего под углом  $45^\circ$  к нормали поверхности держателя, равен 2 мм, а площадь бомбардируемой поверхности –  $5 \text{ мм}^2$ . Давление остаточных газов не превышало  $3 \cdot 10^{-6}$  Па. Бомбардировку проводили ионами аргона с энергией 4 кэВ и плотностью тока  $j = 20 \text{ мкА/см}^2$ .

Подготовка образцов к анализу заключалась в том, что снятую скальпелем с фильт-

ра в виде соскобов часть осадка аэрозолей втирали в подложку из высокочистого индия (99.99999 %). При этом волокон фильтра на индии практически не оставалось. Как показали результаты анализа подложки и образцов фильтра без аэрозолей, такой метод исследования образцов диэлектриков позволяет устранить их зарядку под ионным пучком, но не вносит примесей.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование поверхностных слоев частиц АА проводилось посредством циклической регистрации спектров в диапазоне  $m/z = 10-120$ . В каждом эксперименте последовательно снимались шесть спектров в указанном диапазоне масс, причем один спектр снимался в течение 170 с. Характерный масс-спектр вторичной ионной эмиссии (ВИЭ) представлен на рис. 1. Штриховой линией показан первый спектр, а сплошной – шестой спектр, наблюдаемый после выхода значений ионных токов на стационар. Последний спектр соответствует глубине травления  $\sim 40$  нм. Так как ионные токи элементов на такой глубине выходят на стационарный уровень, можно полагать, что они отвечают объемному содержанию элементов.

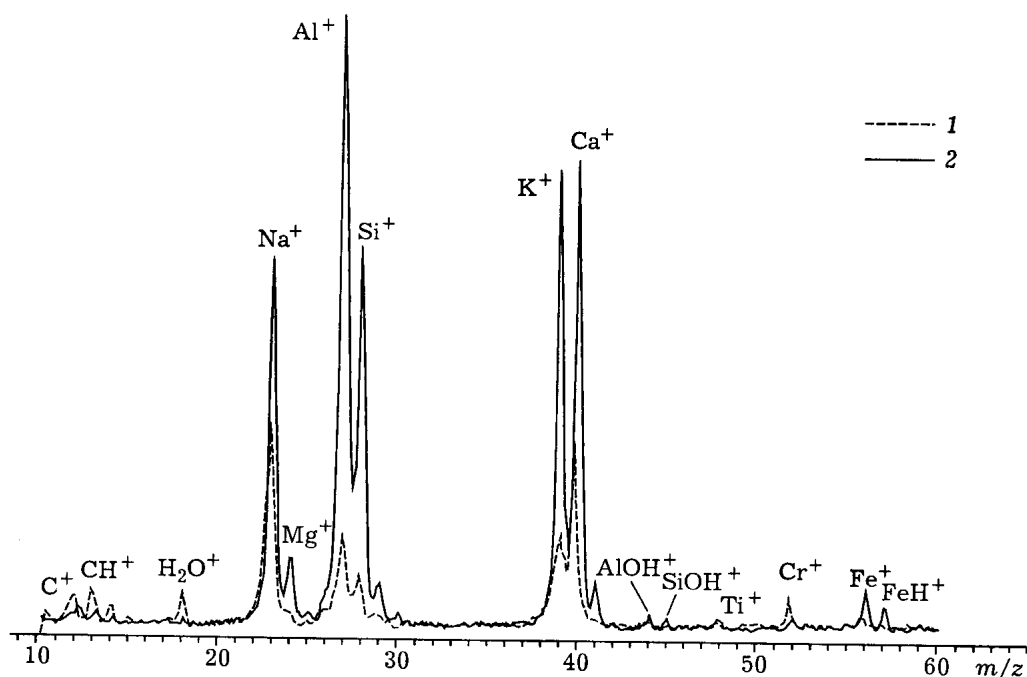


Рис. 1. Масс-спектр вторичной ионной эмиссии типичного образца АА из отобранных в Иркутске: 1 – поверхность, 2 – объем.

ТАБЛИЦА 1

Наблюдаемые пики в масс-спектрах вторичной ионной эмиссии АА и их идентификация (пояснения см. в тексте)

$m/z$	Тип иона	Источник образования	$m/z$	Тип иона	Источник образования
12	$C^+$	1	39	$K^+, C_3H_3^+$	*, 1
13	$CH^+$	1	40	$Ca^+, Ar^+, C_3H_4$	*, 1
14	$CH_2^+, N^+$	1, 2	41	$K^+, C_3H_5^+$	*, 1
15	$CH_3^+, NH^+$	1, 2	42	$Ca^+$	*
16	$O^+, NH_2, CH_4^+$	*, 1, 2	43	$AlO^+$	**
17	$OH^+, NH_3^+$	2	44	$SiO^+, AlOH^+$	**
18	$H_2O^+$		45	$SiOH^+$	**
23	$Na^+$	*	48	$Ti^+$	*
24	$Mg^+, C_2^+$	*	52	$Cr^+$	*
25	$Mg^+, C_2H^+$	*, 1	56	$Fe^+, CaO^+, Si_2^+$	*, **
26	$C_2H_2^+$	1	57	$FeH^+$	**
27	$Al^+, C_2H_3^+$	*	59	$Co^+$	*
28	$Si^+, CO^+, C_2H_4^+, N_2^+$	*, 1, 3	64	$TiO_2^+$	**
29	$Si^+, COH^+, C_2H_5^+$	*, 1, 3	72	$FeO^+$	**
30	$Si^+, COH_2^+, NO^+$	*, 3			

Идентификация наблюдаемых в масс-спектрах пиков поясняется в табл. 1, где для каждого значения  $m/z$  указаны возможные ионы и источники их образования. Ниже дана расшифровка обозначений для источников образования.

\* – ионы, которые следует отнести за счет распыления основных и примесных элементов АА, так как они наблюдаются при всех временах бомбардировки.

1 – ионы, образующиеся при распылении пучком  $Ar^+$  адсорбированных углеводородов или органических частиц. Характерная особенность поведения таких ионов – быстрый спад интенсивности (ионных токов) из-за быстрого уменьшения концентрации в адсорбированном слое. Кроме того, для адсорбированных углеводородных соединений коэффициент распыления существенно больше, чем для твердых тел [8]. Следует добавить, что интенсивность ионных токов  $C_nH_m^+$  уменьшается с ростом  $n$ . Действительно, из рис. 1 видно, что интенсивность иона  $C_2H_2^+$  значительно меньше таковой для иона  $CH^+$ . Поэтому вклад таких ионов в интенсивность ионов основных элементов мал, особенно после нескольких секунд ионной бомбардировки. Так, вкладом ионов  $C_2H_3^+$  в пик ионов с  $m/z = 27$  можно пренебречь. Аналогичное рассуждение справедливо и для пиков с  $m/z = 28, 39, 40$

и др. При бомбардировке образцов пучком ионов аргона в спектрах в принципе может наблюдаться ион  $Ar^+$ . Однако наличие его легко обнаружить по изотопу аргона с  $m/z = 36$ . В пределах чувствительности он не регистрируется. Следует отметить, что относительная концентрация Fe (см. ниже) определялась по интенсивности пика  $m/z = 56$  с учетом вклада ионов  $Si_2^+$  и  $CaO^+$  в эту массу:

$$I(Fe^+) = I(m/z = 56) - 0.007I(28) - 0.002I(40)$$

Числовые коэффициенты в приведенном выражении были установлены при исследовании  $SiO_2$  и  $CaO$ .

2 – ионы, которые образуются при бомбардировке азотсодержащих соединений. Необходимо заметить, что масс-спектрометр не имеет достаточного разрешения для разделения ионов, образующихся при распылении углеводородных и азотсодержащих соединений, например  $CH_3^+, NH^+$  и др., но наличие ионов  $N^+, N_nH_m^+, NO^+$  в спектрах нельзя исключать, так как в атмосфере в следовых количествах содержатся газы  $NO, N_2O, NH_3$  [2].

3 – эмиссия ионов  $CO^+, COH^+, COH_2^+, NO^+$ , которая также обусловлена адсорбированными соединениями. Этот вывод следует из быстрого спада ионных токов при бомбардировке (за время записи одного спектра).

\*\* – молекулярные ионы, появление которых обусловлено эмиссией фрагментов кристаллической решетки.

Полученные результаты показывают, что в спектрах ВИЭ кроме ионов основных и примесных элементов  $\text{Si}^+$  ( $m/z = 28, 29, 30$ ),  $\text{Ca}^+$  (40, 42),  $\text{Al}^+$  (27),  $\text{Na}^+$  (23),  $\text{Mg}^+$  (24, 25),  $\text{K}^+$  (39, 41),  $\text{Fe}^+$  (56),  $\text{Ti}^+$  (48),  $\text{Cr}^+$  (52) и  $\text{Co}^+$  (59) наблюдаются молекулярные ионы, что обусловлено наличием на поверхности углеводов ( $\text{C}^+$  (12),  $\text{CH}^+$  (13),  $\text{CH}_2^+$  (14),  $\text{CH}_3^+$  (15),  $\text{C}_2\text{H}^+$  (25),  $\text{C}_2\text{H}_2^+$  (26),  $\text{C}_2\text{H}_3^+$  (27),  $\text{C}_2\text{H}_4^+$  (28),  $\text{C}_2\text{H}_5^+$  (29),  $\text{C}_2\text{H}_6^+$  (30)), азотсодержащих соединений ( $\text{N}^+$  (14),  $\text{NH}^+$  (15),  $\text{NH}_2^+$  (16),  $\text{NH}_3^+$  (17)), а также адсорбированной воды ( $\text{H}_2\text{O}^+$  (18),  $\text{OH}^+$  (17)) и оксида углерода ( $\text{CO}^+$  (28)). Интенсивность этих молекулярных ионов быстро падает в процессе бомбардировки. Интенсивность же молекулярных ионов, таких как  $\text{AlO}^+$  (43),  $\text{AlOH}^+$  +  $\text{SiO}^+$  (44),  $\text{SiOH}^+$  (45),  $\text{FeH}^+$  (57), появившихся в результате эмиссии фрагментов кристаллической решетки, по мере травления возрастает, причем сам факт эмиссии оксидных фрагментов позволяет полагать, что аэрозоли представляют собой оксидные соединения.

На рис. 2–4 приведены наиболее характерные зависимости ионных токов элементов от глубины травления. Глубина травления связана со временем бомбардировки формулой  $Z = vt$ , в которой скорость распыления оценивалась из соотношения  $v = 0.006jSA/\rho$ , где  $S$  – коэффициент распыления. При расчетах предполагалось, что частицы аэрозоля имеют сферическую форму. Естественно, что при этом пучок ионов аргона всегда падает на них по нормали к поверхности. При падении первичного пучка  $\text{Ar}^+$  с  $E = 4$  кэВ по нормали к поверхности  $S_0$  для большинства оксидов можно принимать равным 2 [9]. Анализ распыления сферической частицы показывает, что интегральный коэффициент распыления равен  $1.5S_0$  [8]. Поэтому коэффициент распыления считали равным 3.

$A/\rho$  – отношение средней молярной массы соединения ( $A$ ) к его плотности  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>. Действительно, для  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  это отношение близко к 7, поэтому для оценки скорости травления АА мы принимали  $A/\rho = 7$ ;  $j$  – плотность тока первичного ионного пучка, мкА/см<sup>2</sup>.

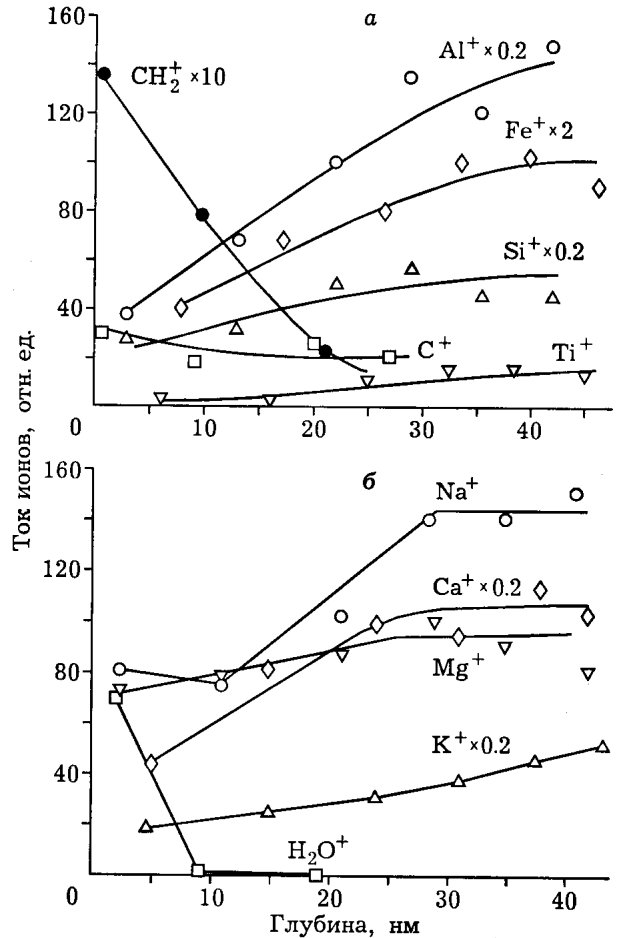


Рис. 2. Зависимость тока вторичных ионов от глубины травления АА, отобранных в Иркутске.

Скорость ионного травления, найденная указанным способом, составила 2.5 нм/мин.

На рис. 2 показаны профили интенсивности элементов для одного из образцов АА, отобранных в Иркутске. Подчеркнем, что такие зависимости наиболее типичны, т. е. подоб-

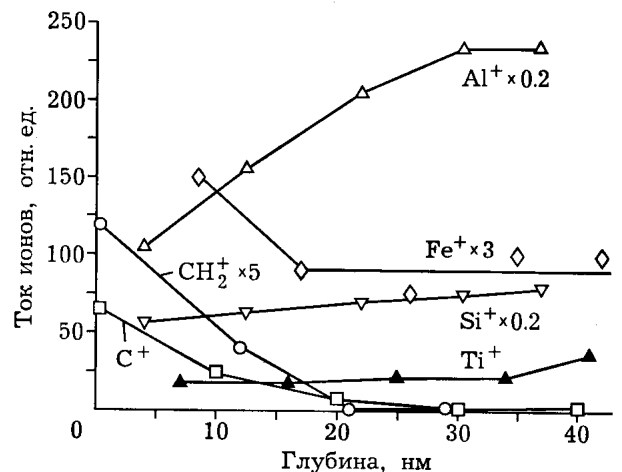


Рис. 3. Зависимость тока вторичных ионов от глубины травления АА, отобранных в Листвянке.

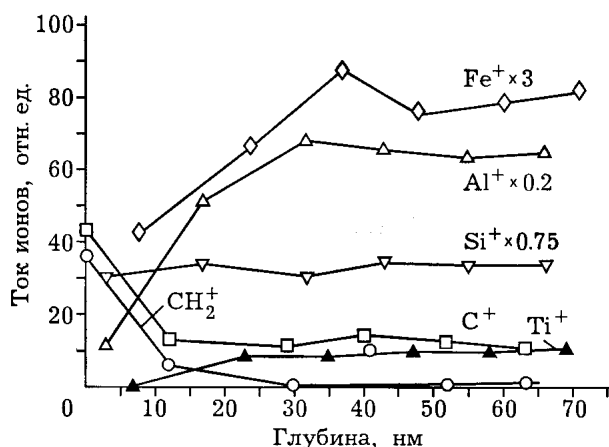


Рис. 4. Зависимость тока вторичных ионов от глубины травления АА, отобранных в Улан-Удэ.

ный профиль распределения по глубине характерен более чем для 50 % всех исследованных в данной работе образцов АА. Видно, что ток ионов  $\text{H}_2\text{O}^+$  резко уменьшается практически до нуля в первом же цикле бомбардировки. Ионные токи  $\text{C}^+$  и  $\text{CH}_2^+$  уменьшаются несколько медленнее, тогда как ионные токи остальных элементов при этом возрастают, и на глубине 30–40 нм токи всех элементов выходят на стационарный уровень. Отсюда следует, что поверхностный слой частиц АА покрыт адсорбированной водой и органическими частицами, которые экранируют эмиссию ионов основных элементов. Важным результатом является то, что ионные токи элементов одновременно выходят на стационарный уровень. Это позволяет считать, что элементы, концентрация которых измерялась, представляют собой одну фазу. Как будет показано ниже на основании количественных данных, аэрозольные частицы представляют собой алюмосиликаты с примесями щелочных и щелочноземельных металлов, железа и титана.

На рис. 3 показан другой тип изменения ионных токов в зависимости от глубины травления на примере данных для образца, собранного в пос. Листвянка. Видно, что ток иона  $\text{Fe}^+$  изменяется не симбатно с токами ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{Al}^+$ . Полагаем, что данный образец может содержать фазу  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , по-видимому, благодаря попаданию отдельной частицы железа. Однако, как уже отмечалось, таких примеров немного. Провести количественные измерения, например установить долю содер-

жания подобных образцов, весьма затруднительно, так как это требует большого времени для статистического анализа, включая анализ одних и тех же образцов АА с различных участков фильтра.

На рис. 4 показаны профили изменения ионных токов для элементов одного из образцов АА из Улан-Удэ. Одно из основных отличий в данном случае — это более резкое, чем на рис. 2, 3, падение тока  $\text{C}^+$ . В соответствии с этим наблюдается и более быстрый рост токов  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Ti}^+$  и др. Такой быстрый спад тока ионов  $\text{C}^+$  и  $\text{CH}_2^+$  объясняется распылением адсорбированных углеводов, а не крупных органических частиц, как это имело место для АА из Иркутска и Листвянки.

Из представленных на рис. 3, 4 кривых видно, что токи ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{Ti}^+$  от поверхности к объему изменяются иначе, чем ток ионов  $\text{Al}^+$ . Причиной может быть то, что помимо алюмосиликатов частицы АА содержат  $\text{SiO}_2$  с примесью  $\text{Ti}$ .

Рассмотрим результаты количественного элементного анализа, которые могут быть отнесены к мониторингу химического состава атмосферных аэрозолей. В табл. 2 приведены доли элементов в составе АА, соответствующие глубине 40 нм. Как видно из рис. 2–4, эти данные относятся к стационарным значениям ионных токов, и мы полагаем, что они с удовлетворительной точностью характеризуют объемный состав.

Целесообразно кратко описать методику проведения количественного анализа. Она основана на том, что ток вторичных ионов  $i$ -го элемента ( $I_i$ ) пропорционален его концентрации ( $C_i$ ) в соответствии с его коэффициентом относительной чувствительности ( $\gamma_i$ ):

$$I_i = k\gamma_i C_i \quad (1)$$

Коэффициенты относительной чувствительности определялись с использованием этой же формулы и результатов анализа эталонных материалов с известной концентрацией. Относительная концентрация элемента с  $i$ -й массой в процентах определялась из соотношения

$$C_i = \frac{C_i^* \cdot 100}{1 + \sum C_i^*} \quad (2)$$

ТАБЛИЦА 2

Элементный состав АА после стравливания ионной бомбардировкой ~40 нм, атомная доля, %

Место отбора	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Листвянка	10.0	1.7	12.2	54.2	1.2	13.1	1.8	5.2
	3.1	2.4	12.4	46.0	<b>1.8</b>	21.0	<b>7.2</b>	5.5
	<b>33.7</b>	1.8	<b>8.0</b>	28.9	<b>10.0</b>	14.5	1.0	2.2
	<b>1.9</b>	2.9	14.5	63.2	1.1	11.4	1.6	3.3
	7.9	2.9	13.1	39.1	2.8	26.4	2.8	4.2
	10.1	2.7	<b>40.3</b>	31.5	2.0	6.1	0	6.3
	5.7	2.1	19.3	54.8	1.8	13.4	<b>0.6</b>	2.0
Иркутск	14.9	2.5	12.5	28.9	6.5	24.7	2.7	7.1
	3.5	2.3	9.4	61.0	2.0	15.5	1.5	4.6
	6.6	3.8	9.6	54.5	1.3	23.2	1.1	1.9
	18.8	3.7	31.1	35.2	2.6	6.9	0.4	1.1
	11.1	1.9	10.8	59.4	2.2	11.0	0.8	2.7
	6.4	3.8	21.2	62.0	0.1	2.5	0.6	3.6
	10.1	2.8	14.6	49.3	4.1	14.1	0.5	4.4
Улан-Удэ	3.6	1.5	16.9	55.2	1.7	16.6	0.4	4.1
	3.8	2.8	16.1	53.3	3.5	11.8	3.0	5.6
	3.0	2.5	25.5	57.1	2.0	5.6	1.1	3.2

где  $C_i^* = \frac{I_i / I_{Si}}{\gamma_i}$ , а  $I_i$  и  $I_{Si}$  – ионные токи элемента с  $i$ -й массой и массой кремния ( $m/z = 28$ ) соответственно, поскольку при расчете относительных концентраций коэффициент относительной чувствительности для кремния принят за единицу.

Эталонные материалы в идеальном случае должны быть такой же природы, как и исследуемые объекты, так как коэффициенты относительной чувствительности зависят от химического состава образца. Поскольку состав АА обусловлен эрозией почвы, в качестве эталонов использовались государственные стандартные образцы почв: СГХМ-1, СГХМ-2, СГХМ-3, СГХМ-4, ССК-2, СКР-3, СТ-1А [10]. Значения коэффициентов относительной чувствительности для указанных стандартов почв приведены в табл. 3. Там же дана и краткая характеристика используемых почв. Так, стандарты СГХМ-1 и СГХМ-3 представляют собой карбонатно-силикатные рыхлые отложения, а СГХМ-2 и СГХМ-4 – алюмосиликатные рыхлые отложения. Естественно, что при анализе состава АА подобрать эталонный материал, идеально соответствующий исследуемым аэрозолям, невозможно. Поэтому для количественного анализа в ка-

честве первого приближения мы использовали значения коэффициентов относительной чувствительности, усредненные по всем эталонным образцам, приведенным в табл. 3. Такое приближение позволяет показать, что концентрация отдельных элементов в образцах АА, отобранных в разные дни, может изменяться в несколько раз, вплоть до 10 (см. табл. 2), а также сравнить элементный состав АА с кларковым содержанием элементов (табл. 4). Несмотря на то что используемый набор коэффициентов относительной чувствительности соответствует “обобщенной” почве, из табл. 4 видно, что состав АА удовлетворительно согласуется с кларковым содержанием элементов, за исключением концентраций кальция и титана.

Следующим, более точным приближением к определению химического состава АА можно считать использование для сравнения и расчета коэффициентов относительной чувствительности данных элементного анализа АА, полученных разными методами. Однако такое сравнение провести не представляется возможным. Основная трудность заключается в том, что другие физические методы не позволяют определять концентрацию тех элементов, которые определяет ВИМС [11].

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты относительной чувствительности элементов, определенные анализом эталонных образцов почв

Образец	Характеристика образца	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	Fe
СТ-1а	Эффузивный	6.9	4.3	4.1	28.7	4.7	1.5	1.9
ССК-2	Почвы, зараженные техногенными элементами	4.6	7.0	9.7	46.4	6.3	2.3	3.7
СКР-3	То же	6.1	5.5	11.3	20.3	7.8	1.4	2.0
СГХМ-1	Карбонатно-силикатные отложения	3.2	2.5	8.1	20.9	3.0	1.4	2.4
СГХМ-2	Алюмосиликатные отложения	3.6	5.8	8.7	42.6	10.0	1.5	2.6
СГХМ-3	То же, что СГХМ-1	4.1	1.8	8.1	25.7	2.9	2.5	1.4
СГХМ-4	То же, что СГХМ-2	3.9	8.5	10.8	38.4	12.8	1.7	2.6
<i>Среднее</i>		4.6	5.0	8.7	31.8	6.8	1.76	2.4
<i>Стандартное отклонение</i>		1.3	2.1	2.1	10.2	3.7	0.45	0.06

В табл. 4 приведены данные нейтронно-активационного анализа АА, отобранных зимой 1990–1993 гг. в Листвянке [12]. Сравнение показывает, что использование усредненных коэффициентов относительной чувствительности приводит к завышению концентрации Са, но к занижению концентрации На, определенных методом ВИМС.

Удовлетворительное согласие между указанными данными можно получить, если использовать набор коэффициентов относительной чувствительности, соответствующий, например, почвам типа СГХМ-2, т. е. алюмосиликатным отложениям. При этом коэффициенты чувствительности для Na и K должны соответствовать почвам, которые заражены техногенными элементами, что характерно для АА, отобранных в городах. Провести сравнение по концентрации Ti невозможно из-за отсутствия данных. Однако из данных ВИМС

следует, что в исследованных АА его концентрация действительно завышена по сравнению с кларковым содержанием, так как коэффициент относительной чувствительности для титана слабо зависит от химического состояния почвы (см. табл. 3).

В качестве фотокатализаторов кислотно-основного типа могут выступать алюмосиликаты. Кроме того, на поверхности присутствуют ионы переходных элементов (титана и железа), которые могут катализировать широкий ряд реакций. Это приводит к появлению нового канала реакции. В частности, в последнее время в катализе начал широко применяться метод окисления органических соединений оксидами азота и прежде всего  $N_2O$ , который присутствует в атмосфере прежде всего как результат техногенных процессов. Активными центрами в катализаторах окисления  $N_2O$  выступают ионы железа в

ТАБЛИЦА 4

Элементный состав АА, полученный усреднением данных, представленных в табл. 2

Место отбора	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Листвянка	10.3	2.6	17.1	45.4	3.0	15.1	2.1	4.1
Иркутск	9.4	2.8	15.7	50.7	2.6	14.0	1.0	3.7
Улан-Удэ	3.4	2.7	20.8	55.2	2.8	8.7	2.0	4.4
Листвянка [12]*	3.7	3.7	17.0	—	—	5.7	—	3.2
Кларк	6.4	6.0	17.0	56.6	3.7	5.1	0.5	4.6

\*Данные получены методом нейтронно-активационного анализа.

алюмосиликатной матрице. При сравнительно мягких условиях происходит разложение этого оксида азота с образованием высокоактивного атомарного кислорода. По-видимому, такая реакция может инициироваться также фотохимически, поскольку оксиды азота имеют сильные полосы поглощения в ультрафиолетовой области. Поскольку на поверхности исследованных аэрозолей присутствуют как ионы железа, так и органические соединения, можно предположить, что рассмотренная выше реакция получения высокоактивного кислорода может происходить также на атмосферных аэрозолях.

#### ВЫВОДЫ

1. Поверхностный слой (1–2 монослоя) всех частиц аэрозолей покрыт адсорбированными углеводородами, азотсодержащими и другими более сложными соединениями и водой. Небольшая часть поверхности покрыта органическими частицами, имеющими размер несколько десятков нанометров.

2. Элементный анализ исследованных аэрозолей показывает, что основным источником их образования является эрозия алюмосиликатных почв с примесями железа, титана, щелочных и щелочноземельных металлов.

3. В качестве фотокатализаторов могут выступать алюмосиликаты с поверхностными примесями ионов переходных металлов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Сибирского отделения РАН (интеграционный проект “Аэрозоли Сибири”) и Министерства образования (грант № Е00–5.0–182).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 К. I. Zamaraev, M. I. Khramov, V. N. Parmon, *Catal. Rev.-Sci. Eng.*, 36 (1994) 617.
- 2 К. I. Zamaraev, V. N. Parmon, *Kinet. Katal.*, 37 (1996) 732.
- 3 V. N. Parmon, *Colloids and Surfaces*, 151 (1999) 351.
- 4 В. Н. Пармон, В. С. Захаренко, *Химия в интересах устойчивого развития*, 9 (2001) 461.
- 5 В. А. Исидоров, *Органическая химия атмосферы, Химия, С.-Петербург*, 1992.
- 6 V. P. Ivanov, D. I. Kochubey, K. P. Kutzenogii, N. S. Bufetov, *J. Ecol. Chem.*, 4 (1993) 235; *React. Kinet. Catal. Lett.*, 64 (1998) 97.
- 7 D. T. Sues, K. A. Prather, *Chem. Rev.*, 99 (1999) 3007.
- 8 В. П. Иванов, *Фундаментальные аспекты применения ВИМС и ТПД для исследования состава и структуры поверхности и адсорбционных свойств катализаторов: Дис. ... д-ра хим. наук, Ин-т катализа СО РАН, Новосибирск*, 2001.
- 9 Г. Вернер, В кн.: *Электронная и ионная спектроскопия твердых тел*, Мир, Москва, 1981, с. 345.
- 10 Н. В. Арнаутов, *Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ*, Институт геологии и геофизики СО АН СССР, Новосибирск, 1990.
- 11 К. П. Куценогий, П. К. Куценогий, *Химия в интересах устойчивого развития*, 5 (1997) 457.
- 12 Т. В. Ходжер, В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин и др., Там же, 5 (1997) 547.