

УДК 577.3

## СВЯЗЬ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ В СТРАТОСФЕРЕ С ИОНИЗАЦИЕЙ ПО ДАННЫМ О ПРОВОДИМОСТИ И СОДЕРЖАНИИ НИТРАТОВ В ГРЕНЛАНДСКОМ ЛЬДУ

© 2011 г. М. Г. Огурцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение РАН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург

<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург

e-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29.04.2009 г.

После доработки 12.04.2010 г.

Исследованы данные по электропроводности и концентрации нитратов (ионов  $\text{NO}_3^-$ ) в выбуренном в центральной Гренландии ледовом керне, полученные с высоким временным разрешением. Проведенный анализ показал, что одной из главных причин одновременного возникновения мощных пиков в проводимости и концентрации нитратов, неоднократно происходившего начиная с 1789 г., служит резкий рост концентрации сульфатного аэрозоля в стратосфере, вызванный дополнительной ионизацией, возникающей вследствие вторжения энергичных частиц солнечных космических лучей. Таким образом, совпадения пиковых выбросов в обоих исследовавшихся палеосериях представляют собой проявления эффекта, экспериментально регистрировавшегося при помощи лидарных и спутниковой аппаратуры в последние 25 лет. Это доказывает реальность связи между концентрацией аэрозоля и скоростью ионизации в стратосфере и позволяет расширить интервал существования этой связи до более 200 лет. Обсуждены возможные физические механизмы наблюдаемого явления.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы накоплено немало свидетельств воздействия солнечной активности на погодные и климатические процессы [Пудовкин и Распопов, 1992; Веретененко и Пудовкин, 1993; Marsh and Svensmark, 2000; Распопов и др., 2001; Ogurtsov et al., 2001; Веретененко и др., 2007а; Огурцов, 2007]. Однако, в вопросе о солнечно-климатических связях по-прежнему остается много неясного. Одна из наиболее серьезных проблем связана с недостатком знаний о физическом механизме, передающем солнечное воздействие на атмосферу Земли. В последнее время, в качестве силового воздействующего фактора солнечно-климатической связи часто рассматриваются потоки энергичных (энергии свыше нескольких сотен ГэВ) солнечных частиц, существенно влияющих на ионизацию верхней тропосферы и стратосферы. Такой подход основывается на ряде экспериментальных наблюдений усиления аэрозольных слоев в атмосфере после солнечных протонных событий (СПС):

а) группа российских исследователей под руководством О.И. Шумилова впервые наблюдала это явление в феврале 1984 в Верхнетуломской обсерватории ( $68^\circ\text{N}$ ,  $32^\circ\text{E}$ ) при помощи лидара [Shumilov et al., 1996]. Анализ лидарного зондирования атмосферы на волне  $\lambda = 694.3$  нм показал, что спустя несколько дней после события Ground Level Enhancement (GLE) имевшего место 16.02.1984, концентра-

ция аэрозольных частиц размером  $>0.69$  мкм на высотах 15–25 км увеличилась на 50%. Рисунок 2 из работы [Shumilov et al., 1996] демонстрирует также и рост аэрозольной концентрации на высотах более 30 км.

б) Маричев и др. [2004] при помощи лидарного комплекса в Томске зарегистрировали образование новых аэрозольных слоев на высотах 40–45 км во время геомагнитных бурь в марте 1988 и марте 1989. Авторы работы связали наблюдавшийся эффект с вторжениями энергичных частиц солнечных космических лучей (СКЛ).

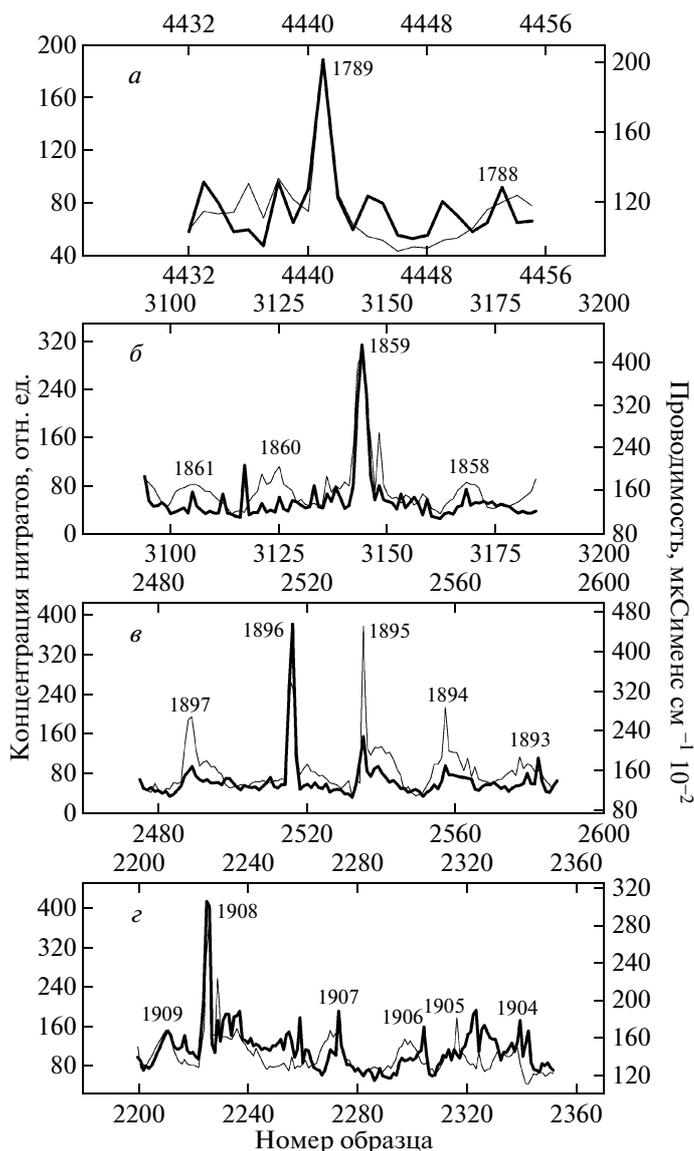
в) Образование дополнительных аэрозольных слоев на высоте 10–12 км наблюдалось в Гармиш-Партенкирхене ( $47^\circ\text{N}$ ,  $11^\circ\text{E}$ ) через два дня после вспышек 27.01.2002 г. и 24.08.2002 г. [Миронова и Пудовкин, 2005].

г) Авторы работы [Веретененко и др., 2007б] сообщили об увеличении концентрации аэрозольных частиц на высотах 10–14 км и 16–22 км во время мощных СПС 15–17.01.2005 г. зафиксированном спектрометром, установленным на борту космического аппарата Envisat.

е) Анализ содержания аэрозоля в атмосфере, измеренного спектрометром TOMS, установленным на борту спутника NASA, проведенный в работе [Mironova et al., 2008] показал значительный рост концентрации сульфатных и нитратных частиц в

области Антарктики на второй день после мощного СПС 20.01.2005 г. Авторы работы [Mironova et al., 2008] связали наблюдавшееся явление с ростом ионизации, вызванным вторжениями частиц космических лучей.

В качестве физического механизма, способного объяснить описанные выше экспериментальные результаты, авторы работы [Shumilov et al., 1996] рассматривали ион-индуцированную нуклеацию. Еще в работе [Русанов, 1978] было показано, что кластеры молекул  $H_2O$  быстрее растут на отрицательных ионах. В современной форме, механизм ион-индуцированной нуклеации (ИНН) был описан Арнольдом [Arnold, 1982]. Он действительно может обеспечить связь между активностью Солнца и концентрацией ядер конденсации (ЯК) в стратосфере. Основным процессом, входящим в ИНН, является рост ионных кластеров за счет присоединения молекул серной кислоты. Заряженные кластеры, конденсирующиеся на ионах, растут быстрее, чем нейтральные, и, соответственно, быстрее достигают критического радиуса — размера, при котором кластер становится термодинамически стабильным (не разрушается путем испарения частиц после нейтрализации). Как следствие, заряженные кластеры более эффективно превращаются в ЯК на которых возможен дальнейший рост сульфатного аэрозоля [Yu and Turko, 2001; Yu, 2002]. Скорость ионной нуклеации зависит от скорости ионообразования, а, также, от физических условий в атмосфере [Arnold, 1982; Hofman and Rosen, 1983]. Учитывая, что потоки энергичных протонов СПС вызывают значительный рост скорости ионизации в средней и верхней атмосфере авторы работ [Shumilov et al., 1996; Kasatkina and Shumilov, 2005] предположили, что возрастание аэрозольной концентрации после протонных вспышек связано с ИНН. Прямые экспериментальные наблюдения процесса ион-индуцированной нуклеации также уже получены к настоящему времени. В работе [Eichkorn et al., 2002] сообщалось об образовании аэрозоля под действием космических лучей зафиксированном при помощи масс-спектрометра, установленного на самолете. Измерения, проведенные во время 56 полетов самолетов NASA на высотах от 7 до 21 км, дали серьезные свидетельства в пользу реальности ИНН. Свенсмарк и его коллеги [Svensmark et al., 2007] исследовали процесс образования аэрозольных частиц в лаборатории при помощи камеры, моделирующей атмосферные условия (температуру, давление, влажность, концентрацию паров  $H_2SO_4$ ) и обнаружили, что скорость генерации новых частиц пропорциональна плотности отрицательных ионов. Следует отметить, однако, что история экспериментальных наблюдений связи аэрозольной концентрации с ионизацией достаточно коротка — не более 25 лет. Помимо этого, увеличения концентрации аэрозоля регистрировались не после всех вспышек — как показано в работе [Shumilov et al., 2003]



**Рис. 1.** Концентрация ионов  $NO_3^-$  (жирная линия) и электропроводность (тонкая кривая): а — в 1789; б — в 1859 (Кэррингтоновская оптическая вспышка); в — в конце 19-го века; з — в 1908 (тунгусское событие).

100 относительных единиц = 90.3 нг/г  $NO_3^-$ .

этот эффект не наблюдался после мощных СПС 2.05.98 и 15.04.2001 г. Поэтому вовлечение в исследование интересующих нас процессов и явлений дополнительных источников информации представляется полезным и важным. Палеоданные, охватывающие более длительные временные интервалы, могут предоставить необходимые сведения.

В первую очередь, следует обратить внимание на данные по содержанию нитратов (ионов  $NO_3^-$ ) в полярных льдах. Молекулы нитратных предвестников  $NO_y$  (N, NO,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $N_2O_5$ ,  $HNO_3$ ,  $HO_2NO_2$ ,

$\text{ClONO}_2$ ,  $\text{BrONO}_2$ ) образуются в атмосфере на разных высотах:

1) В тропосфере (вследствие индустриальной активности, сжигания биомассы, почвенных испарений, под действием молний и галактических космических лучей (ГКЛ)).

2) В стратосфере и на больших высотах (вследствие окисления биогенного  $\text{N}_2\text{O}$ , под действием ГКЛ и СКЛ, солнечного ультра-фиолетового излучения, выпадений релятивистских электронов).

Концентрация  $\text{NO}_y$  в стратосфере зависит от состояния ионизации. В работе [Vitt et al., 2000] показано, что во время СПС скорость образования нитратных предвестников сильно увеличивается. Авторы работ [Dreschhoff and Zeller, 1994, 1998] показали наличие отчетливой связи между СПС и мощными пиками концентрации  $[\text{NO}_3^-]$  в полярных льдах. Вероятность случайной корреляции мощных протонных событий с обогащенными нитратами слоями льда в гренландских и антарктических ядрах оказалась менее  $10^{-9}$  [Mc Cracken et al., 2001a]. Это означает, что нитратная “запись” в полярных льдах может служить палеоиндикатором солнечных протонных событий.

Электропроводность растопленного льда является показателем его кислотности, т.е., в первую очередь, содержания  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ . Поэтому проводимость способна нести информацию о содержании сульфатного аэрозоля в атмосфере в прошлом. Определенный вклад в кислотность концентрации  $[\text{HNO}_3]$ , также, в принципе, не исключен.

В данной работе исследованы данные по  $[\text{NO}_3^-]$  и проводимости ледового ядра, извлеченного в центральной Гренландии (GISP2 Н-ядро,  $72^\circ\text{N}$ ,  $38^\circ\text{W}$ , высота 3230 м) специалистами Университета штата Канзас. Оба гляциохимических ряда охватывают 1576–1991 г. и имеют сверхвысокое временное разрешение – примерно 20 образцов/год [Dreschhoff and Zeller, 1994]. Кривая электропроводности растопленного льда служила для целей датировки. Мощные вулканические извержения сопровождаются интенсивными выбросами сернистого газа  $\text{SO}_2$ , и, как следствие, значительным увеличением концентрации сульфатного аэрозоля в атмосфере, что, в свою очередь, вызывает резкий рост концентрации серной кислоты в осадках. Поэтому проводимость слоя льда, образовавшегося после того или иного извержения, оказывается сильно повышенной. Сопоставляя пики проводимости с датами известных из истории извержений, исследователи оказываются обеспеченными набором кислотных маркеров, облегчающих процесс датирования

## 2. ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ ПРОВОДИМОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ НИТРАТОВ В ПАЛЕОДАННЫХ ИЗ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ГРЕНЛАНДИИ

Некоторые пиковые выбросы концентрации  $[\text{NO}_3^-]$  совпадают по времени с всплесками проводимости. Впервые такое событие произошло в середине XVII века (образец № 6609 – см. рис. 1в из работы [Dreschhoff and Zeller, 1994]). Хотя подобных совпадающих пиков можно насчитать несколько десятков, в данной работе для анализа были отобраны четыре наиболее ярких события, произошедших в 1789, 1859, 1896 и 1908 годах. Во всех этих четырех случаях концентрация нитратов и проводимость обнаруживают совпадающие по времени выбросы, превышающие по амплитуде три стандартных отклонения. Эти четыре события показаны на рис. 1. Они также кратко описаны в таблице 1. Как видно из рис. 1 и табл. 1 концентрация нитратов и проводимость в ходе вышеописанных событий практически одновременно увеличивалась в 2–5 раз. Все эти события, за исключением 1789 г., нетрудно идентифицировать. Действительно:

(а) пик 1859 г. очевидно связан с мощнейшей сентябрьской вспышкой, зарегистрированной Каррингтоном.

(б) Пики конца XIX века, авторы работы [McCracken et al., 2001б] уверенно идентифицировали с мощными СПС.

(в) Пик 1908 г., вызван тунгусским событием, произошедшим в июле. Амплитуда соответствующих выбросов проводимости достигает 300 и более мкСимен · см<sup>-1</sup> т.е. вполне сопоставима с амплитудами пиков, вызванных крупными извержениями вулканов – Катмай (1912) – пик высотой около 200 мкСименс · см<sup>-1</sup>, Гекла (1970) и Шивелуч (1969) – более 400 мкСименс · см<sup>-1</sup>, (см. рис. 1в из [Dreschhoff et al., 1994]). Явление, проиллюстрированное рис. 1 и табл. 1 было обнаружено в работе [Dreschhoff and Zeller, 1994] и приписано прямому влиянию ионизации на образование перламентных или полярных стратосферных облаков (ПСО), состоящих, в значительной степени, из капелек азотной кислоты  $\text{HNO}_3$ . В работе [McCracken et al., 2001а] было предположено, что пики, проводимости, возникающие одновременно с нитратными, вызваны ростом электропроводности связанными с увеличением концентрации  $\text{HNO}_3$ . Оба этих предположения выглядят вполне правдоподобно, однако, вряд ли способны полностью объяснить наблюдаемое явление. Это нетрудно показать при помощи достаточно простых оценок. Действительно, рис. 3 из работы [Dreschhoff and Zeller, 1994] показывает, что фоновая концентрация нитратов увеличилась с  $\approx 60$  отн. ед. в период своего минимума (XVII–XVIII века) до примерно 130 отн. ед. во второй половине XX-го века. Этот рост является хорошо известным результатом

**Таблица 1.** Характеристики пиковых выбросов концентрации нитратов и проводимости в гренландском льду

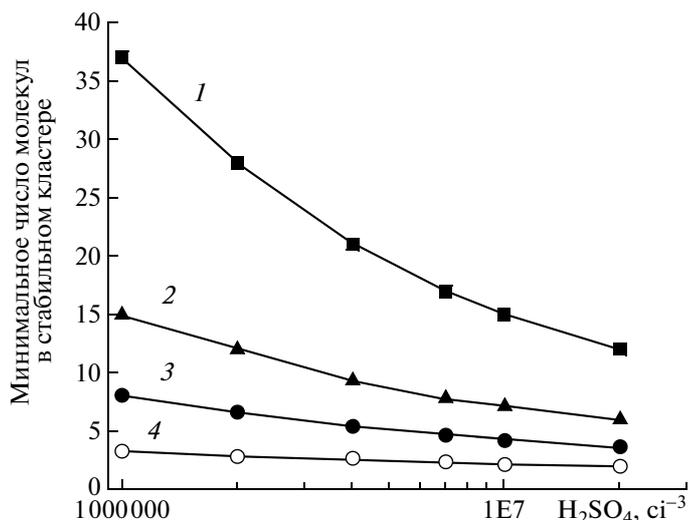
Годы	Концентрация $[\text{NO}_3^-]$ (отн. ед.)		Проводимость (мкСименс $\times$ см $^{-1}$ )	
	Фоновая (до и после события)	Максимальная	Фоновая (до и после события)	Максимальная
1789	80	180	114	200
1859	85	310	130	430
1896	70	280	130	450
1908	80	400	140	300

антропогенного поступления  $\text{NO}_y$  в атмосферу. Проводимость за тот же промежуток времени увеличилась с  $\approx 125$  до  $\approx 160$  мкСименс  $\cdot$  см $^{-1}$ . Подъем проводимости во второй половине XX-го века вызван антропогенным увеличением концентрации сульфатов и окислов азота в атмосфере. Но если даже мы полностью припишем этот рост электропроводности увеличению  $[\text{HNO}_3^-]$ , мы получим, что рост концентрации нитратов в 5 раз способен увеличить проводимость лишь менее чем в 2.5 раза. Уже эти оценки означают, что мощные пики проводимости в 1859 и 1896 годах не могут быть объяснены одним лишь увеличением кислотности, связанным с образованными вследствие роста ионизации нитратами. Та же трудность возникает и при рассмотрении пиков 1789 года. Вообще, кислотность льда в центральной Гренландии, по-видимому, слабо связана с  $[\text{HNO}_3^-]$ . В пользу этого говорит то, что отчетливый годовой (сезонный) цикл в концентрации нитратов почти не выражен в проводимости (см. рис. 1).

Необходимо также принимать во внимание тот факт, что образование перламутровых облаков происходит лишь при очень низких температурах – не более  $-78^\circ\text{C}$  для ПСО типа 1a (капельки и ледяные частицы тригидрата азотной кислоты  $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  диаметром 2–5 мкм) и не более  $-81^\circ\text{C}$  – для ПСО типа 1b (капельки тройного раствора  $\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$  субмикронного размера). Такие температуры достаточно редки в арктической стратосфере даже в зимний период. Согласно работе [Shumilov et al., 1996] в районе Кольского полуострова метеорологические условия во второй половине февраля 1984 г. вряд ли способствовали генерации ПСО. Хотя 16 февраля температура на высоте около 15 км опускалась до  $-84^\circ$ , 17–23 февраля она все время была выше  $-78^\circ$ . Еще меньше оснований предполагать столь низкие стратосферные температуры в сентябре 1859 г. и июле 1908 г. Помимо этого, площади на которых могут возникать температуры, необходимые для генерации ПСО, согласно [Pawson et al., 1995], охватывают не более 4% Северного по-

лушария – т.е. не более 10 млн. км $^2$  (30% от площади полушария к северу от  $60^\circ$ ).

Другим источником пиков проводимости может служить непосредственное влияние ионизации, вызванной СПС, на стратосферный сульфатный аэрозоль. Увеличение концентрации сернокислотного аэрозоля происходящее одновременно с увеличением концентрации  $\text{NO}_y$  способно давать пики кислотности, и, как следствие, проводимости, совпадающие по времени с нитратными. В рамках данного физического эффекта рост скорости генерации ионов в стратосфере, вызванный вторжением энергичных протонов от СПС, одновременно, но независимо друг от друга, вызывает: (а) увеличение концентрации нитратных предвестников  $\text{NO}_y$ , которые и дают пики  $[\text{NO}_3^-]$  во льду; (б) увеличение скорости бинарной нуклеации – образования субкритических ( $r < 1.5$  нм) кластеров из молекул воды и серной кислоты. Часть образовавшихся кластеров превращается в сверхкритические ( $r > 1.5-2.0$  нм) которые термодинамически устойчивы и представляют собой зародыши стратосферного аэрозоля. Эти нанокластеры растут за счет коагуляции и конденсации, превращаясь в ядра Айткена (частицы размером менее 100 нм), а, затем, и в субмикронный сульфатный аэрозоль, фиксируемый лидарами и дающий пики электропроводности льда. Таким образом, анализ гренландских гляциохимических палеоданных показывает, что одновременные пиковые выбросы проводимости и концентрации нитратов, отмечающиеся в ледовом керне, начиная с 1789 г., являются, по крайней мере, частично проявлением того же эффекта, о котором сообщалось в работах [Shumilov et al., 1996; Маричев и др., 2004; Веретененко и др., 2007; Mironova et al., 2008]. Это подтверждает реальность связи между концентрацией аэрозоля в атмосфере и СКЛ, наблюдавшейся в последние 25 лет при помощи лидаров и спутниковой аппаратуры. Теперь оценим насколько данный эффект может быть связан с ион-индуцированной нуклеацией.



**Рис. 2.** Число молекул серной кислоты в кластере, состоящем из молекул  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , размер которого равен критическому, в зависимости от физических условий в атмосфере. Данные взяты из работы [Yu, 2006]. Кривая 1 —  $T = 260^\circ\text{K}$ , относительная влажность 1%; кривая 2 —  $T = 240^\circ\text{K}$ , относительная влажность 1%; кривая 3 —  $T = 220^\circ\text{K}$ , относительная влажность 1%; кривая 4 —  $T = 220^\circ\text{K}$ , относительная влажность 20%.

### 3. ИОНИЗАЦИЯ, НУКЛЕАЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ СТРАТОСФЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Итак, рассмотрим насколько ИНН способна обеспечить цепочку физических процессов: СПС → → энергичные протоны → ионизация в стратосфере → концентрация ядер конденсации (ЯК) → концентрация субмикронного сульфатного аэрозоля. Экспериментальные свидетельства реальности процесса ИНН получены в ряде работ. В работе [Harrison and Alpin, 2001] одновременно измерялась концентрация отрицательных ионов и концентрация ЯК вблизи поверхности Земли. Оказалось, что обе величины коррелируют положительно, что можно объяснить только с помощью механизма ИНН — в других случаях увеличения концентрации частиц приводили бы к уменьшению концентрации ионов. В работе [Hofmann and Rosen, 1983] описаны *condensation nuclei events* — внезапные резкие возрастания концентрации ЯК (в основном частиц с размерами 0.01–0.1 мкм), по крайней мере, часть из которых, можно связать с всплесками СКЛ. Теоретически механизм ИНН был исследован в наиболее общей форме Арнольдом [Arnold, 1982], который изучал зависимость скорости генерации суперкритических кластеров, состоящих из молекул  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (других молекулярных кластеров, согласно [Arnold, 1982], в стратосфере не может существовать) от ско-

рости образования ионов. Для изучения процесса ИНН в стратосфере удобно воспользоваться формулой скорости генерации частиц диаметром более 3 нм, выведенной в работе [Kazil and Lovejoy, 2004]:

$$J = \frac{Q}{\left(1 + \frac{\sqrt{\alpha Q}}{K'[\text{H}_2\text{SO}_4]}\right)} \left(1 + \frac{\sqrt{\alpha Q}}{2K'[\text{H}_2\text{SO}_4]}\right) \times \frac{1}{\left(1 + \frac{\sqrt{\alpha Q}}{K[\text{H}_2\text{SO}_4]}\right)^{N_c}}, \quad (1)$$

где:  $Q$  скорость ионизации ( $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ),  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$  — концентрация паров серной кислоты ( $\text{см}^{-3}$ ),  $\alpha$  ( $\approx 10^{-7} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) коэффициент ионной рекомбинации,  $N_c$  — минимальное число молекул  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в кластере критического размера (стабильном).  $K$  ( $\approx 10^{-9} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и  $K'$  ( $\approx 10^{-9} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) коэффициент ассоциации молекул  $\text{H}_2\text{SO}_4$  заряженными и нейтральными кластерами субкритического размера ( $r < 0.003$  мкм). Для заряженного и нейтрального сверхкритического нанокластера значения  $K'$  в работе [Kazil and Lovejoy, 2004] считались одинаковыми (влияние заряда на скорость конденсации не учитывалось). Очевидно, что скорость ионной нуклеации существенно зависит от значения  $N_c$  — чем больше количество молекул необходимых для образования стабильного комплекса тем меньше скорость ИН. Величина  $N_c$ , в свою очередь, сильно зависит от стратосферных условий — температуры, относительной влажности  $RH$ ,  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$ . Значение  $N_c$  рассчитанное для разных атмосферных параметров в работе [Yu, 2006] приведено на рис. 2. Фоновая концентрация паров серной кислоты, согласно [Arnold and Buhrke, 1983], на высоте 25 км составляет около  $10^5$  молекул в  $\text{см}^3$ , а на высоте 30–35 км достигает  $2 \times 10^6 \text{см}^{-3}$ . Однако, после вулканических извержений  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$  на высоте 30 км может превышать  $10^7$  молекул  $\text{см}^{-3}$  [Hofmann and Rosen, 1984]. Современные оценки концентрации  $[\text{H}_2\text{O}]$  в стратосфере, в основном, дают значения близкие к 4–6 млн<sup>-1</sup> (относительная влажность примерно 1%). Впрочем, разброс этих оценок достаточно велик — например, согласно [Хргиан, 1969], в 1959 г. в США на высоте 26 км наблюдалась концентрация водяного пара (удельная влажность)  $3.5 \times 10^{-4}$ , что соответствует относительной влажности примерно 30%. В 1994 г. над Валентией (Ирландия) концентрация  $[\text{H}_2\text{O}]$  достигла 100 млн<sup>-1</sup> на высотах около 16 км. Теперь оценим возможное влияние резких усиления скорости образования ионов, связанных с СПС, на скорость образования кластеров сверхкритического размера. Фоновая скорость ионизации в нижней стратосфере высокоширотной части Северного полушария примерно 15 пар ионов  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако после мощных

**Таблица 2.** Скорость ион-индуцированной нуклеации в нижней стратосфере (25 км) при различных физических условиях

$[\text{H}_2\text{SO}_4]$ ( $\text{см}^{-3}$ )	$N_c$	$J$ при фоновой ионизации ( $\text{см}^{-3} \times \text{с}^{-1}$ )	$J$ во время события GLE 24.05.90 ( $\text{см}^{-3} \times \text{с}^{-1}$ )	$J$ во время события GLE 19.10.89 ( $\text{см}^{-3} \times \text{с}^{-1}$ )
$10^5$	3	$1.0 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
$10^7$	3	16.1	28.0	60.2
$10^5$	6	$5 \times 10^{-8}$	$9 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-12}$
$10^7$	6	8.0	10.2	1.4

СПС она может сильно возрастать – согласно расчетам, произведенным в работе [Kasatkina and Shumilov, 2005] на высоте 25 км вторжения вспышечных частиц могут увеличивать скорость ионизации до 80 пар ионов  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  (GLE 24.05.1990) и 3000 пар ионов  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  (GLE 19.10.1989). Соответствующие значения,  $J$  рассчитанные по формуле (1) при различных стратосферных условиях приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, скорость ИИН действительно может существенно зависеть от скорости ионизации, но лишь при определенных условиях:

(а) при высокой концентрации паров  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – около  $10^7 \text{ см}^{-3}$  или более. Такие высокие значения  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$  могут возникать в стратосфере после мощных ( $\text{VEI} > 4$ ) вулканических извержений.

(б) при малых величинах  $N_c$ , которые при типичной для стратосферы низкой влажности достигаются только при низких (не выше  $-50^\circ\text{C}$ ) температурах. Столь низкие температуры в полярной и приполярной стратосфере могут наблюдаться в зимнее и осеннее время, реже весной.

Во второй половине февраля 1984 г. когда группа Шумилова [Shumilov et al., 1996] зафиксировала усиление аэрозольного слоя в районе Верхнетуломска эти условия, скорее всего, выполнялись. Концентрация паров серной кислоты в стратосфере была повышенной в результате очень мощного извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике (14.04.1982,  $\text{VEI} = 6$ ). Температура в нижней стратосфере (16 км) над Кольским полуостровом также была низкой  $-70^\circ \dots -75^\circ\text{C}$  [Shumilov et al., 1996]. Также разумно предположить высокую концентрацию  $[\text{H}_2\text{SO}_4]$  в сентябре 1859 г., поскольку за несколько лет до того имели место извержения вулканов Чикурачки (1853,  $\text{VEI} = 5$ ) и Шивелуч (1854,  $\text{VEI} = 6$ ). Однако, в 2002–2005 гг. и в конце 19-го века высокие концентрации серной кислоты в стратосфере менее вероятны.

Другая проблема связана с тем, что временная задержка между СПС и ростом аэрозольной концентрации, зарегистрированной экспериментально, обычно не превышает нескольких дней [Shumilov et al., 1996; Миронова и Пудовкин, 2005; Веретененко и др., 2007б]. В то время как для того, чтобы только что образовавшиеся ядра Айткена выросли до наблюдаемых с помощью лидаров субмикрон-

ных ( $r > 0.7 \text{ мкм}$ ) за счет процессов конденсации и коагуляции требуется порядка нескольких месяцев. Поэтому в работе [Yu, 2004] был предложен другой механизм объяснения наблюдаемого явления. Автор работы предположил, что ионизация, вызванная вторжением частиц СКЛ, может приводить к быстрому замерзанию переохлажденных капелек раствора  $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{O--H}_2\text{SO}_4$  в полярной стратосфере. Механизм *cosmic ray induced freezing* (CRIF), предложенный в работе [Yu, 2004] обеспечивает быстрое (порядка нескольких дней) образование ПСО, имеющих в своем составе частицы с размерами до 10 мкм. Более того, генерация перламутровых облаков при помощи CRIF-механизма может происходить при более высоких, чем обычно, температурах – почти до  $-70^\circ\text{C}$ , согласно рис. 3 из работы [Yu, 2004]. Однако механизм CRIF образует в атмосфере аэрозоль, в основном нитратного состава, в то время как анализ палеоданных указывает на связь с ионизацией именно сульфатного аэрозоля.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе совместного анализа данных по концентрации нитратов и проводимости в гренландском льду установлено, что усиления аэрозольных слоев в стратосфере после мощных солнечных протонных событий, экспериментально зарегистрировавшиеся в последние 25 лет, неоднократно имели место и в доинструментальную эпоху, начиная, по крайней мере, с 1789 года. Это позволяет расширить временной интервал существования данного эффекта, играющего важную роль в передаче влияния СА на атмосферу Земли, до более 200 лет и доказывает его реальность. Показано, что заметный вклад в наблюдаемый эффект дает рост концентрации сульфатного аэрозоля. Наиболее перспективным физическим механизмом, способным объяснить связь СПС с концентрацией сульфатного аэрозоля на сегодняшний день представляется ион-индуцированная нуклеация. Вклад в усиление стратосферных аэрозольных слоев после солнечных вспышек может давать и образование полярных стратосферных облаков, состоящих, в основном, из капелек азотной кислоты.

Как ион-индуцированная нуклеация, так и образование ПСО сильнейшим образом зависят от со-

стояния стратосферы — концентрации паров серной кислоты, температуры, влажности, концентрации окислов азота — связанного с естественными природными факторами (активность вулканов, погодные условия). Можно отметить, что за последние несколько десятилетий влажность стратосферы увеличилась на  $1\text{--}2 \text{ млн}^{-1}$  [Oltmans and Hofmann, 2002]. Антропогенное увеличение содержания сульфатного аэрозоля в стратосфере в конце XX-го века было отмечено в работах [Hofmann, 1990]. Это означает, что антропогенная активность также может влиять на эффективность солнечно-климатической связи.

Таким образом, воздействие ионизирующих СКЛ и ГКЛ на атмосферный аэрозоль, должно происходить весьма сложным и нелинейным способом. Оно может быть опосредованно множеством естественно-природных и антропогенных факторов, причем как характер этих связей так физика образования аэрозолей и облаков в атмосфере на сегодняшний день недостаточно изучены. Поэтому не является удивительным то, что после одних мощных протонных событий аэрозольные слои в стратосфере усиливаются, а после других — нет.

Несмотря на сохраняющиеся трудности, совместный анализ палеоастрофизических и палеоклиматических данных, проведенный в настоящей работе подтвердил перспективность исследований в этом направлении.

Работа была выполнена в рамках программы обмена между Российской и Финской Академиями наук (проект № 16) и программы Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце—Земля”. Она также была поддержана грантами РФФИ №№ 07-02-00379, 09-02-00083, 10-02-00391.

Автор благодарен Г.А.М. Дрешхофф и ее коллегам из Университета штата Канзас сделавшим данные по концентрации нитратов доступными через Интернет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 35–40. 1993.
- Веретененко С.В., Дергачёв В.А., Дмитриев П.Б. Солнечная активность и вариации космических лучей как фактор интенсивности циклонических процессов в умеренных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 3. С. 399–406. 2007а.
- Веретененко С.В., Софиева В.Ф., Ивлев Л.С. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля в ходе солнечных протонных событий января 2005 года по данным GOMOS. Труды XI Пулковской конференции по физике Солнца. Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. С.-Петербург. С. 85–88. 2007б.
- Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 6. С. 841–848. 2004.
- Миронова И.А., Пудовкин М.И. Увеличение содержания аэрозоля в нижней атмосфере после протонных вспышек на Солнце в январе и августе 2002 г. по данным лидарных наблюдений в Европе // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 2. С. 234–240. 2005.
- Огурцов М.Г. Вековая вариация в аэрозольной прозрачности атмосферы как возможное звено связывающее долговременные изменения солнечной активности и климата // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 126–137. 2007.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 1–10. 1992.
- Распопов О.М., Ловелуис Н.В., Шумилов О.И., Касаткина Е.А. Нелинейный характер воздействия солнечной активности на атмосферу и окружающую среду // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 41. № 3. С. 58–63. 2001.
- Русанов А.И. К термодинамике нуклеации на заряженных центрах // ДАН СССР. Т. 238. № 4. С. 831–834. 1978.
- Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: 647 С. 1969.
- Arnold F. Ion nucleation — a potential source for stratospheric aerosols // Nature. V. 299. P. 134–137. 1982.
- Arnold F., Buhrke Th. New H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub> vapor measurements in the stratosphere — evidence for a volcanic influence // Nature. V. 301. P. 293–295. 1983.
- Dreschoff G.A.M., Zeller E.J. 415-year Greenland ice core record of solar proton events dated by volcanic eruptive episodes. Ed by Wakefield D. TER-QUA Symposium Series 2, Nebraska Academy Sciences. P. 1–24. 1994.
- Dreschoff G.A.M., Zeller E.J. Ultra-high resolution nitrate in polar ice as indicator of past solar activity // Solar Physics. V. 177. P. 365–374. 1998.
- Eichkorn S., Wilhelm S., Aufmhoff H., Wohlfrom K.H., Arnold F. Cosmic ray-induced aerosol-formation: First observational evidence from aircraft-based ion mass spectrometer measurements in the upper troposphere // Geophys. Res. Lett. V. 29. 1698. DOI: 10.1029/2002GL015044. 2002.
- Harrison R.G., Aplin K.L. Atmospheric condensation nuclei formation and high-energy radiation // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. P. 1811–1819. 2001.
- Hofmann D.J., Rosen J.M. Condensation nuclei events at 30 km and possible influences of solar cosmic rays // Nature. V. 302. P. 511–514. 1983.
- Hofmann D.J., Rosen J.M. On the temporal variation of stratospheric aerosol size and mass during the first 18 months following the 1982 eruptions of El Chichon // J. Geophys. Res. V. 89. № D3. P. 4883–4890. 1984.
- Hofmann D.J. Increase in the stratospheric background sulfuric acid aerosol mass in the past 10 years // Science. V. 248. P. 996–1000. 1990.
- Kasatkina E.A., Shumilov O.I. Cosmic ray-induced stratospheric aerosols: A possible connection to polar

- ozone depletions // *Ann. Geophysicae*. V. 23. P. 675–679. 2005.
- *Kazil J., Lovejoy E.R.* Tropospheric ionization and aerosol production: a model study // *J. Geophys. Res.* V. 109: D19206. doi:10.1029/2004JD004852. 2004.
- *Marsh N., Svensmark H.* Cosmic rays, clouds and climate // *Space Sci. Rev.* V. 94 № 1/2. V. 215–230. 2000.
- *McCracken K.G., Dreschhoff G.A.M., Zeller E.J., Smart D.F., Shea M.A.* Solar cosmic ray events for the period 1561–1994. 1. Identification in polar ice, 1561–1950 // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A10. P. 21585–21598. 2001a.
- *McCracken K.G., Dreschhoff G.A.M., Smart D.F., Shea M.A.* Solar cosmic ray events for the period 1561–1994: 2. The Gleissberg periodicity. *J. Geophys. Res.* V. 106. № A10. P. 21599–21610. 2001b.
- *Mironova I.A., Desorgher L., Usoskin I.G., Fluckiger E.O., Butikofer R.* Variations of aerosol optical properties during the extreme solar event in January 2005 // *Geophys. Res. Lett.* V. 35: L18610. doi:10.1029/2008GL035120. 2008.
- *Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Lindholm M., Eronen M., Nagovitsyn Yu.A.* Solar activity and regional climate // *Radiocarbon*. V. 43. № 2a. P. 439–447. 2001.
- *Oltmans S.J., Hofmann D.J.* Increase in lower-stratospheric water vapor at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994 // *Nature*. V. 374. P. 146–149. 2002.
- *Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vashenyuk E.V.* Enhancement of stratospheric aerosol after solar proton event // *Ann. Geophysicae*. V. 4. P. 1119–1123. 1996.
- *Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Turyansky V.A., Kyro E., Kivi R.* Solar cosmic ray effects in atmospheric chemistry evidenced from ground-based measurements // *Adv. Space Res.* V. 31. P. 2157–2162. 2003.
- *Svensmark H., Pedersen J.O., Marsh N.M., Enghoff M.B., Uggerhoj U.* Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // *Proceedings of the Royal Society A*. V. 463. P. 385–396. 2007.
- *Vitt F.M., Armstrong T.P., Cravens T.E.* Computed contributions to odd nitrogen concentrations in the Earth's polar middle atmosphere by energetic charged particles // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 62. P. 669–683. 2000.
- *Yu F., Turco R.P.* From molecular clusters to nanoparticles: The role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation // *J. Geophys. Res.* V. 106. P. 4797–4814. 2001.
- *Yu F.* Formation of large NAT particles and denitrification in polar stratosphere: possible role of cosmic rays and effect of solar activity // *Atmos. Chem. Phys.* V. 4. P. 2273–2283. 2004.
- *Yu F.* Binary H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O homogeneous nucleation based on kinetic quasi-unary nucleation model: Look-up tables // *J. Geophys. Res.* V. 111: D04201, doi:10.1029/2005JD006358. 2006.