

УДК 551.510.534+551.21

Гипотеза о вулканогенной саже и возможности ее наблюдательного подтверждения

С.А. Береснев, М.С. Васильева*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Институт естественных наук и математики
620063, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51*

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

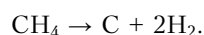
Обсуждается предложенная ранее (Зуев и др., 2014) гипотеза о возможности образования нанодисперсных частиц черного углерода в эруптивной колонне вулканического извержения с индексом вулканической взрывности $VEI \geq 4$. Анализируются вероятные характеристики частиц вулканогенной сажи и их отличия от стратосферных частиц черного углерода другого происхождения. Выполнен краткий обзор пригодных инструментальных методик обнаружения частиц. Приведены наблюдательные факты о возможном обнаружении частиц вулканогенной сажи ранее. Предложена идея проведения комплексного эксперимента для наблюдательного подтверждения гипотезы.

Ключевые слова: стратосфера, черный углерод, плининское извержение, вулканогенная сажа; stratosphere, black carbon, Plinian eruption, volcanogenic soot.

Введение

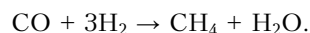
На сегодняшний день основными источниками частиц сажи (черного углерода) в стратосфере считаются продукты неполного сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы (включая лесные пожары), выбросы от двигателей авиатранспорта (авиационная сажа) и частицы метеоритного происхождения [1].

Недавно в [2–5] была предложена гипотеза о возможном ранее не рассматривавшемся источнике поступления в стратосферу нанодисперсного черного углерода при мощных вулканических извержениях суб-плинианского и плининского типов [6]. Краткая сущность этой гипотезы состоит в следующем (детали приведены в [2–5]). Известно, что в вулканических газах обычно присутствует метан в концентрациях, сильно зависящих от типа магмы. Движущиеся с большими скоростями в вулканическом канале газы взаимодействуют с раскаленными пирокластическими частицами при высоких температурах (1000–1200 °С) в практически бескислородной среде, при этом возможно термическое разложение метана на горячих поверхностях таких частиц:



Метан также может дополнительно синтезироваться в эруптивной колонне за счет каталитического процесса Фишера–Тропша при меньших температурах

(250–350 °С) и в дальнейшем участвовать в термическом разложении:



Сформировавшись в верхней части вулканической колонны, частицы черного углерода (вулканогенной сажи) быстро охлаждаются и разбавляются окружающим воздухом на выходе из нее, что препятствует их дальнейшей коагуляции. На данном этапе часть образовавшейся сажи может окислиться при высокой температуре до окиси углерода.

Условия, реализующиеся при извержении вулкана, — высокая температура, недостаток кислорода, быстрое охлаждение на финальной стадии — аналогичны тем, что требуются для известных технологических процессов получения высокодисперсного углерода [7, 8]. Также в последнее время получили широкое распространение генераторы сажевых аэрозолей CAST и miniCAST (Combustion Aerosol Standard), основанные на контролируемых процессах сжигания легких углеводородов и позволяющие получать практически монодисперсный черный углерод с размерами частиц вплоть до 0,03 нм (например, [9]). Таким образом, эруптивная колонна мощного вулканического извержения представляет собой природный аналог технологического реактора для производства высокодисперсного черного углерода [2], причем этот аэрозольный реактор может оказаться плохо оптимизированным. Тем не менее оценки полной массы частиц вулканогенной сажи, которые могли бы потенциально заполнить стратосферу после извержения влк. Пинатубо в 1991 г.,

* Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@urfu.ru); Мария Сергеевна Васильева (mary_ru@mail.ru).

составляют несколько десятков кило тонн [4]. Мощность этого нового источника, по-видимому, сопоставима с мощностями источников от горения биомассы или авиатранспорта [1]. Таким образом, в [2–5] предложена обоснованная физико-химическая модель образования частиц вулканогенной сажи, что позволяет обсуждать и анализировать вытекающие из нее следствия.

Авторы гипотезы полагают, что индикаторами присутствия вулканогенной сажи могут быть температурные и озоновые аномалии, возникающие после мощных вулканических извержений и обусловленные длительным пребыванием в стратосфере частиц нанодисперсного черного углерода, активно поглощающих солнечную радиацию и разрушающих молекулы озона на своих поверхностях [2–5]. Эти индикаторы логично трактовать как крупномасштабные и опосредованные следствия пребывания указанных частиц в стратосфере, однако прямых свидетельств их обнаружения и идентификации на сегодняшний день в научной литературе не представлено.

Цель настоящей работы — обсуждение следствий указанной гипотезы, анализ характеристик и специфических особенностей частиц вулканогенной сажи, обзор возможных методов их регистрации и обсуждение сценариев их наблюдательного обнаружения.

Возможные характеристики и специфические особенности ожидаемых частиц

Что могут представлять собой частицы вулканогенной сажи и чем они могут принципиально отличаться от других углеродосодержащих частиц в стратосфере?

Для заброса таких частиц непосредственно в стратосферу необходим определенный тип вулканического извержения, а именно — извержение субплинианского или плинианского типа с индексом вулканической взрывности $VEI \geq 4$ [6]. Только в этом случае высота эруптивной колонны превысит границу тропопаузы, а внутри вулканического канала будут достигнуты необходимые для синтеза частиц сажи температуры и скорости потока. Если извержения с $VEI = 6$ очень редки (примерно раз в столетие, классический пример — влк. Пинатубо, июнь 1991 г., высота колонны ~ 40 км), извержения с $VEI = 5$ относительно редки (с 1953 по 2013 г. произошло не более четырех подобных событий [3]), то извержения с $VEI = 4$ достаточно распространены (не менее 16 событий за указанный период с высотами колонн 16–25 км). Таким образом, условия для образования частиц вулканогенной сажи возникают регулярно и отнюдь не являются уникальными.

Морфология ожидаемых частиц на выходе из вулканического канала — первичные сферические частицы или их небольшие агрегаты, а предполагаемые размеры — десятки и сотни нанометров. Оценки основаны на анализе технологических аналогий [7–9], а также внешних условий на выходе

из вулканического канала: быстрое разбавление холодным стратосферным воздухом и, как следствие, подавлением коагуляции частиц. По мере попадания частиц в вулканическое облако следует ожидать их включений в состав пепловых частиц или внутренних и внешних включений в образующиеся капельки серной кислоты.

Химический состав частиц на выходе из вулканической колонны предполагает очень высокое содержание элементного углерода при наличии следов химических элементов, характерных для состава пирокластических частиц, на которых произошел синтез частиц вулканогенной сажи. Следует ожидать высокой гидрофильности образующихся частиц в результате их взаимодействия с газообразным SO_2 при высоких температурах внутри вулканической колонны (как и для частиц авиационной сажи).

Время пребывания указанных частиц в стратосфере за счет малых размеров может составлять несколько лет, причем их гравитационной седиментации могут эффективно препятствовать фотофорез (отрицательный коротковолновый и положительный длинноволновый, например, [10]) и положительные области вертикального ветра (например, [11]). Эти эффекты недиффузионной природы не обнуляются на длительных промежутках времени (месяцы и годы) даже при зональном усреднении, что неверно трактуется в [5]. Более того, особенности поля вертикального ветра на разных широтах в стратосфере могут приводить к образованию динамических ловушек для высокодисперсных аэрозолей, концентрируя их в слоистых островках и этим существенно увеличивая время пребывания частиц в стратосфере [12]. Возможно, подтверждения этого уже были обнаружены при полетах стратосферных баллонов STAC [13] и в последующих полетах баллонов LOAC [17].

Инструментальные возможности регистрации частиц должны сохраняться значительное время после мощного вулканического извержения. При успешном отборе частиц в дальнейшем лабораторном анализе должна возникнуть ожидаемая проблема идентификации частиц и выяснения их отличий от аэрозолей черного углерода другого происхождения. По-видимому, следует говорить о ряде специфических физико-химических и метеорологических признаков (маркеров), которые позволили бы выделять с необходимой достоверностью вулканогенные частицы. Авторы предлагают возможный набор таких маркеров, обсуждение которых уже начато выше.

1. Морфология и диапазон размеров частиц. Для вулканогенной сажи вероятны первичные сферические частицы или их небольшие агрегаты размерами от десятков до сотен нанометров при отборе вблизи от выхода из вулканической колонны; включения указанных частиц в пепловые агрегаты; внутренние и внешние включения в капли серной кислоты.

2. Химический состав. Очень высокое содержание элементного углерода; примеси химических элементов, характерных для пирокластов; возможна высокая гидрофильность, как у частиц авиационной сажи.

3. Изотопный состав (необходима достаточная масса вещества в пробоотборах). Малое содержание изотопа C^{13} , в отличие от частиц дымов лесных пожаров и сжигания биомассы.

4. Период и районы отборов проб. Предшествующие вулканические извержения с $VEI \geq 4$ за 1–2 года до измерений; измерения вблизи траекторий движения вулканических воздушных масс; удаленность от известных направлений авиационного трафика.

Возможные инструментальные методики обнаружения частиц

В первую очередь это полеты высотных самолетов, планеров и стратосферных баллонов с непосредственным отбором частиц и их последующим анализом на борту или в лабораторных условиях. При этом возможна бесконтактная регистрация частиц оптическими методами, также позволяющая получить полезную информацию о спектре их размеров и предполагаемом составе. Полеты высотных самолетов в стратосфере в рамках различных научных программ практикуются достаточно давно, для этого используются известные модели самолетов U-2 (ER-2), WB-57F, M-55 «Геофизика» с потолком полетов 23–24 км. Большой интерес представляют возможности разрабатываемых научных высотных планеров Proteus и Perlan 2, потолок последнего оценивается в 27 км. Используемые высотные самолеты были специально модифицированы и переоборудованы для научных программ NASA, NOAA и европейских организаций. Стратосферные баллоны могут достигать высот до 40 км, их условно можно подразделить на «тяжелые», совершающие преимущественно вертикальные полеты (пример – баллоны с оптическими счетчиками STAC [13–14]), и «легкие» баллоны со счетчиками LOAC, траектории которых определяются полем ветра [15–17]. Запуски баллонов второго типа гораздо дешевле, чем первого, и возможны практически с любой подходящей площадки; на сегодняшний день проведено ~150 стратосферных полетов такого рода.

При полетах высотных самолетов в стратосфере была отработана методика отбора частиц с помощью импакторов различных типов [18–20]. При анализе морфологии и структуры частиц в лабораторных условиях широко применяется электронная микроскопия (SEM, TEM и HRTEM методики); элементный анализ частиц базируется на масс-спектрометрических методиках (возможен анализ непосредственно на борту самолета [21]) и вариантах методики энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии EDX, EDRS, EDS (например, [19, 20]). Для определения размеров частиц традиционно используются оптические счетчики [1, 13–16] с нижним пределом 150–200 нм; также апробированы методики дифференциальных анализаторов подвижности и аэродинамических анализаторов размеров частиц [22]. Интересным следствием развития бесконтактных оптических методов является методика одночастичного сажевого фотометра SP-2 [23, 24],

основанная на лазерно-индуцированной инкаандесценции (ЛИ), для измерения объемной доли и размеров частиц сажи в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В «легких» стратосферных баллонах с измерениями по методике LOAC [15–17] используется двухугловой оптический счетчик, позволяющий определять размер регистрируемых частиц (нижний предел 200 нм) и их счетную концентрацию, а также оценивать типологию частиц различного происхождения. Химический (элементный) состав частиц при этом напрямую не определяется, но они подразделяются на основные типы по значению так называемого индекса видообразования (speciation index) [17], основанного на высокой чувствительности сигнала светорассеяния от комплексного показателя преломления вещества частицы при углах рассеяния 50–70° (чем выше индекс видообразования, тем сильнее частицы поглощают излучение). Калибровка счетчика LOAC с использованием хорошо аттестованных частиц различного состава и получаемая при этом обширная база данных позволяют отождествить регистрируемые частицы с реальным типом атмосферных аэрозолей, в том числе надежно идентифицировать частицы с высоким содержанием элементного углерода (сажевые частицы).

Проведенный краткий обзор позволяет заключить, что на сегодняшний день существуют и успешно апробированы как методы пробоотбора стратосферных частиц различного происхождения и состава при помощи высотных самолетов и баллонов, так и инструментальные методы определения их морфологии, размеров и элементного состава.

Важную информацию при поиске частиц вулканогенной сажи можно получить с использованием моделирования траекторий движения воздушных масс в стратосфере после вулканических извержений. Пользу такого подхода можно проиллюстрировать на двух примерах. На рис. 1 приведены расчеты прямых траекторий движения воздушных масс на высотах 10–24 км по методике HYSPLIT [25] после извержения влк. Кальбуко с $VEI = 4$ в Южной Америке 22 апреля 2015 г. Видно, что за две недели после извержения воздушные массы на больших высотах, содержащие мелкодисперсную фракцию вулканических частиц, в процессе дальнего переноса достигли Австралии и Новой Зеландии. В рассматриваемый период было выполнено три полета баллонов LOAC, базирующихся на о-ве Реюньон в Индийском океане (отмечен звездочкой), в мае, августе и ноябре 2015 г. [26]. В частности, 19 мая 2015 г. (месяц после извержения) был зафиксирован резкий пик концентрации частиц на высоте ~17 км (больше высоты извержения), которые по методологии LOAC следует отнести к сажевым частицам. Релаксация концентрации частиц в стратосфере до фоновых значений наблюдалась лишь спустя год после извержения вулкана. Распространение частиц вулканического облака соответствовало зональному переносу для Южного полушария, а его пространственное положение контролировалось субтропическим барьером (с севера) и полярным вихрем (с юга).

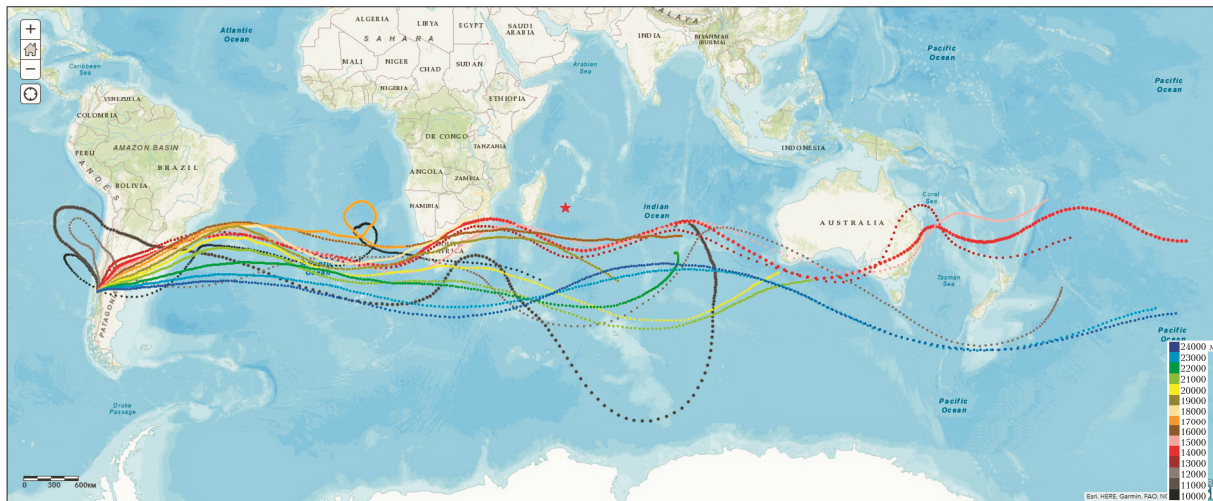


Рис. 1. Прямые траектории движения воздушных масс в прогнозе на 13 дней на высотах 10–24 км с шагом в 1 км по методике HYSPLIT после извержения влк. Кальбуко 22 апреля 2015 г.; звездочкой отмечена база запуска баллонов LOAC на о-ве Реюньон, см. цветные рисунки на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.06

Изучение извержения влк. Кальбуко можно считать удачным примером комплексного эксперимента, в котором одновременно были задействованы различные инструментальные методики (наземный лидар на о-ве Реюньон, полеты баллонов LOAC, спутниковые измерения) и моделирование дальнего переноса вулканического облака и его релаксации [26]. Однако можно привести пример и другого рода.

На рис. 2 представлены расчеты прямых траекторий движения воздушных масс на высотах 10–24 км по методике HYSPLIT [25] после извержения влк. Сарычев (Курильские о-ва) 13 июня 2009 г. (VEI = 4) за 13 дней. Вулкан извергался с 12 по 15 июня, максимальное количество выбросов при-

шло на 13 июня, высота эруптивной колонны достигала 7 км. Видно, что траектории движения воздушных масс на высотах менее 23 км направлены на восток, в сторону Тихого океана, и за две недели они достигли территории Северной Америки. Естественно предположить, что при дальнем переносе произошло осаждение большей части аэрозолей на поверхность океана.

Совершенно другую картину демонстрируют траектории на высотах более 23 км: они проходят над материковой частью Азии; след от вулканического облака, в частности, был зарегистрирован над Памиром. Вполне вероятно, что именно эти высотные воздушные массы могли содержать частицы

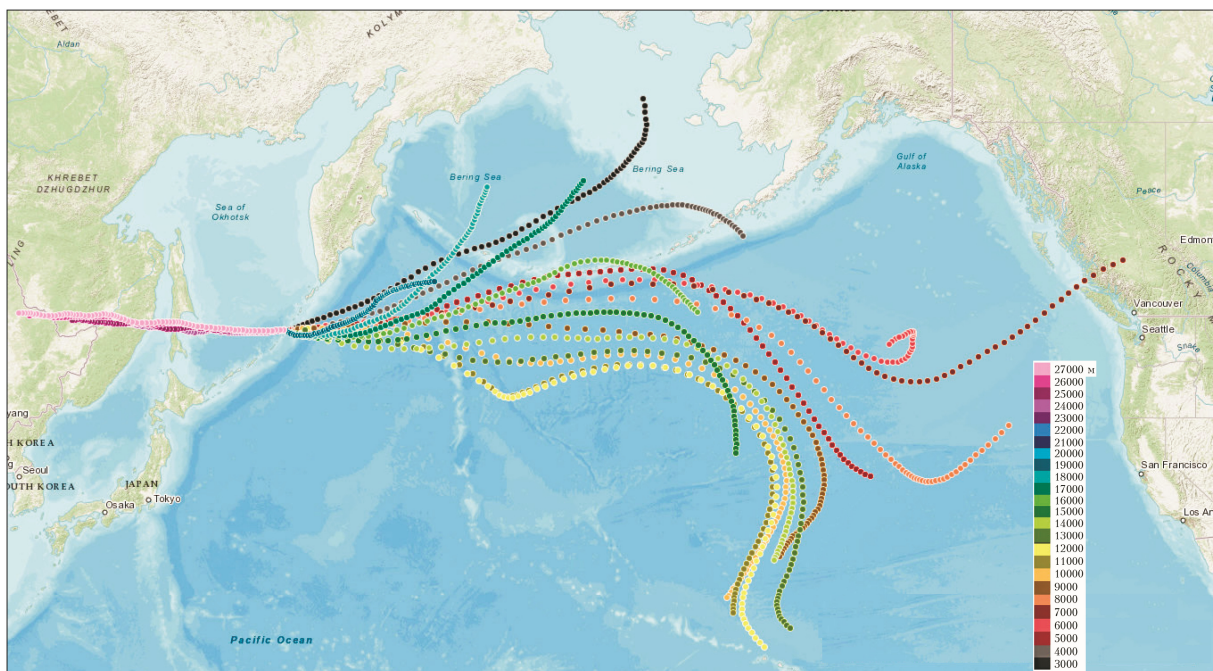


Рис. 2. Прямые траектории движения воздушных масс по методике HYSPLIT после извержения влк. Сарычев (Курильские о-ва) 13 июня 2009 г., см. цветные рисунки на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.06

вулканогенной сажи и именно в этом направлении следовало бы предпринимать попытки их регистрации в течение нескольких недель после извержения.

В августе 2009 г., спустя 1,5–2 мес. после извержения, было выполнено три полета «тяжелых» стратосферных баллонов STAC в окрестности г. Кируна на севере Швеции [27], которые зарегистрировали на высотах 17,4–18,7 км тонкие протяженные аэрозольные слои, определенно содержащие частицы сажи. С целью выяснения происхождения этих слоев по методике HYSPLIT [25] были рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс, пришедших в район г. Кируна 2 августа 2009 г., на высотах 11–27 км за 12 дней. На рис. 3 видно, что воздушные массы из района вулканического извержения, двигаясь с запада на восток через Северную Америку и Атлантический океан, могут достичь района г. Кируна на высотах до 20 км, однако сложно оценить состав аэрозолей в них из-за процессов осаждения при дальнем переносе. Гораздо более вероятно, что в полетах были зарегистрированы частицы сажи от интенсивных лесных пожаров в Восточной Сибири летом 2009 г. (траектории движения воздушных масс на высотах 20–27 км).

полагаемых характеристиках частиц вулканогенной сажи, а также есть необходимые инструментальные методы, позволяющие зарегистрировать их присутствие на стратосферных высотах. Поэтому представляет интерес анализ полученных ранее наблюдательных фактов, которые могли бы свидетельствовать об обнаружении подобных частиц, даже без привлечения гипотезы о механизме их образования.

В [28] приведены данные об обнаружении углеродосодержащих частиц диаметром 100 нм и меньше при полетах самолета U-2 на высотах до 21 км в 1979–1983 гг. над территорией Северной Америки. Для этого периода характерны извержения влк. Сент-Хеленс с VEI = 5 в штате Вашингтон в 1980 г. и влк. Эль-Чичон на юге Мексики с VEI = 4 в 1982 г. Послеполетный лабораторный анализ (EDX и Оже-спектроскопия) показал очень высокое содержание элементного углерода в частицах. По этой причине авторы [28] отвергают их земное происхождение и склоняются к метеоритному образованию. Отмечено, что такой выбор мотивируется отсутствием понимания авторами возможного механизма образования углеродных частиц при вулканических извержениях.



Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс, пришедших в район г. Кируна (Швеция) 2 августа 2009 г., на высотах 11–27 км с шагом в 1 км за 12 дней; звездочками отмечены г. Кируна и влк. Сарычев, последний день извержения которого – 15 июня 2009 г., см. цветные рисунки на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.06

Этот пример показывает, что для убедительной регистрации частиц вулканогенной сажи важен не только небольшой временной интервал после извержения, но и близость района отбора проб или их бесконтактной регистрации к месту извержения.

Возможные факты обнаружения частиц вулканогенной сажи

Итак, на сегодняшний день сформулирована гипотеза о возможном способе образования и пред-

В [19] сообщается об отборах и последующем анализе частиц при полетах ER-2 в мае 1993 г. (через два года после извержения влк. Пинатубо с VEI = 5) над Калифорнией на высотах до 19 км. В анализе применялась сканирующая электронная микроскопия, совмещенная с возможностью EDX. Помимо традиционных сульфатных частиц, были обнаружены частицы с очень высоким содержанием углерода, которые представляли собой субмикронные агрегаты из первичных частиц диаметром 20–30 нм, а также внешние или внутренние включения в капельки серной кислоты. Также были

обнаружены частицы с большим содержанием органического углерода, морфология которых сильно отличалась от морфологии обсуждаемых ранее частиц (возможно, это были частицы от наземного горения биомассы или лесных пожаров).

Схожие результаты представлены в [29], где по аналогичной методике проанализированы результаты полетов ER-2 в апреле и мае 1993 г. (спустя 21 месяц после извержения влк. Пинатубо) примерно над тем же районом, что и в [19], на высотах 18,8–21,3 км. На высотах ~20 км был обнаружен слой с повышенной концентрацией аэрозолей диаметром менее 100 нм, причем среди них присутствовали частицы с очень высоким содержанием углерода и следами Na, Al и Si (авторы [29] полагают, что основа таких частиц – графит).

В [30] представлены результаты отбора и анализа стратосферных частиц при полетах самолета ER-2 в январе–марте 2000 г. внутри и вне полярного вихря на высотах 17,3–19,9 км вблизи г. Кируна (Швеция). Эти данные отличаются обширностью выборки и хорошей статистической достоверностью при анализе частиц. Здесь также были обнаружены субмикронные частицы с высоким содержанием элементного углерода, причем авторы пытаются обосновать источник их происхождения. Проанализированы частицы от авиационной сажи, метеоритные частицы (частицы внеземного происхождения), выбросы от ракетных двигателей, эмиссия частиц от вулканов, частицы от горения биомассы, деревьев и сжигания каменного угля, от дизелей автомобильного и морского транспорта. Авторы [30], основываясь на специфических отличиях в морфологии, структуре и элементном составе частиц, склоняются к выводу о метеоритном происхождении частиц как наиболее вероятном. Интересными являются выводы авторов [30] о вулканических эмиссиях частиц: такая возможность не исключается (вновь без привлечения гипотезы о вулканогенной саже), но наличие углеродных частиц объясняется их захватом в вулканическое облако из окружающего воздуха. Кроме того, вулканизм представляется маловероятным источником обнаруженных частиц, так как после извержения должно регистрироваться большое количество силикатных пепловых частиц, которые не были обнаружены.

Объяснение последнего факта может быть следующим: 15 августа 1999 г. произошло очередное извержение влк. Шивелуч (Камчатка) с $VEI = 4$ и достаточной высотой газо-пепловой колонны, вулканическое облако от которого достигло области полярного вихря, где и проводились полеты (на рис. 4 видно его наличие). К январю–марту 2000 г. крупные частицы вулканического пепла осели, а частицы вулканогенной сажи могли сохраниться на стратосферных высотах. Таким образом, отсутствие силикатных пепловых частиц в пробах не является неожиданным, а наличие частиц черного углерода объясняется их вулканическим происхождением.

В [31] приведены результаты анализа частиц в стратосферных полетах ER-2 в мае–сентябре 1997 г. на высотах 18–20,5 км над умеренными

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 10:00 UTC 1 Aug 99
CDC1 Meteorological Data

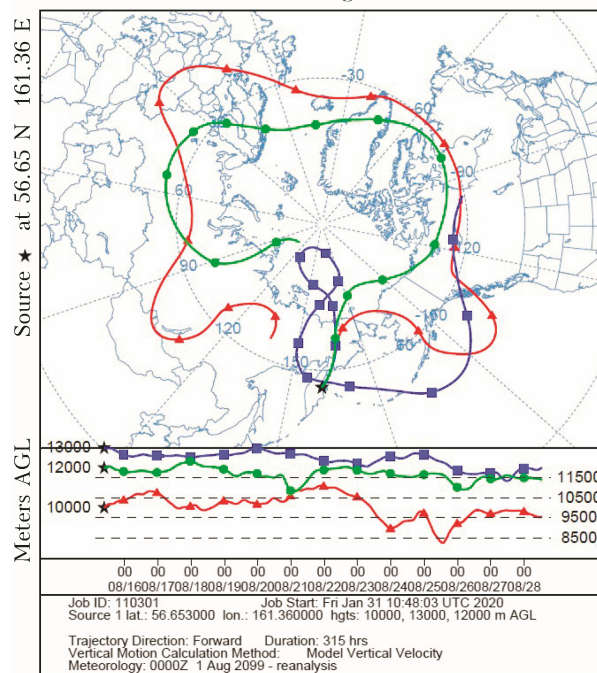


Рис. 4. Прямые траектории движения воздушных масс по методике HYSPLIT после извержения влк. Шивелуч (Камчатка) 15 августа 1999 г.

и высокими широтами Северной Америки. Несмотря на относительно большой промежуток времени после извержения влк. Пинатубо и отсутствие в 1995–1997 гг. извержений вулканов с $VEI \geq 4$, в пробах были обнаружены частицы черного углерода, 95% которых имели фракталоподобную структуру со средним радиусом гирации в 150 нм и радиусами первичных частиц в 25–40 нм. Источником таких частиц авторы [31] считают процессы высокотемпературного горения органического топлива, с большой вероятностью это частицы авиационной сажи (над этими районами проходят маршруты интенсивных полетов авиатранспорта). Действительно, проблема различия частиц авиационной и вулканогенной сажи может оказаться принципиальной даже при выполнении очевидного условия – удаленности района поиска от основных направлений авиационного трафика. Отметим, что в известных исследованиях авиационной сажи районы отбора проб специально выбирались непосредственно по коридорам и высотам полетов авиатранспорта [18, 32–34].

Заключение

Гипотеза о вулканогенной саже, базирующаяся на физико-математической модели процесса [2–5], позволяет целенаправленно планировать поиски этих частиц. Идентификация частиц должна учитывать их специфические особенности, при этом возникают до конца не проясненные проблемы различия частиц вулканогенной, авиационной сажи и частиц черного углерода от метеоритов.

В настоящее время уже существуют необходимые инструментальные возможности для обнаружения частиц вулканогенной сажи в стратосфере. Весьма вероятно, что такие частицы уже регистрировались при анализе проб, но эти факты никак не соотносились с гипотезой о вулканогенной саже.

Становится очевидной необходимость проведения комплексного эксперимента с привлечением в первую очередь высотных самолетов и стратосферных баллонов при сопутствующем моделировании процессов распространения вулканического облака после извержения вулканов с $VEI \geq 4$. Достаточно успешный пример такого подхода — исследование извержения влк. Кальбуко весной 2015 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания ИЕНИМ УрФУ по теме FEUZ-2020-0057 и в рамках постановления № 211 Правительства РФ, контракт № 02.A03.21.0006.

1. Kremser S., Thomason L.W., von Hobe M., Hermann M., Deshler T., Timmreck C., Toohay M., Stenke A., Schwarz J.P., Weigel R., Fueglistaler S., Prata F.J., Vernier J.-P., Schlager H., Barnes J.E., Antuca-Marrero J.-C., Fairlie D., Palm M., Mahieu E., Notholt J., Rex M., Bingen C., Vanhellemont F., Bourassa A., John M.C., Plane J.M.C., Klocke D., Carn C.A., Clarisse L., Trickl T., Neely R., James A.D., Rieger L., Wilson J.C., Meland B. Stratospheric aerosol — observations, processes, and impact on climate // *Rev. Geophys.* 2016. V. 54. P. 278–335. DOI: 10.1002/2015RG000511.
2. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С. Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // *Химия в интер. уст. разв.* 2014. Т. 22. С. 83–88.
3. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Шелехова А.П., Шелехова Е.А. О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла в арктических регионах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 1. С. 69–74; Zuev V.V., Zueva N.E., Saveljeva E.S., Shelekhov A.P., Shelekhova E.A. The role of volcanic heating of the tropical stratosphere in formation of heat centers in the Arctic regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 262–267.
4. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулканогенной сажи в стратосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 8. С. 698–704; Zuev V.V., Zueva N.E., Saveljeva E.S. Temperature and ozone anomalies as indicators of volcanic soot in the stratosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 100–106.
5. Zuev V.V., Zueva N.E., Saveljeva E.S., Gerasimov V.V. Plinian eruptions as a potential source of black carbon in the stratosphere // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. DOI: 10.1117/12.2535585.
6. Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. *The Encyclopedia of Volcanoes.* London: Academic Press, 2015. P. 519–534.
7. Зуев В.П., Михайлов В.В. Производство сажи. М.: Химия, 1965. 328 с.
8. Суrowикин В.Ф. Современные тенденции развития методов и технологии получения нанодисперсных углеродных материалов // *Рос. хим. журн.* 2007. Т. LI, № 4. С. 92–97.
9. Ess M.N., Vasilatou K. Characterization of a new miniCAST with diffusion flame and premixed flame operations: Generation of particles with high EC content in the size range 30 nm to 200 nm // *Aerosol Sci. Technol.* 2019. V. 53, N 1. P. 29–44. DOI: 10.1080/02786826.2018.1536818.
10. Береснев С.А., Васильева М.С., Грязин В.И., Кочнева Л.Б. Фотофорез фрактало-подобных агрегатов сажи: микрофизическая модель, сравнение с экспериментом и возможные атмосферные проявления // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 457–462. DOI: 10.15372/AOO20170602; Beresnev S.A., Vasil'eva M.S., Gryazin V.I., Kochneva L.B. Photophoresis of fractal-like soot aggregates: Microphysical model, comparison with experiment, and possible atmospheric manifestations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 527–532.
11. Береснев С.А., Грязин В.И., Грибанов К.Г. Анализ характеристик вертикального ветра в стратосфере // *Метеорол. и гидрол.* 2009. Т. 34, № 11. С. 37–47.
12. Gryazin V.I., Beresnev S.A. Influence of vertical wind on stratospheric aerosol transport // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2011. V. 110, N 3–4. P. 151–162. DOI: 10.1007/s00703-010-0114-8.
13. Renard J.-B., Brogniez C., Berthet G., Bourgeois Q., Gaubicher B., Chartier M., Balois J.-Y., Verwaerde C., Auriol F., Francois P., Daugeron D., Engrand C. Vertical distribution of the different types of aerosols in the stratosphere: Detection of solid particles and analysis of their spatial variability // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D21303. DOI: 10.1029/2008JD010150.
14. Renard J.-B., Berthet G., Salazar V., Catoire V., Tagger M., Gaubicher B., Robert C. *In situ* detection of aerosol layers in the middle stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. DOI: 10.1029/2010GL044307.
15. Renard J.-B., Dulac F., Berthet G., Lurton T., Vignelles D., Jégou F., Tonnelier T., Jeannot M., Couté B., Akik R., Verdier N., Mallet M., Gensdarmes F., Charpentier P., Mesmin S., Duverger V., Dupont J.-C., Elias T., Crenn V., Sciare J., Zieger P., Salter M., Roberts T., Giacomoni J., Gobbi M., Hamonou E., Olafsson H., Dagsson-Waldhauserova P., Camy-Peyret C., Mazel C., Décamps T., Piringer M., Surcin J., Daugeron D. LOAC: A small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles — Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 1721–1742. DOI: 10.5194/amt-9-1721-2016.
16. Renard J.-B., Dulac F., Berthet G., Lurton T., Vignelles D., Jégou F., Tonnelier T., Jeannot M., Couté B., Akik R., Verdier N., Mallet M., Gensdarmes F., Charpentier P., Mesmin S., Duverger V., Dupont J.-C., Elias T., Crenn V., Sciare J., Zieger P., Salter M., Roberts T., Giacomoni J., Gobbi M., Hamonou E., Olafsson H., Dagsson-Waldhauserova P., Camy-Peyret C., Mazel C., Décamps T., Piringer M., Surcin J., Daugeron D. LOAC: A small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles — Part 2: First results from balloon and unmanned aerial vehicle flights // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 3673–3686. DOI: 10.5194/amt-9-3673-2016.
17. Renard J.-B., Berthet G., Lévasseur-Regourd A.-C., Beresnev S., Miffre A., Rairoux P., Vignelles D., Jegon F. The complex origin and spatial distribution of non-pure sulfate particles (NSPs) in the stratosphere // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2019. DOI: 10.5194/acp-2019-904.
18. Pusechel R.F., Blake D.F., Snetsinger K.G., Hansen A.D.A., Verma S., Kato K. Black carbon (soot) aerosol in the lower stratosphere and upper troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 16. P. 1659–1662.

19. *Sheridan P.J., Brock C.A., Wilson J.C.* Aerosol particles in the upper troposphere and lower stratosphere: Elemental composition and morphology of individual particles in northern midlatitudes // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21, N 23. P. 2587–2590.
20. *Ebert M., Weigel R., Kandler K., Günther G., Molleker S., Grooß J.-U., Vogel B., Weinbruch S., Borrmann S.* Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 8405–8421. DOI: 10.5194/acp-16-8405-2016.
21. *Murphy D.M., Froyd K.D., Schwarz J.P., Wilson J.C.* Observations of the chemical composition of stratospheric aerosol particles // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2014. V. 140. P. 1269–1278. DOI: 10.1002/qj.2213.
22. *Bahreini R., Jimenez J.L., Wang J., Flagan R.C., Seinfeld J.H., Jayne J.T., Worsnop D.R.* Aircraft-based aerosol size and composition measurements during ACE-Asia using an Aerodyne aerosol mass spectrometer // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D23. P. 8635. DOI: 10.1029/2002JD003226.
23. *Gao R.S., Schwarz J.P., Kelly K.K., Fahey D.W., Watts L.A., Thompson T.L., Spackman J.R., Slowik J.G., Cross E.S., Han J.-H., Davidovits P., Onasch T.B., Worsnop D.R.* A novel method for estimating light-scattering properties of soot aerosols using a modified single-particle soot photometer // *Aerosol Sci. Technol.* 2007. V. 41. P. 125–135. DOI: 10.1080/02786820601118398.
24. *Baumgardner D., Kok G., Raga G.* Warming of the Arctic lower stratosphere by light absorbing particles // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L06117. DOI: 10.1029/2003GL018883.
25. *Draxler R.R., Hess G.D.* An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition // *Australian Meteor. Mag.* 1998. V. 47, N 4. P. 295–308.
26. *Bugue N., Vignelles D., Berthet G., Portafaix T., Payen G., Jégou F., Benchérif H., Jumelet J., Vernier J.-P., Lurton T., Renard J.-B., Clarisse L., Duverger V., Posny F., Metzger J.-M., Godin-Beekmann S.* Long-range transport of stratospheric aerosols in the Southern Hemisphere following the 2015 Calbuco eruption // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 15019–15036. DOI: 10.5194/acp-17-15019-2017.
27. *Jégou F., Berthet G., Brogniez C., Renard J.-B., Francois P., Haywood J.M., Jones A., Bourgeois Q., Lurton T., Auriol F., Godin-Beekmann S., Guimbaud C., Krysztofiak G., Gaubicher B., Chartier M., Clarisse L., Clerbaux C., Balois J.Y., Verwaerde C., Daugeron D.* Stratospheric aerosols from the Sarychev volcano eruption in the 2009 Arctic summer // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 6533–6552. DOI: 10.5194/acp-13-6533-2013.
28. *Chuan R.L., Woods D.C.* The appearance of carbon aerosol particles in the lower stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 11, N 5. P. 553–556.
29. *Scott J.D., Chittenden D.M.* Chemical composition of particles of $d < 0.20 \mu\text{m}$ in the lower stratospheric aerosol, spring 1993 // *J. Arkansas Academy of Sci.* 2002. V. 56, N 1. Art. 23.
30. *Schütze K., Wilson J.C., Weinbruch S., Benker N., Ebert M., Günther G., Weigel R., Borrmann S.* Submicrometer refractory carbonaceous particles in the polar stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 12475–12493. DOI: 10.5194/acp-17-12475-2017.
31. *Strawa A.W., Drdla K., Ferry G.V., Verma S., Pueschel R.F., Yasuda M., Salawitch R.J., Gao R.S., Howard S.D., Bui P.T., Loewenstein M., Elkins J.W., Perkins K.K., Cohen R.* Carbonaceous aerosol (soot) measured in the lower stratosphere during POLARIS and its role in stratospheric photochemistry // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N D21. P. 26,753–26,766.
32. *Blake D.F., Kato K.* Latitudinal distribution of black carbon soot in the upper troposphere and lower stratosphere // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, N D4. P. 7195–7202.
33. *Pueschel R.F., Boering K.A., Verma S., Howard S.D., Ferry G.V., Goodman J., Allen D.A., Hamill P.* Soot aerosol in the lower stratosphere: Pole-to-pole variability and contributions by aircraft // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N D11. P. 13,113–13,118.
34. *Petzold A., Döpelheuer A., Brock C.A., Schroeder F.* *In situ* observations and model calculations of black carbon emission by aircraft at cruise altitude // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N D18. P. 22,171–22,181.

S.A. Beresnev, M.S. Vasiljeva. The hypothesis of volcanogenic soot and opportunities of its observational confirmation.

The earlier proposed hypothesis (Zuev et al., 2014) about the possibility of nanodispersed black carbon particles formation in eruptive column of volcanic eruption with VEI ≥ 4 is discussed. The probable characteristics of volcanogenic soot particles and their distinctive features from stratospheric black carbon particles of other origin are analyzed. A brief review of suitable instrumental methods for detecting particles is carried out, and observational facts that indicate the possible detection of particles of volcanic soot earlier are presented. The idea of a complex experiment for observational confirmation of the hypothesis is proposed.