

*Г.В. Заболотников, О.Г. Богаткин*

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЛЕТОВ В ЗОНАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ  
ВЛИЯНИЮ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

*G.V. Zabolotnikov, O.G. Bogatkin*

**PROSPECTS OF MODERN TECHNOLOGY APPLICATIONS  
FOR FLIGHT SERVICING IN REGIONS OF VOLCANIC ACTIVITY**

*На основе анализа современных технологий наблюдений за состоянием атмосферы предложен способ мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облаков вулканического пепла на основе использования специализированного беспилотного летательного аппарата.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, облака вулканического пепла. мониторинг, обеспечение полетов, безопасность полетов.*

*We propose the method for airspace monitoring in the regions of volcanic ash clouds with the aid of specialized Unmanned Aerial Vehicle on basis of analysis of modern technologies for atmospheric observations.*

*Key words: Unmanned Aerial Vehicle, volcanic ash cloud, monitoring, flight servicing, flight safety.*

Целью настоящей статьи является освещение в самом общем виде нового подхода к обеспечению безопасности полетов авиации в зонах распространения облаков вулканического пепла.

Проблеме безопасности полетов при извержениях вулканов с выбросом вулканического пепла уделяется большое внимание во всем мире. В последние десятилетия, когда в мире резко возросла интенсивность воздушных перевозок, все более частыми становятся инциденты с самолетами, попавшими в облака вулканического пепла. Облака пепла и взвешенных частиц, образующиеся в результате извержения, представляют серьезную опасность для самолетов [3, 4, 8, 9].

Помимо потенциальной угрозы стать причиной крупного авиационного происшествия, вулканический пепел приводит к огромным экономическим издержкам в международной гражданской авиации, связанным с многочисленными случаями полной замены силовых установок летательных аппаратов (ЛА), капитальным ремонтом турбореактивных двигателей (ТРД), восстановлением планеров, заменой стекол, приемников воздушного давления и т.п. Задержки воздушных судов (ВС) и их отклонение от заданных маршрутов для обхода районов, загрязненных вулканическим пеплом, приводят к существенным расходам авиакомпаний, работающих в регионах, подверженных влиянию вулканической деятельности.

Верхняя часть грибообразного облака пепла («зонтичная область» колонны вулканического пепла), распространяясь вначале радиально, а затем под влиянием ветра

преимущественно в одном или нескольких конкретных направлениях в различных слоях атмосферы, в наибольшей степени затрагивает авиацию. При этом происходит загрязнение огромных объемов воздушного пространства вулканическим пеплом высокой концентрации на высотах до 14 км, использующегося как стандартные эшелоны крейсерского полета реактивных воздушных судов [4, 8].

Размеры облака вулканического пепла и его последующее удаление от места нахождения вулкана зависят от сочетания таких факторов, как естественное рассеивание облака в атмосфере и его перемещение как единого целого под воздействием тропосферных и стратосферных ветров. В зависимости от профиля ветра на высотах облако пепла может быть разрезано ветром и двигаться в заметно различающихся направлениях на разных уровнях в атмосфере. Это увеличивает вероятность контакта реактивных воздушных судов с облаком вулканического пепла значительной концентрации в сотнях километров от вулканического извержения. В случаях, когда колонна вулканического пепла проникает в стратосферу, образовавшееся из него облако вулканического пепла может быть перенесено на расстояние до нескольких тысяч километров. Известны многочисленные случаи, когда вулканический пепел, выброшенный во время извержений в стратосферу, многократно обигал Землю в поясе тропиков и оставался в атмосфере во взвешенном состоянии годами [4, 8].

Состав вулканического пепла различается в зависимости от конкретного вулкана. В целом он состоит преимущественно из кремнезема (>50 %) и в меньших количествах из оксидов алюминия, железа, кальция и натрия [8].

Вулканический пепел по существу представляет собой мелкие осколки стекла и распыленную горную породу. Он является абразивным материалом и состоит в основном из кремнистых веществ, температура плавления которых ниже рабочей температуры двигателей при крейсерском режиме полёта.

Кроме того, в облаке пепла присутствуют газообразные растворы двуокиси серы (серной кислоты) и хлора (соляной кислоты). Поэтому присутствие в атмосфере вулканического пепла представляет серьезную угрозу для воздушного судна. Он приводит к повреждению турбореактивных двигателей, абразивному истиранию остекления кабины, планера ВС и его внешних поверхностей, засоряет систему приемника воздушного давления, проникает в систему кондиционирования воздуха и охлаждения оборудования, загрязняет электрическую и электронную бортовую аппаратуру, топливные и гидравлические системы [8].

В течение первых двух-трех суток после эксплозивного извержения может сохраняться критическая ситуация из-за возможного присутствия на крейсерских эшелонах на значительном удалении от вулкана высоких концентраций пепла, состоящих из частиц диаметром до 10 мкм. По прошествии трех суток считается, что опасность для воздушных судов по-прежнему сохраняется, если наличие пепла можно определить визуально или на основании данных, полученных со спутников [8].

Для воздушных судов с реактивной силовой установкой наиболее серьезную опасность представляет возможность повреждения двигателей из-за присутствия в атмосфере вулканического пепла. Повреждение реактивных двигателей в целом обусловлено следующими причинами.

Наиболее важная состоит в том, что точка плавления вулканического пепла ниже рабочих температур турбореактивного двигателя (ТРД) при условиях тяги, превышающей тягу на режимах малого газа. Вулканический пепел в основном состоит из силикатов с температурой плавления 1 100 °С, тогда как рабочая температура при нормальной тяге составляет 1 400 °С. Пепел расплавляется в камере сгорания ТРД и наплавляется на лопатки контура высокого давления (КВД) и на лопатки турбины, что, в конечном счете, вызывает помпаж двигателя.

Будучи абразивным, вулканический пепел повреждает воздушные тракты ротора компрессора и законцовок лопаток компрессора высокого давления, что приводит к уменьшению эффективности турбины высокого давления и тяги двигателей. Такая эрозия приводит к уменьшению запаса двигателя по срыву. Степень эрозии лопаток компрессора зависит от следующих основных факторов: твердости вулканического пепла, размера и концентрации его основных частиц, скорости соударения с частицами пепла, а также режима тяги двигателя и защиты внутреннего контура двигателя. При этом абразивное разрушение элементов двигателя является необратимым.

Пепел может забивать входные отверстия топливной системы и системы охлаждения. Например, загрязнение топливных форсунок затрудняет или делает невозможным повторный запуск двигателя [8]. Кроме этого, вулканический пепел оказывает негативное воздействие на планер и оборудование воздушного судна.

Наиболее актуальна проблема негативного воздействия вулканического пепла для приемника воздушного давления, который не только подвергается абразивному повреждению, но и засоряется продуктами извержения вулкана. Это может привести к искажению показаний указателя воздушной скорости и даже полной потере информации о воздушной скорости самолёта.

Могут быть серьезно загрязнены вулканическим пеплом топливная система, маслосистема и система охлаждения, что потребует их полной очистки, а также замены фильтров и топлива.

После прохождения через облако вулканического пепла загрязненным может оказаться весь фюзеляж, что потребует тщательной очистки приборной панели и кабины экипажа в целом, панели автоматических выключателей, пассажирского салона, багажного отсека и т.д. Бортовое электронное и электрическое оборудование может быть настолько сильно загрязненным, что потребует его полностью заменить, прежде всего, из-за большой вероятности того, что все эти блоки подверглись сильному перегреву. Пепел загрязняет также систему пожарной сигнализации, которая может выдавать раздражающие ложные сигналы тревоги, обусловленные присутствием в воздухе вулканического пепла, а не дымом пожара [8].

К сожалению, в настоящее время отсутствуют согласованные в ICAO значения концентрации пепла, которая представляет опасность для воздушных судов. Рекомендовано только избегать в полете зон распространения шлейфа вулканического извержения [8].

Тем не менее, Европейское объединенное управление гражданской авиации в новых правилах полетов в условиях облака вулканического пепла определило безопасную для двигателей самолетов концентрацию пепла в воздухе, равную 0,002 грамма на кубометр воздуха [6].

Наряду с пеплом вулканы могут испускать значительное количество газов, в том числе и ядовитых. Обычно химический состав вулканических газов следующий: водяной пар ( $H_2O$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ), оксид углерода ( $CO$ ), азот ( $N_2$ ), диоксид серы ( $SO_2$ ), оксид серы ( $SO$ ), газообразная сера ( $S_2$ ), водород ( $H_2$ ), аммиак ( $NH_3$ ), хлористый водород ( $HCl$ ), фтористый водород ( $HF$ ), сероводород ( $H_2S$ ), метан ( $CH_4$ ), борная кислота ( $H_3BO_3$ ), хлор ( $Cl$ ), аргон ( $Ar$ ), преобразованные  $H_2O$  и  $CO_2$ . Также присутствуют хлориды щелочных металлов и железа. Состав газов и их концентрация зависят от температуры и от типа земной коры, поэтому они могут меняться даже в пределах одного вулкана. Вулканические газы, выделяемые вулканами любого типа, поднимаются в атмосферу и обычно не причиняют вреда, однако, частично они могут возвращаться на поверхность земли в виде кислотных дождей. Одним из самых вредных газов является двуокись серы, которая обладает едким запахом и даже при небольшой концентрации раздражает слизистые оболочки носа, горла и глаз. Двуокись серы может распространяться на значительное расстояние от ее источника. Газ реагирует с влажным воздухом, образуя крошечные капли серной кислоты. Эти капли настолько малы, что содержатся в воздухе в виде тонкой взвеси в течение неопределенно долгого времени. Аэрозоль серной кислоты может образовать вулканический смог, качество воздуха при этом часто опускается ниже стандартов [7].

Для обеспечения безопасности полетов в воздушном пространстве, подверженном влиянию вулканического извержения, необходимо обеспечить организацию полетов, исключающую попадание ВС в те части облака вулканического пепла и прилегающие к ним области, которые представляют опасность для авиации. В этих целях представляется необходимым организация мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облаков вулканического пепла.

Использование существующих типов РЛС, в том числе и метеорологических, для наблюдения за распространением в атмосфере продуктов извержения вулканов с земли или борта воздушного судна малоэффективно вследствие ограниченного радиуса их действия, несоответствия технических характеристик (частотного диапазона) задачам обнаружения вулканического пепла и материально достаточно затратна. Оптимизация технических характеристик доплеровской РЛС при использовании для работы диапазона К и поляризация сигнала позволяют использовать специализированный радиолокатор в целях наблюдения за вулканами. Для существенного снижения экономических затрат и повышения эффективности представляется целесообразным размещение специализированного радиолокатора на высококомобильной платформе.

К настоящему времени достигнут существенный прогресс в деле обнаружения вулканического пепла на основе анализа метеорологических данных, получаемых с помощью искусственных спутников земли (ИСЗ). Для рассматриваемых целей особый интерес представляют данные радиометрических наблюдений. Однако вследствие того, что эти данные предоставляются с задержкой, большой длительности цикла наблюдения, а данные имеют недостаточное разрешение по месту, использование информации ИСЗ в задачах непосредственного оперативного обеспечения полетов в зонах распространения облаков вулканического пепла затруднено [6].

Тем не менее, дистанционное слежение за вулканами с использованием ИСЗ позволяет получать общую информацию о пространственном положении, траектории

смещения, составе и концентрации продуктов извержения, которая может быть использована при разработке инерционных прогнозов эволюции, направления и скорости смещения облаков вулканического пепла.

С целью предоставления оперативным органам организации воздушного движения (ОрВД) и авиакомпаниям прогнозов траектории смещения и эволюции облаков вулканического пепла для планирования и обеспечения полетов в зоне вулканической деятельности в настоящее время ведется работа над созданием систем ассимиляции данных, сочетающих в себе функциональные возможности прогнозирования, обеспечиваемые моделями расчета перемещения и рассеивания пепла в атмосфере, и фактическую информацию о местоположении вулканического шлейфа, получаемую с помощью ИСЗ [8].

На основе достигнутого к настоящему времени уровня развития технологий появилась возможность создания принципиально новых подходов обеспечения безопасности и экономической эффективности полетов в зонах, подверженных влиянию вулканической деятельности на основе разработки новых систем обнаружения и мониторинга облаков вулканического пепла.

Известно устройство *AVOID* (*Airborne Volcanic Object Identifier and Detector* — «Опознаватель и детектор вулканических объектов в воздухе»), которое включает в себя размещенное на борту самолета инфракрасное оборудование, позволяющее обнаруживать вулканический пепел в полете на дальностях до 100 км впереди ВС на высотах от 1,5 до 15 км. Система передает изображение облака вулканического пепла на дисплей экипажа самолета, позволяя ему скорректировать маршрут полета для его своевременного обхода, а также на мониторы диспетчеров служб организации воздушного движения для создания в режиме реального времени обобщенной картины распространения в пространстве вулканического пепла. Это позволяет держать открытым большие участки воздушного пространства вместо их тотального закрытия во время извержения вулканов, что, в конечном счете, минимизирует перебои в воздушном движении [6, 10].

Недостатками *AVOID* являются следующие:

- система не позволяет проводить целенаправленный, безопасный для экипажа мониторинг атмосферы непосредственно в зонах распространения вулканического шлейфа с инструментальным определением концентрации продуктов вулканического извержения для создания точной трехмерной модели распространения вулканического пепла в воздушном пространстве;
- система не позволяет создать детальную картину загрязнения воздушного пространства различными продуктами извержения вулкана, в том числе на различных уровнях.

Накопленный в настоящее время опыт по обеспечению безопасности полетов в регионах с интенсивной вулканической деятельностью в целях реальной оценки ситуации в воздушном пространстве предполагает разделение облака вулканического извержения на зоны по степени опасности для авиации. Например, в [4] предложено выделять следующие зоны вулканического шлейфа:

- 1) зона интенсивного пеплопада (в радиусе 100–300 км от вулкана), которую необходимо полностью закрыть для полетов;
- 2) зона пеплопада с содержанием пепла от 0,2 до 1 г на 1 м<sup>3</sup> воздуха, которую следует закрыть частично (вдоль оси пеплопада);

- 3) зона возможного пеплопада — в этом секторе решение о полетах принимается в зависимости от визуального состояния атмосферы, и полеты нужно отменять временно и частично;
- 4) зона аэрозольного загрязнения атмосферы (которое может сохраняться несколько лет, раз за разом обигая Земной шар), в пределах которой отменять полеты нет необходимости, поскольку аэрозольный шлейф не представляет непосредственной опасности для полетов ВС, в том числе для турбореактивных двигателей самолетов.

На основе подходов к мониторингу атмосферы, изложенных в [1, 6, 10, 11], авторами разработан способ мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облаков вулканического пепла на основе использования специализированного беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Техническим результатом предлагаемого способа является повышение точности и надежности выделения в воздушном пространстве, подверженном влиянию облаков вулканического пепла, областей загрязнения, разделяемых по степени опасности для авиации, в целях определения полетных зон (участков воздушных трасс, районов аэропортов), позволяющих с учетом метеорологической обстановки безопасно эксплуатировать воздушный транспорт. Технический результат достигается тем, что в способе мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облака вулканического пепла определение местоположения облака и текущего значения концентрации продуктов извержения осуществляют с помощью БПЛА, оснащенного специализированным измерительным оборудованием, обеспечивающим оптимальный сбор информации о вулканическом облаке, передачу информации на пункт мониторинга и управления БПЛА для построения трехмерной модели распространения в атмосфере продуктов извержения вулкана в целях определения в воздушном пространстве полетных зон (участков авиационных трасс), допускающих с учетом метеорологической обстановки безопасную эксплуатацию воздушного транспорта.

В качестве воздушной платформы носителя специализированного оборудования предлагается использовать беспилотный летательный аппарат:

- а) обладающий продолжительностью дальностью полета с полной коммерческой нагрузкой в виде специализированного оборудования до нескольких сотен (тысяч) километров на высотах от 1 000 до 15 000 м с шагом 100–500 м на удалении от пункта управления порядка сотен (тысяч) километров;
- б) имеющий следующий состав специализированного оборудования для исследования состава облака вулканического извержения:
  - автоматический многокомпонентный газоанализатор для выявления в режиме реального времени газа из состава газовой смеси облака продуктов вулканического извержения, представляющих опасность для ВС и экипажа;
  - радиометр для оперативного радиационного контроля состава облака вулканического извержения;
  - оборудование дистанционного обнаружения продуктов загрязнения атмосферы, включая локаторы LIDAR и пассивные ИК-датчики, которые могли бы обнаруживать вулканический пепел перед воздушным судном типа *AVOID*;

- приборы пылевого контроля (пылемеры) различного принципа действия [5], обеспечивающие оперативное, многократное измерение текущего значения концентрации вулканического пепла (продуктов извержения вулканов) в атмосфере;
- аппаратура для определения текущего местоположения летательного аппарата в пространстве (модуль системы спутниковой навигации NAVSTAR и/или ГЛОНАСС) в целях установления, передачи текущих координат БПЛА в полете, а также привязки измеренных параметров к конкретной точке воздушного пространства;
- аппаратура для определения параметров ветра (направления и скорости ветра) в исследуемой точке воздушного пространства для разработки прогноза движения облаков вулканического пепла;
- аппаратура передачи результатов измерений в режиме реального времени на пункт мониторинга и управления полетом БПЛА.

Предлагаемый состав измерительного оборудования БПЛА обеспечивает интеграцию в единую систему всех средств получения информации об облаке вулканического пепла.

Вопросы выбора конкретного типа существующего или перспективного БПЛА в качестве летной платформы, так и подбора соответствующей номенклатуры специализированного научного и связного оборудования, являются предметом целевых поисковых исследований.

В целях оптимизации процесса получения информации о загрязнении воздушного пространства продуктами вулканического извержения на этапе непосредственной подготовки к вылету разрабатывается маршрут и траектория исследовательского полета БПЛА на основе следующих данных:

1. На основе информации об извержении вулкана, полученной с помощью ИСЗ, прогнозов эволюции, направления и скорости смещения облака вулканического пепла на разных уровнях и др.
2. Удаления и расположения полетных зон, авиационных трасс и аэропортов относительно вулкана, как источника формирования вулканического шлейфа.

В зависимости от степени угрозы объектам воздушного пространства (полетным зонам, авиатрассам, зонам аэропортов и т.п.) определяются оптимальный маршрут и траектория исследовательского полета БПЛА на основе следующих возможных вариантов:

1. При обнаружении извержения вулкана в потенциально опасном районе воздушного пространства или на подветренной стороне вулканического извержения на значительном удалении от объектов воздушного движения осуществляется полет навстречу ведущему потоку и барражирование на разных уровнях на удалениях от полетной зоны, обеспечивающих своевременное выявление угрозы накрытия вулканическим шлейфом объектов воздушного движения.
2. При расположении объектов воздушного движения на подветренной стороне вулканического извержения в непосредственной близости от облаков вулканического

пепла осуществляется барражирование на различных уровнях в направлении облаков вулканического пепла для уточнения времени возникновения и степени непосредственной опасности для авиации в целях своевременного прекращения полетов.

3. При расположении объектов воздушного движения в зоне распространения вулканического шлейфа осуществляется барражирование непосредственно в зоне облаков вулканического пепла в целях уточнения границ зон, отличающихся по степени опасности для авиации (в первую очередь на основе данных о концентрации продуктов извержения в атмосфере), выявления эволюции вулканического облака, предварительного определения времени прохождения полетной зоны тыловой частью пеплового облака, как возможного срока возобновления полетов авиации.
4. При прохождении полетного пространства основной частью облака пепла (при расположении объектов воздушного движения тыловой части облака вулканического пепла) осуществляется барражирование на различных уровнях в районе объектов воздушного движения в последовательности, определяемой степенью значимости для возобновления воздушного движения.

Для конкретных регионов в зависимости потенциальных угроз вулканической деятельности и относительного положения обеспечиваемых полетных зон, авиационных трасс или районов аэропортов предполагается разработка типовых маршрутов для проведения мониторинга воздушного пространства.

Способ мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облака вулканического пепла реализуется в следующей последовательности.

При поступлении от Службы слежения за вулканической деятельностью на международных авиатрассах (IAVW) информации об извержении вулкана в потенциально опасном для авиации районе и/или о возникновении угрозы проникновения шлейфа вулканического извержения в воздушное пространство органам обслуживания воздушного движения (ОВД) целесообразно организовать контроль за облаком пепла в целях обеспечения безопасности полетов в зоне ответственности.

Для обеспечения оперативного получения информации в целях построения трехмерной модели распределения в воздушном пространстве продуктов извержения вулкана предлагается использовать специализированный БПЛА с аппаратурой комплексного мониторинга облаков вулканического пепла.

На этапе подготовки к полету на основе данных о вулканическом извержении (расположения вулкана относительно объектов полетного пространства, времени, мощности и продолжительности извержения), данных ИСЗ о характеристиках и эволюции облака вулканического пепла, расчетных данных о траекториях смещения вулканического шлейфа на различных уровнях, на основе стандартных для района ответственности ОВД маршрутов разведки разрабатывается маршрут и траектории ВС на различных этапах полета, обеспечивающих оптимальное получение информации о состоянии воздушного пространства, задаются координаты точек воздушного пространства, в которых будет осуществляться мониторинг атмосферы. Разработанное полетное задание закладывается в блок управления БПЛА для выполнения полета в автоматическом режиме.



Исследовательский полет БПЛА осуществляется согласно плану в автоматическом режиме при непосредственном контроле с пункта управления (ПУ). Оператор осуществляет контроль воздушного пространства на основе данных от оптической локационной системы, поступающих в виде изображения облака вулканического пепла на дисплей ПУ. При необходимости оператор ПУ изменяет маршрут и/или траекторию мониторинга или осуществляет непосредственное управление полетом БПЛА в ручном режиме. Корректировка маршрута, высот полета, алгоритма измерений производится на основе данных составе вулканического облака и прилегающих к нему областей, полученных от измерительной аппаратуры, в первую очередь, от локационных систем, в целях:

- предотвращения угрозы попадания БПЛА в зону вулканического облака с высокой концентрацией продуктов извержения, исключающей безаварийную эксплуатацию воздушного судна;
- получения подробной информации о составе и характеристиках загрязняющих атмосферу продуктов извержения, в первую очередь, о концентрации вулканического пепла в наиболее значимых секторах воздушного пространства.

Данные мониторинга с точной привязкой к текущим координатам в режиме реального времени передаются на пункт мониторинга и управления БПЛА для создания трехмерной модели распространения вулканического пепла в воздушном пространстве. Трехмерная модель распределения в атмосфере концентрации продуктов извержения позволяет выделить в воздушном пространстве области, отличающиеся по степени опасности для авиации, в целях определения полетных зон (участков авиационных трасс), допускающих с учетом метеорологической обстановки безопасную эксплуатацию воздушного транспорта.

Использование предлагаемого способа мониторинга воздушного пространства в зонах распространения облаков вулканического пепла позволяет повысить регулярность и эффективность авиационных перевозок в регионах с высокой вулканической активностью. Экономическая эффективность предлагаемого способа прежде всего определяется обеспечением безопасности людей в процессе мониторинга воздушного пространства посредством исследовательских полетов БПЛА, перекрывающей все возможные затраты.

### Литература

1. EasyJet начинает тестирование детектора вулканического пепла. — Электронный ресурс: [<http://www.aviasafety.ru/designs/killers-in-aviation/volcanic-ash/nd09062010>] (дата обращения: 09.06.2010).
2. Авиация в облаке вулканического пепла. — Электронный ресурс: [[http://camru.org/articles/aircraft\\_engines\\_and\\_volcanic\\_ash.html](http://camru.org/articles/aircraft_engines_and_volcanic_ash.html)] (дата обращения: 18.04.2010).
3. Вулканическая тревога: чем опасен пепел для самолетов и будет ли лето. Немецкая волна. — Электронный ресурс: [<http://www.unian.net/world/348712-vulkanicheskaya-trevoga-chem-opasen-pepel-dlya-samoletov-i-budet-li-leto.html>] (дата обращения: 19.04.2010).
4. Кирьянов В. Вулканический пепел и авиация. — Электронный ресурс: [[http://my.mail.ru/community/fiery\\_mountains/3A7F52FF12B802BF.html](http://my.mail.ru/community/fiery_mountains/3A7F52FF12B802BF.html)] (дата обращения: 17.06.2011).
5. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. — М.: Химия, 1978. — 208 с.

6. Яценникова Н. Полет по-черному. Эксперты прогнозируют повышение активности вулканов и разрабатывают рекомендации для пилотов // Российская газета. Фед. вып. № 5523 (147). — Электронный ресурс: [<http://www.aviasafety.ru/the-information/articles/rg20110710-22>].
7. Продукты извержения вулканов и их воздействие на организм. Справка. Источник: РИА Новости. 22.09.20. — Электронный ресурс: [<http://ria.ru/documents/20110522/378197610.html>].
8. Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ. Дос. 9691 АН/954. Изд. 2-е. Международная организация гражданской авиации, 2007.
9. Случаи попадания самолетов в облака вулканического пепла. Справка. Источник: РИА Новости. — Электронный ресурс: [<http://ria.ru/spravka/20100416/223053569.html#ixzz3TKIGU4X2>].
10. Способ выявления зон загрязнений атмосферного воздуха. Пат. RU № 2018156, опубл. 15.08.1994.
11. Способ мониторинга атмосферного воздуха. Пат. RU № 2471209, опубл. 27.12.2012.
12. Способ обнаружения чрезвычайной ситуации и ликвидации ее последствий. Пат. RU № 2350368, опубл. 27.04.2008.