

УДК 551.508.85:551.590.3(045)

А.Н. Миколушко

**ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ПЕПЕЛ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ**

Национальный авиационный университет

*Представлен обзор методов и средств дистанционного зондирования атмосферы для прогнозирования зон опасности на маршруте самолета, связанных с выбросами вулканического пепла. В рассмотрение включены способы обнаружения облаков пепла и возможности определения концентрации частиц вулканической пыли в воздухе.*

**Ключевые слова:** атмосфера, дистанционное зондирование, вулканический пепел, безопасность полётов, радиолокация.

**Введение**

Сложные метеоусловия значительно влияют на безопасность полетов. За последние десятилетия современные службы прогнозирования и обнаружения опасных для авиации погодных явлений, значительно улучшили качество и точность прогнозов. Этот период характеризуется использованием данных, полученных с помощью организованной сети метеорологических радиолокационных станций. В Украине и многих других государствах это в основном простые метеорологические радиолокаторы, которые позволяют получить информацию по уровню мощности радиолокационного сигнала отраженного от метеообразований.

Как правило, метеорологические радиолокаторы разработаны для мониторинга зон интенсивных дождей, турбулентности, града, порывов ветра, вероятного обледенения в полете и грозы. Это наиболее важные риски. Но извержение в прошлом году вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии, ясно показало еще один источник опасности для самолетов – вулканический пепел.

**Постановка задачи**

Беспрецедентное прекращение воздушного движения над Европой, вызванное облаком пепла после извержения вулкана, заставило мировое сообщество начать разрабатывать более эффективную стратегию, связанную с влияющими на безопасность полетов выбросами вулканического пепла. Такая стратегия должна основываться на точной информации о реальной степени присутствия вулканического пепла в воздушном пространстве и о его возможном влиянии на воздушные суда, оказавшиеся в такой облачности.

Именно поэтому в дополнение к обнаружению и мониторингу опасных зон в тропосфере, связанных с метеообразованиями, поведением ветра и наэлектризованностью атмосферы, зоны вулканического пепла также должны рассматриваться в качестве объекта наблюдения, т.к. это имеет существенные значение для экологической и экономической безопасности [1- 3].

**Мониторинг вулканического пепла**

Действующие вулканы представляют огромное число опасностей для жизни и имущества. Некоторые опасности, такие как огромные потоки лавы и взрывы, связанные с извержениями вулканов, являются впечатляющими разрушителями и узнаваемы всеми. Другие, такие как оседание пепла, менее впечатляющи, но не менее опасны.

Вулканы являются мощными источниками пылевой материи, выбрасывая в атмосферу колоссальное количество дыма и вулканического пепла. Вулканический пепел – это продукт вулканической деятельности в форме выброшенных в воздух мельчайших каменных частиц диаметром менее 2 мм. Считается, что облака пепла в нисходящих после извержения вулкана потоках воздуха состоят из гораздо меньших частиц – диаметром меньше 0,1 мм. Эти частицы вместе с газами вулканического происхождения поднимаются в атмосферу на высоту более 20 км. Ветер в верхних слоях атмосферы способен переносить частицы, содержащиеся в облаках пепла. Как правило, они образуются выше эшелона полета FL200 (6100 м), но нижняя граница первоначального облака зависит от высоты вулканического кратера и скорости извержения вулканического материала. К числу видимых признаков извержения, в первую очередь, относятся огромные белые облака пара, если кратер расположен ниже ледовой шапки. При

этом извержении облака пара поднимаются непрерывно и часто маскируют собой выбросы пепла, которые почти всегда происходят в беспорядочной последовательности.

Достаточно многочисленные измерения химического и элементного состава аэрозолей вулканического происхождения свидетельствуют о процессах их образования и дальнейшей эволюции: эмиссия продуктов стирания стенок кратера и частиц измельченной лавы, а также паров, сернистого газа, соляной кислоты, легко испаряющихся металлов, которые в дальнейшем вступают в различные химические реакции и конденсируются. Химический анализ дыма и пылевой материи для различных вулканов показывает преимущественное содержание соединений кремния – 60-80%, сульфатов – 30-10%, кальцитов – 3-10%, соединений алюминия – 0-20%, железа – 1-10%. Однако более детальное рассмотрение результатов химического и элементного анализа свидетельствует и о существенных различиях в составе выброшенного материала для разных вулканов [4,5]. В аэрозольной лаборатории НИИФ СПбГУ в период 1974-1981 гг. неоднократно проводились измерения аэрозолей приземного слоя атмосферы вблизи действующих вулканов Камчатки (Толбачик, Ключевской, Горелый, Карымский, Мутновский). При более близком рассмотрении пепла вулканического облака, становится ясно, что он состоит из разных по размеру, форме и плотности частиц. Распределение частиц по размерам с  $r \geq 0,2$  мкм определялось с помощью фотоэлектрического счетчика АЗ-5М, а для  $r \leq 0,5$  мкм с помощью электронно-микроскопического анализа аэрозольных проб [6]. Большие облака таких находящихся в воздухе частиц, могут с помощью ветра покрывать огромные площади. Малые и чрезвычайно твердые частицы пепла, могут находиться на больших высотах в течение довольно длительного времени и в опасной концентрации (самые мелкие частицы могут существовать в стратосфере на протяжении нескольких лет). Их основная опасность связана не так с плохой видимостью, как с абразивным действием на жизненно-важные детали авиационных двигателей, неисправность которых может привести к катастрофическим последствиям. Обычно, вулканический пепел более чем на 50 % состоит из двуокиси кремния. Это очень твердое вещество с температурой плавления приблизительно 1100 °С. Оно обладает абразивными свойствами, может плавиться, а затем отвердевать в современных турбореактивных двигателях, что приводит к повреждению воздушных судов. Попадавшие внутрь частицы двуокиси кремния плавятся в нагретых частях двигателя, а затем попадают на рабочие лопатки компрессора высокого давления и направляющие лопатки турбины, что в наиболее серьезных случаях может приводить к кратковременной или полной потере тяги. Кроме несчастного случая во время текущего полета, это может случиться во время следующего из-за повреждения двигателя. Кроме того, экономические потери, связанные с разрушением собственно двигателей, очевидны – абразивный эффект от попадания вулканического пепла в двигатели не полностью выводит их из строя, но его последствия нельзя устранить в ходе ремонта, поэтому технические характеристики двигателей не возвращаются на прежний уровень.

Возможности наблюдать распространение зоны вулканической облачности в горизонтальной плоскости, используя средства дистанционного контроля – спутники, наземные лазерные локаторы инфракрасного диапазона (лидары) и так далее – за последние годы существенно возросли.

Получить подробную информацию о составе облаков пепла и их вертикальных размерах трудно. Эта проблема усложняется из-за изменяющегося баланса между старым пеплом и эпизодическими выбросами нового.

Аэрофотосъемка интенсивности и динамики вулканического извержения в реальном времени, особенно во время слабой видимости ожидаемой при этом, невозможна [7]. Тем не менее, существуют некоторые космические средства, способные для такого мониторинга, например, система Meteosat второго поколения. Meteosat не только проводит наблюдение за частями Земли каждые 15 минут, а и позволяет также определить и отличить столбы вулканического пепла от других облаков [8]. Meteosat использует значения мультиспектрального видимого и инфракрасного радиометра и специальный алгоритм, которые позволяют различать выбросы. Однако такие наблюдения практически не в состоянии определить высоту обнаруженного столба вулканического пепла.

Имеет место возможность использования наземных систем метеорологических радиолокаторов для обнаружения облаков пепла [9]. Для того, чтобы сделать это, были

проверены различные модели, принимая во внимание такие рабочие частоты S-, C-, X- и Ka-диапазонов. После основываясь, на свидетельствах чувствительности радиолокаторов к облакам пепла, были выведены микрофизические характеристики вулканического пепла.

Еще одним средством мониторинга облаков пепла являются лидары. Лидарные станции Мюнхена, являющиеся частью сети Европейской лидарной сети наземных лидарных станций EARLINET, внимательно следили за облаками вулканического пепла от вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии, начиная с момента его извержения. Сеть, которая включает в себя 26 различных станций по всей Европе, активно использует лидарные средства для получения информации о физических свойствах атмосферы. Этот метод так же дает хорошие возможности для мониторинга частиц пепла в воздухе [10].

### **Оценка плотности облака вулканического пепла и параметров его частиц**

Для оценки потенциальных повреждений воздушных судов, при столкновении их с таким явлением как облако вулканического пепла, необходимо знать массовую концентрацию частиц вулканического пепла непосредственно в воздухе [11]. А этот параметр довольно трудно вычислить.

Прогнозировать движение и рассеивание облаков вулканического пепла еще труднее. Здесь нужна целая комбинация моделируемых метеорологических процессов прогнозирования температуры и ветра с данными в реальном времени, которые можно было бы использовать для параллельного моделирования рассеивания твердых частиц.

Для подобного рода моделей движения и рассеивания вулканического пепла, требуется разная информация описывающая столб пепла, включая высоту извергаемого облака, его распространение в вертикальной плоскости, распределение его частиц в зависимости от их размеров, а также периоды активной деятельности вулкана. Кроме того, может потребоваться информация о скорости извергаемой массы.

Поэтому такие модели ограничены в возможностях точного ответа на вопросы о движении облаков вулканического пепла, как правило, из-за отсутствия информации в реальном времени о массе и концентрации пепла.

Есть много инструментов, которые в состоянии измерить плотность частиц или непрерывной аэрозольной массы, но они, как правило, предназначены для наземного использования [12].

Экспериментальные доказательства, касающиеся возможности обнаружения облаков пепла метеорологическими радиолокаторами во время извержения вулкана в основном были обобщены [9]. Была рассмотрена чувствительность микроволнового радара к облакам пепла, принимая во внимание различные рабочие частоты, такие как S-, C-, X-и Ka-диапазонов.

Лидарные приборы, работающие на земле, могут быть использованы для определения оптических свойств аэрозольных частиц, а значит, и вулканического пепла. Но для того чтобы судить о массовой концентрации находящегося в воздухе пепла, должны быть разработаны специальные методы и алгоритмы.

Учитывая, что облако пепла можно сравнить с облаком гидрометеоров различных размеров, форм и микрофизических параметров, методы, разработанные для обнаружения метеообразований, их идентификации и распознавания [13-15], могут быть изменены и использованы в целях мониторинга вулканической пыли.

Моделирование сложной пространственной ситуации, обусловленной непрекращающейся вулканической деятельностью, периодически подпитывающей облако пепла, с постоянным увеличением этого облака в горизонтальной плоскости и последующим его рассеиванием в зоне воздушного движения, требует значительного объема информации в реальном времени.

### **Объединение получаемых данных**

Другим аспектом обнаружения опасных зон вулканического пепла является также применение не только наземных, но и воздушных радарных и/или лидарных средств, т.е. алгоритмы оценки распределения частиц по размерам и их концентрации могут быть разработаны на основе радиолокационных и/или лидарных данных дистанционного зондирования.

В частности детектор, созданный ведущим научным сотрудником Норвежского научно-исследовательского авиационного института (NILU) Фредом Пратой, объединяет получаемые как бортовые, так и спутниковые данные и позволяет воздушным судам обнаруживать облака вулканического пепла в атмосфере до ста километров.

Слияние информации спутниковых, наземных и бортовых локаторов сможет объединить глобальное покрытие спутников с высоким разрешением и точностью привязки данных к каждому конкретному маршруту и рейсу.

### Выводы

1. Комплексное использование методов дистанционного зондирования, предназначенных для мониторинга опасных погодных условий, имеет потенциал для широкого применения при обеспечении безопасности полетов в условиях загрязнения атмосферы вулканическим пеплом.

2. Большое значение для надежного и точного обнаружения зон вулканического пепла в воздухе, их идентификации и оценки, имеет объединение данных с использованием как наземных радиолокационных и лидарных, та и бортовых и спутниковых данных.

### Список литературных источников

1. L. Wilson, "Explosive volcanic eruptions," *J. Geophys. Res.*, vol. 30, pp. 381–392, 1972.
2. L. Wilson, R. S. J. Sparks, T. C. Huang, and N. D. Watkins, "The control of volcanic column height by eruption energetics and dynamics," *J. Geophys. Res.*, vol. 83, pp. 1829–1836, 1978.
3. B. Zimanowski, K. Wohletz, P. Dellino, and R. Buttner, "The volcanic ash problem," *J. Volcanol. Geothermal Res.*, vol. 122, pp. 1–5, 2003.
4. Кэйдл Р. Твердые частицы в атмосфере. М., 1969, 284 с.
5. Ивлев Л.С. Микроструктурные особенности аэрозолей вулканического происхождения. Оптика атмосферы и океана, т.9, № 8, 1996, с. 1039-1057
6. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л., Гидрометеиздат, 1961, 541 с.
7. J. R. Riehl, W. I. Rose, D. J. Schneider, T. J. Casadevall, and J. S. Langford, "Unmanned aerial sampling of a volcanic ash cloud," *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 75, no. 12, pp. 137–138, 1994.
8. "Volcanic Ash Detection with MSG," Doc. No: EUM/MET/REP/07/0467, Issue: v1, Date: 24 October 2007, 18 p., <http://www.eumetsat.int>
9. F. S. Marzano, G. Vulpiani, and W. I. Rose, "Microphysical Characterization of Microwave Radar Reflectivity Due to Volcanic Ash Clouds," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 2, February 2006, pp. 313-327.
10. ESA Earth Observation Mission Science Division, University of Munich, Meteorological Institute, 2010, Website: [http://www.esa.int/esaLP/SEMJTTF098G\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/SEMJTTF098G_index_0.html)
11. The Paul Scherrer Institute, Laboratory of Atmospheric Chemistry, Switzerland, 2010, Website: <http://www.psi.ch/media/the-mass-concentration-of-volcanic-ash-from-iceland-in-the-european-air-space>
12. G. K. Bayhurst, K. H. Wohletz, and A. S. Mason, "A method for Characterizing Volcanic Ash from the December 15, 1989, Eruption of Redoubt Volcano, Alaska," *Volcanic and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, 1991. U.S. Geological Survey Bulletin 2047, 1994, pp. 13-17
13. F. J. Yanovsky, Doppler-polarimetric approach to microwave remote sensing of precipitation, MSMW'07 Symposium Proceedings – The 6th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies, 2007, 1, pp. 436-438.
14. F. J. Yanovsky and L.P. Ligthart, Microwave scattering on atmospheric particles, 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'07, 2007, pp. 26-31.
15. A. A. Pitertsev and F. J. Yanovsky, "Identification of the meteorological objects on doppler-polarimetric radar data by using fuzzy logic based algorithm," *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET, Conference Proceedings*, 2006, pp. 344-346.