

Извержение вулкана как источник метеорологических возмущений, опасных для региональной авиации

Петухов Г.М.

Volcanic eruption as a source of meteorological disturbances dangerous for regional aviation

Petukhov G.M.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург;

e-mail: gena22007@yandex.ru

В статье рассматривается динамика воздействия вулканических извержений и атмосферных метеорологических условий воздействия на выполнение полетов региональной авиации посредством влияния геофизических и метеорологических факторов опасности.

Введение

Международная организация гражданской авиации (ИКАО) разработала всеобъемлющий долгосрочный стратегический план на 2026-2050 годы, направленный на создание более безопасного, надежного, экономически жизнеспособного, эффективного и экологически устойчивого авиационного сектора. Основой этого плана является устремление обеспечения постоянной защиты авиапассажиров, грузов и персонала от всех рисков, связанных с безопасностью, достижения нулевого уровня смертности в результате авиационных происшествий и инцидентов [5].

При извержениях вулканов происходят различные метеорологически значимые возмущения, важные для деятельности региональной гражданской авиации, например, таких как: генерация акустико-гравитационных волн, формирование конвективно-турбулентных возмущений, достигающих тропопаузы, изменения профиля ветра и температуры.

Вулканические извержения представляют собой крупномасштабные возмущения атмосферы, формирующие устойчивые метеорологические структуры продолжительностью 24-72 часа. В отличие от конвективных систем, пепловое облако обладает высокой инертностью переноса (как правило, 500-2000 км) и обладает специфической оптикой ($\tau=2-5$), связанной с особенностями состава и образования таких облаков, создавая уникальный класс угроз для региональной авиации.

Региональная авиация, работающая на коротких маршрутах недалеко от активных вулканических зон, таких как Тихоокеанское огненное кольцо, подвержена повышенному риску. Вулканические шлейфы, поднимающиеся на высоту 10-15 км, пересекают высоты крейсерского полета воздушного судна (ВС), особенно на эшелонах полета FL300-FL400, где струйные течения усиливают дисперсию [1].

Цель исследования – систематизация метеорологических параметров вулканических возмущений как факторов опасности полета с разработкой количественных критериев.

Основные физические механизмы возмущений

Вулканическая деятельность изменяет локальные метеорологические условия, создавая особый микроклимат вблизи извергающего вулкана.

Дисперсия вулканического пепла и взаимодействие с ветром: Вулканические шлейфы переносятся верхнеуровневыми ветрами на большие расстояния; образующиеся над вершинами вулканов или вблизи них лентиколярные (линзовидные) облака (от лат. «lenticularis» – чечевицеобразный), насыщенные влагой и пеплом, могут представлять опасность для ВС, т.к в облаке образуются сдвиги, которые создают турбулентные слои, опасные для устойчивости ВС [6].

Выбросы газов и образование аэрозолей: SO₂ окисляется до сернокислых аэрозолей, повышая отражательную способность облаков и потенциально вызывая мезомасштабные возмущения, такие как молнии внутри вулканического столба [1].

Тепловые и динамические эффекты: Начальная плавучесть в верхней части вулканического «гриба» генерирует гравитационные волны, распространяя возмущения, влияющие на барические системы и сдвиги ветра в региональном масштабе. Эксплозивное извержение вулкана при выбросе формирует *гиперконвективную ячейку* с вертикальными скоростями W=50-150 м/с, аналогичную суперячейке торнадо, но с высотой проникновения до уровня -50 °С (10-12 км). Согласно уравнению (1), градиент Ричардсона *Ri* в зоне контакта пепла и окружающей атмосферы снижается до $Ri < 0.1$:

$$Ri = \frac{N^2}{(du/dz)^2} = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz} / \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 < 0.25, \quad (1)$$

где *N* — частота плавучести (Брента-Вяйсяля), *du/dz* – вертикальный сдвиг ветра (типично 20-40 м/с/км). Эти механизмы производят зоны низкой видимости (концентрация золы >2 мг/м³ классифицируется как «очень высокий риск») и электрические помехи, нарушающие навигацию [8].

Волновые возмущения в атмосфере (ударно-волновые и акустические эффекты) от вулканических извержений. Приводят к образованию плотной воздушной волны в момент взрыва вулкана. На уровне земли и до высоты в несколько километров это возмущение воспринимается как кратковременный скачок атмосферного давления. Скорость распространения волны может достигать 1-2 километров в секунду, что в несколько раз больше скорости звука.

Распространение волны во все стороны. По мере того, как фронт волны растягивается, амплитуда и скорость распространения падают, а энергия рассеивается. Поэтому на определенном расстоянии от места взрыва ударная волна превращается в звук.

Возмущения в ионосфере. Энергия воздушной волны передается ионизированным слоям воздуха, что приводит к изменениям плотности распределения электрического заряда на высоте 70-100 км от поверхности.

Турбулентность: Важным параметром оценки для выполнения безопасного полета является наличие в атмосфере турбулентности, которая передается ВС, находящимся в полете по маршруту, и относится к 15-минутному периоду, непосредственно предшествующему наблюдению. Отслеживаются среднее и максимальное значения турбулентности, а также время достижения максимального значения с точностью до ближайшей минуты, которые сообщаются в единицах EDR. Интерпретация информации о турбулентности представлена в таблице [3].

Таблица. Характеристики турбулентности

№	Характеристика	Максимальное значение (единица EDR *)
1	сильная	EDR равно или превышает 0.45
2	умеренная	EDR равно или больше 0.20, но меньше 0.45
3	слабая	EDR больше 0.10, но меньше 0.20
4	нулевая	EDR меньше или равно 0.10

Примечание: EDR* – (Eddy Dissipation Rate – Скорость вихревой диссипации), стандартный показатель интенсивности атмосферной турбулентности по ИКАО [4]. В основе определения величины EDR лежат подходы, основанные на регистрации вертикальных ускорений ВС (акселерометрический метод) или базирующиеся на информации о вертикальной скорости [2, 7].

Метеорологические факторы опасности полета

Сдвиги ветра и неустойчивость. Мезомасштабный фронт вулканического облака генерирует сдвиги ветра $\Delta V=50-100$ м/с на высоте 500-2000 м, аналогичные в «струйных течениях» на больших высотах. Вертикальный сдвиг $du/dz=15-30$ м/с/км обеспечивает турбулизацию на всех эшелонах. *Критический критерий:* $Ri < 0.25 + \Delta V > 40$ узлов (опасен для полета).

Абразивно-оптические эффекты. Стекловатый пепел (SiO_2 65-75 %) обеспечивает абразию (пескоструйную обработку) лобового остекления ВС со скоростью 0.1-0.5 мм/мин при скорости $V=250$ узлов. Прозрачность снижается на 70-90 % за 3-5 мин, исключая возможность выполнения визуального захода на посадку.

Обсуждение результатов

Полученные метеорологические характеристики вулканических возмущений существенно дополняют [7], акцентируя *динамические факторы* (Ri , ΔV , EDI) наряду с концентрацией пепла, которые позволяют строить модели для проактивной оценки риска в сценариях попадания ВС в штатные условия полета с учетом выявленных факторов опасности.

Заключение

Вулканические извержения формируют уникальный класс метеорологических возмущений, сочетающий конвективную турбулентность, мезомасштабные сдвиги ветра ($\Delta V=50-100$ м/с), оптические эффекты ($\tau=2-5$), увеличение количества атмосферных рек, вызывают грозы и молнии, что, несомненно, существенно превосходит стандартные угрозы. Представленные результаты исследования динамики вулканических извержений и их влияния на атмосферные метеорологические условия с выявленными факторами опасности позволяют повышать компетенции авиационного персонала (пилотов, авиадиспетчеров), синоптиков авиационных метеорологических центров, а также повышать качество предоставления аэронавигационного обслуживания для региональной авиации при выполнении полетов в районах с активной вулканической деятельностью.

Список литературы

1. Авиация – опасности – облака вулканического пепла и газы [Электронный ресурс]. URL: <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/aviation/aviation-hazards-volcanic-ash-clouds-and-gases> (дата обращения: 26.01.2026).
2. Иванова А.Р. Скорость вихревой диссипации в авиационных приложениях оценки интенсивности турбулентности // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 2 (392). С. 6-24.
3. ИКАО Doc 10157, Правила аэронавигационного обслуживания. Метеорология. Монреаль, Канада. Издание первое. 2025. 202 с.
4. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации: Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Монреаль, Канада. Издание двадцать первое. Август 2025 года. 88 с.
5. Стратегический план ИКАО на 2026-2050 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/RU/strategic-plan-2026-2050.aspx> (дата обращения: 26.01.2026).
6. How Active Volcanoes Can Put Airplanes in Danger [Электронный ресурс]. URL: <https://airandspace.si.edu/air-and-space-quarterly/issue-13/volcano-hazards> (дата обращения: 26.01.2026).
7. ICAO Document 9974: Risk management of flight operations with known or forecast volcanic ash contamination. First Edition. 2012. 46 p.
8. Why is monitoring volcanoes important to aviation? [Электронный ресурс]. URL: <https://profession.americangeosciences.org/society/intersections/faq/why-monitoring-volcanoes-important-aviation/> (дата обращения: 26.01.2026).