



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Вулканическая деятельность и ее влияние на полеты воздушных
судов в районе аэродрома Елизово (г. Петропавловск-Камчатский)»

Исполнитель _____ Румянцева Мария Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Волобуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой _____
(подпись)

_____ кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«08» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	2
1 Вулканическая деятельность и ее последствия	4
1.1 Частота и характер вулканических извержений на Камчатке	4
1.2 Влияние вулканического пепла на авиасообщение	7
1.3 Воздействие пепла на инфраструктуру и жизнедеятельность населения ...	9
2 Территория исследования	14
2.1 Географические особенности Камчатского региона	14
2.2 Аэродром Елизово и его воздушные трассы	18
3 Метеорологические факторы, влияющие на распространение вулканического пепла	23
3.1 Влияние синоптической ситуации на распространение пепла	23
3.2 Роль ветра в распространении вулканического пепла	25
4 Обработка данных и их анализ	28
4.1 Обработка полученных данных	28
4.2 Влияние направления ветра на распространения вулканического пепла .	33
4.3 Влияние синоптических ситуаций на распространение вулканического пепла	34
4.4 Влияние инверсии на распространение вулканического пепла	36
4.5 Влияние вулканической активности на аэродром Елизово	38
Заключение	40
Литературные источники	42

Введение

Вулканическая деятельность представляет собой одну из наиболее значительных природных угроз для современной авиации, создавая комплекс проблем для обеспечения безопасности полетов. Особую актуальность эта проблема приобретает в регионах с высокой вулканической активностью, таких как Камчатский полуостров - территорию, где сосредоточено около 30 действующих вулканов Евразии. Географическое положение аэродрома Елизово (г. Петропавловск-Камчатский), являющегося ключевым транспортным узлом региона, делает его особенно уязвимым к воздействию вулканических выбросов, поскольку он расположен в непосредственной близости от нескольких активных вулканических массивов.

Вулканический пепел, представляющий собой сложную смесь мельчайших частиц горных пород (размером от 0,001 до 2 мм), минералов и вулканического стекла, образует в атмосфере высококонцентрированные облака, способные распространяться на сотни километров от эпицентра извержения. Эти частицы обладают рядом опасных свойств: высокой абразивностью, способностью плавиться в двигателях (при температурах около 1100°C) и проводить электричество, что в совокупности создает серьезную угрозу для авиационной техники. Исторический опыт показывает, что даже кратковременное попадание воздушного судна в пепловое облако может привести к выходу из строя двигателей, повреждению остекления кабины пилотов и критическому ухудшению видимости.

Помимо непосредственной угрозы безопасности полетов, вулканические выбросы вызывают значительные социально-экономические последствия. Отмена и задержка авиарейсов приводят к существенным финансовым потерям авиакомпаний, нарушают логистические цепочки и создают проблемы для пассажиров. Для Камчатского края, где авиационный транспорт

играет ключевую роль в обеспечении мобильности населения и грузоперевозок, эти последствия особенно ощутимы.

В данном контексте особую важность приобретает систематический анализ вулканической активности и ее влияния на авиационные операции. Целью настоящего исследования является комплексная оценка вулканической деятельности на Камчатке в период с 2020 по 2024 год и ее воздействия на работу аэродрома Елизово. Особое внимание уделяется анализу повторяемости и интенсивности пепловых выбросов, исследованию атмосферных процессов, влияющих на распространение пепла, и оценке синоптических условий, способствующих переносу вулканического материала в зону аэродрома.

Цель данной работы проанализировать вулканическую деятельность на Камчатке и ее влияние на полеты воздушных судов. Для этого были поставлены следующие задачи:

- обработать предоставленный архив данных;
- проанализировать повторяемость случаев выбросов вулканического пепла на полуострове Камчатка (вулканы Шивелуч, Ключевской, Карымский и Безымянный);
- проанализировать высоты извержений вулканов;
- проанализировать преобладающее направление ветра и его влияние на перемещение вулканического пепла;
- проанализировать синоптические ситуации при извержениях;
- проанализировать данные радиозондирования;

Данные для анализа были предоставлены АМЦ Елизово Камчатского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», а именно архив журнала бортовой погоды с 2020 по 2024 год.

1 Вулканическая деятельность и ее последствия

1.1 Частота и характер вулканических извержений на Камчатке

Камчатский полуостров представляет собой уникальный геодинамический регион, являющийся составной частью Тихоокеанского вулканического кольца - наиболее активной зоны современного вулканизма планетарного масштаба. С геологической точки зрения, данный регион характеризуется сложным сочетанием тектонических процессов.

Этот активный геодинамический режим обуславливает исключительно высокую плотность распределения вулканических центров - на территории полуострова площадью около 270 тыс. км² сосредоточено более 300 вулканических сооружений, из которых 29 находятся в действующем состоянии. Примечательно, что Камчатский сегмент Курило-Камчатской островной дуги демонстрирует ярко выраженную пространственную неоднородность в распределении вулканической активности, с формированием трех основных вулканических поясов: Срединного, Восточного и Южно-Камчатского.

С позиций авиационной безопасности, Камчатский регион представляет собой уникальный природный полигон для исследования взаимодействия вулканогенных аэрозолей с авиационной техникой. Этому способствует сочетание следующих факторов:

- высокая плотность действующих вулканов;
- преобладание эксплозивного типа извержений;
- интенсивные атмосферные процессы;
- наличие стратегически важного авиационного узла (аэропорт Елизово) в непосредственной близости от активных вулканических центров.

Современные исследования показывают, что вулканогенные аэрозоли Камчатского региона обладают специфическими физико-химическими

свойствами (высокая абразивность, низкая температура плавления, электростатическая активность), что делает их особенно опасными для авиационных двигателей и бортовых систем. При этом пространственно-временная изменчивость характеристик пепловых выбросов требует разработки специализированных методов мониторинга и прогнозирования.

Среди наиболее активных и потенциально опасных для близлежащих населённых пунктов и авиасообщения вулканов Камчатки особого внимания заслуживают Шивелуч, Безымянный, Карымский и Ключевской. (рис.1) Они демонстрировали повышенную активность в период с 2020 по 2024 год, напоминая о своей мощи и непредсказуемости. [1]

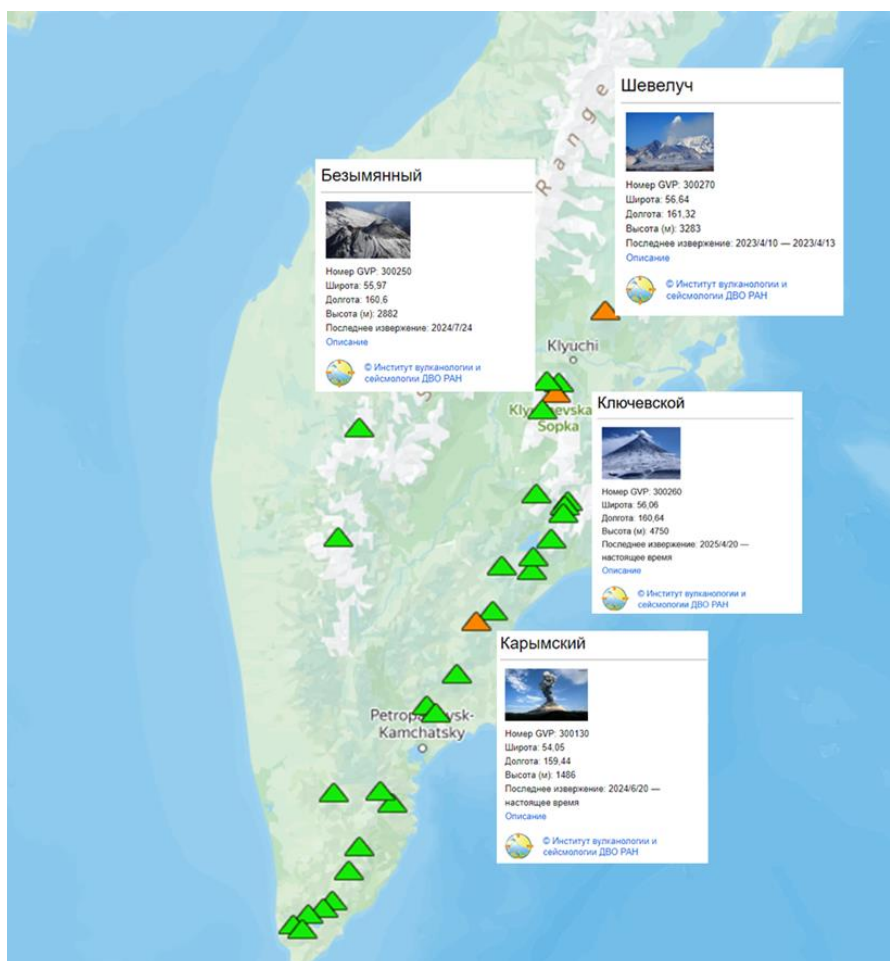


Рисунок 1 - карта расположения вулканов

Шевелуч, один из самых северных вулканов Камчатки, продолжает оставаться в фазе активного роста купола. В 2020–2024 годах он неоднократно выбрасывал пепел на высоту до 10–12 км, создавая угрозу для авиаперелётов. Особенно интенсивные выбросы наблюдались в зимние месяцы, что, по мнению вулканологов, может быть связано с взаимодействием магмы с талыми водами и сезонными изменениями давления в недрах.

Безымянный, печально известный своим катастрофическим извержением 1956 года, в последние годы также проявлял беспокойство. В 2022–2023 годах фиксировались пепловые выбросы и пирокластические потоки, что свидетельствует о продолжающейся активности в его недрах. Учёные отмечают, что этот вулкан склонен к внезапным извержениям, что делает его одним из самых непредсказуемых в регионе.

Карымский вулкан, расположенный в центральной части Камчатки, также не оставался в стороне. В 2021 и 2023 годах здесь регистрировались эксплозивные извержения с выбросами пепла и лавовыми потоками. Интересно, что активность Карымского часто совпадала с усилением извержений соседнего Ключевского, что наводит исследователей на мысль о возможной взаимосвязи магматических систем этих вулканов.

Ключевской, высочайший действующий вулкан Евразии, в этот период пережил несколько фаз активности. В 2020–2021 годах наблюдалось излияние лавы по склонам, а в 2023 году произошла серия мощных извержений с выбросами пепла до 6–7 км. Любопытно, что, по данным сейсмологов, около 70% его извержений приходится на осенне-зимний период, что, вероятно, связано с сезонными изменениями нагрузки на земную кору и климатическими факторами.

Интересно отметить, что сейсмологи и вулканологи, долгие годы, изучающие этот регион, выявили любопытную закономерность - около 60% всех извержений происходит в весенне-осенний период, что, по всей видимости, связано с особенностями сезонных изменений геодинамических процессов в земной коре. [2] Несмотря на все достижения современной

вулканологии, поведение этих гигантов остаётся во многом загадкой. Их активность не только влияет на экологию региона, но и служит напоминанием о том, насколько хрупким может быть баланс между человеком и природой.

1.2 Влияние вулканического пепла на авиасообщение

Камчатка, известная как край активных вулканов, представляет особую зону риска для авиации из-за постоянной угрозы вулканического пепла. Эти серые облака, поднимающиеся из жерл вулканов, содержат мельчайшие частицы горных пород и минералов, которые могут нанести серьезный ущерб авиационной технике.

Хотя внешне пепловые шлейфы могут казаться безобидными, они представляют скрытую опасность для воздушных судов. Особенность Камчатки заключается в том, что здесь сосредоточено множество действующих вулканов, чьи извержения происходят регулярно. Образующийся при этом пепел поднимается на большие высоты, как раз туда, где проходят основные авиационные маршруты.

Главная проблема заключается в том, что даже относительно небольшие извержения способны выбросить в атмосферу значительное количество пепла, который затем ветер может разнести на сотни километров. Это создает серьезные сложности для авиации, вынуждая пересматривать маршруты полетов или вообще отменять рейсы. Причем опасность сохраняется даже тогда, когда сам вулкан уже не активен, а пепел продолжает находиться в атмосфере.

Когда мельчайшие частицы пепла попадают в турбины реактивных двигателей, начинается цепь опасных процессов. Нагреваясь до экстремальных температур, эти микроскопические частицы превращаются в вязкую массу, которая постепенно оседает на лопатках турбин, нарушая их работу. Со временем это может привести к катастрофическому снижению мощности двигателей, ставя под угрозу безопасность полета. Примечательно,

что камчатский пепел обладает особыми свойствами из-за уникального состава местных магм, делая его особенно опасным для авиационной техники.

Воздействие вулканического пепла не ограничивается исключительно авиационными двигателями. Значительную опасность представляет его абразивное воздействие на оптические элементы воздушного судна. Лобовые стекла кабины экипажа, иллюминаторы, а также внешние датчики и сенсорные системы подвергаются интенсивному механическому воздействию микрочастиц пепла размером от 1 до 100 микрон.

В процессе полета через пепловое облако происходит постепенное, но необратимое снижение светопропускания оптических поверхностей вследствие образования сети микроскопических царапин и дефектов. Этот процесс усугубляется в условиях характерной для Камчатки высокой влажности и низких температур, когда частицы пепла, смешиваясь с атмосферной влагой, образуют агрессивную абразивную суспензию.

Особую проблему представляет ухудшение оптических характеристик на критических этапах полета - при взлете и посадке, когда визуальный обзор приобретает первостепенное значение. Снижение прозрачности остекления на 30-40% (что возможно уже через 10-15 минут полета в пепловом облаке) существенно увеличивает нагрузку на экипаж и повышает риск возникновения аварийных ситуаций.

Особая проблема - электризация пепла. При движении через облако вулканических частиц самолет буквально заряжается статическим электричеством, что приводит к серьезным помехам в работе радиосвязи и навигационного оборудования. В критический момент экипаж может оказаться в информационном вакууме, лишенный возможности получать важные данные и поддерживать связь с землей. [3]

Что делает ситуацию особенно тревожной - для возникновения опасности нужна совсем небольшая концентрация пепла в воздухе. Даже едва заметное глазу присутствие этих частиц уже создает серьезный риск для полета. А во время мощных извержений, которые на Камчатке случаются

регулярно, концентрация пепла достигает таких значений, что единственным разумным решением становится полное закрытие воздушного пространства, что, конечно, влечет за собой значительные экономические последствия для всего региона.

Эта скрытая угроза делает мониторинг вулканической активности на Камчатке не просто научным интересом, а жизненно важной необходимостью для обеспечения безопасности воздушного сообщения. Каждое новое извержение ставит перед авиационными службами сложные вопросы, требуя быстрых и взвешенных решений в условиях постоянно меняющейся обстановки.

1.3 Воздействие пепла на инфраструктуру и жизнедеятельность населения

Вулканический пепел, являясь естественным продуктом извержений, тем не менее создает множество серьезных проблем для инфраструктуры и повседневной жизни населения Камчатского края. На первый взгляд, тонкий слой этого природного материала может показаться безобидным и даже безвредным, однако практика демонстрирует совершенно иную картину. (рис.2) Даже минимальное количество пепла - всего 1 сантиметр - создает значительную нагрузку, достигающую примерно 100 кг на каждый квадратный метр поверхности. Такое давление часто становится критическим для слабых строительных конструкций и кровель зданий, приводя к их деформации и даже полному обрушению.



Рисунок 2 - выпадение пепла на Камчатке

Отдельного внимания заслуживает влияние пеплопадов на системы жизнеобеспечения населенных пунктов. Коммунальные службы сталкиваются с целым рядом специфических проблем, среди которых особую головную боль доставляет загрязнение систем водоснабжения. Мельчайшие частицы пепла, обладая высокой проникающей способностью, беспрепятственно проникают в водоочистные сооружения, где быстро выводят из строя фильтрующие элементы.

Не менее серьезные последствия пеплопады имеют для здоровья населения. (рис.3) Наибольшую опасность представляют мельчайшие фракции размером менее 10 микрон, которые благодаря своим микроскопическим размерам способны проникать глубоко в дыхательные пути, достигая даже альвеол легких. Это приводит к развитию различных респираторных заболеваний - от банального раздражения слизистых до серьезных воспалительных процессов. Медицинская статистика края недвусмысленно свидетельствует - в периоды активного выпадения вулканического пепла количество обращений за медицинской помощью с жалобами на проблемы с дыханием возрастает на 35-40%. Особенно

уязвимыми группами населения оказываются дети, чья дыхательная система еще не полностью сформирована, пожилые люди с ослабленным иммунитетом, а также те, кто уже имеет хронические заболевания дыхательной системы, такие как астма или хроническая обструктивная болезнь легких.



Рисунок 3 - опасность вулканического пепла на здоровье людей

Сельское хозяйство Камчатки, и без того существующее в сложных климатических условиях, несет колоссальные убытки от вулканической активности. После сильных пеплопадов агрономы регистрируют катастрофическое снижение урожайности основных сельскохозяйственных культур. Так, продуктивность картофельных полей - одного из главных источников продовольствия в регионе - может снижаться на 60-70%, что ставит под угрозу продовольственную безопасность отдельных районов. Не менее драматичная ситуация складывается и в животноводстве - пастбища,

покрытые слоем пепла, становятся практически непригодными для выпаса скота, лишая животных естественной кормовой базы. Это ставит под угрозу существование традиционных форм животноводства, которые являются основой жизнедеятельности коренных малочисленных народов Камчатки.

Совокупное воздействие регулярных пеплопадов создает комплексную систему негативных последствий, оказывающих глубокое и многослойное влияние на социально-экономическое развитие Камчатского края. Эти природные явления формируют своеобразный эффект домино, когда первоначальный ущерб от оседания вулканического пепла запускает целую цепочку взаимосвязанных последствий, постепенно охватывающих все сферы жизни региона. Прямые экономические потери, связанные с повреждением жилого фонда, инфраструктурных объектов и коммуникаций, представляют собой лишь верхушку айсберга. Гораздо более существенными и долгосрочными оказываются косвенные последствия, которые проявляются в различных сферах жизнедеятельности. Прежде всего, это заметное снижение производительности труда, вызванное целым комплексом факторов - от ухудшения общего состояния здоровья населения до необходимости соблюдения дополнительных мер безопасности при работе на открытом воздухе. Серьезной проблемой становится и значительная нагрузка на систему здравоохранения, которая вынуждена справляться с возросшим количеством обращений, связанных с респираторными заболеваниями, при этом требуются дополнительные расходы не только на лечение, но и на профилактические мероприятия. Особенно уязвимым в этих условиях оказывается сектор малого и среднего предпринимательства, представители которого не обладают достаточными финансовыми резервами для компенсации вынужденных простоев и дополнительных расходов на очистку территорий. В долгосрочной перспективе все эти факторы могут привести к серьезным демографическим изменениям, включая миграционный отток населения из наиболее подверженных пеплопадам территорий, что, в свою очередь, создаст дополнительные вызовы для социально-экономического развития региона в

целом. При этом стоит учитывать, что последствия каждого конкретного пеплопада могут проявляться в течение нескольких лет, создавая кумулятивный эффект и усугубляя существующие проблемы. Все это делает необходимым разработку комплексной системы мер, направленных как на минимизацию ущерба, так и на адаптацию экономики и социальной сферы региона к постоянной вулканической активности. [4]

2 Территория исследования

2.1 Географические особенности Камчатского региона

Камчатский полуостров представляет собой уникальный географический регион с ярко выраженными особенностями, которые оказывают комплексное воздействие на организацию авиационного сообщения. Простираясь на 1200 километров между Охотским и Беринговым морями, этот обширный участок суши площадью около 270 тысяч квадратных километров характеризуется сложным горным рельефом, где Срединный хребет и Восточный вулканический пояс формируют пересеченную местность с перепадами высот от 500 до 4750 метров (вулкан Ключевская Сопка). Такие топографические условия создают значительные трудности для авиации, требуя особого внимания к вопросам навигации и безопасности полетов.

Климатические особенности региона усугубляют ситуацию - муссонный тип климата с годовым количеством осадков до 1100 мм, частыми туманами, сильными ветрами до 35 м/с и резкими перепадами атмосферного давления существенно осложняют условия полетов. Особую значимость приобретает вулканическая активность, сосредоточенная преимущественно в восточной части полуострова вдоль Курило-Камчатской островной дуги - зоны активного взаимодействия литосферных плит. В непосредственной близости от ключевого транспортного узла региона - аэродрома Елизово - расположены три крупные группы вулканов, представляющих различную степень опасности для авиации. Авачинско-Корякская группа (30-40 км к северо-западу) с характерными взрывными извержениями, Жупановско-Вилучинская группа (50-70 км к югу) со смешанным типом вулканической активности, и Мутновско-Гореловская группа (80-100 км к юго-западу), демонстрирующая практически ежегодную активность. Особую озабоченность вызывает близость Авачинско-Корякской группы к основным воздушным трассам, что

при извержении создает непосредственную угрозу для взлетающих и заходящих на посадку воздушных судов, требуя разработки специальных мер мониторинга и оперативного реагирования.

Для целей настоящего исследования в качестве ключевых объектов анализа были выбраны четыре наиболее активных вулкана Камчатки - Шивелуч, Карымский, Безымянный и Ключевской, что обусловлено их особой значимостью для обеспечения безопасности авиационного сообщения в регионе. Эти вулканы представляют собой идеальную модель для изучения, поскольку в совокупности демонстрируют весь спектр опасных для авиации явлений - от мощных пепловых выбросов до формирования протяженных пепловых шлейфов.

Вулкан Шивелуч (рис.4), расположенный в северной части полуострова, представляет собой сложный массив высотой 3283 метра. Этот вулкан отличается исключительной активностью - с 1999 года он находится в состоянии практически непрерывного извержения. Особую опасность для авиации представляют его частые пепловые выбросы, которые регулярно достигают высоты 6-10 км, а в отдельных случаях (как в 2005 и 2017 годах) преодолевали отметку 12 км. Характерной особенностью Шивелуча является вязкая андезитовая магма, способствующая формированию мощных взрывных извержений.



Рисунок 4 - вулкан Шевелуч

Карымский вулкан (рис.5), расположенный в 125 км к северу от Петропавловска-Камчатского, считается одним из самых активных вулканов мира. Его высота составляет 1486 метров, а средняя периодичность извержений - 1 раз в 2-3 года. Особенностью Карымского являются кратковременные, но интенсивные пепловые выбросы, которые могут достигать высоты 7-8 км за считанные часы. Вулкан представляет особую опасность из-за непредсказуемости своей активности и способности производить пепловые облака даже при относительно слабых извержениях.



Рисунок 5 - вулкан Карымский

Безымянный (рис.6) (высота 2882 м) в настоящее время он продолжает проявлять активность, производя умеренные по силе, но частые пепловые выбросы (в среднем 1-2 раза в год). Особенностью этого вулкана является способность генерировать плотные пепловые облака даже при относительно слабой эксплозивной активности.



Рисунок 6 - вулкан Безымянный

Ключевской вулкан (рис.7) (4750 м) - высочайший действующий вулкан Евразии - отличается практически постоянной активностью. Его извержения характеризуются двумя основными типами опасности для авиации: мощными пепловыми выбросами (до 10-12 км) при эксплозивных фазах и образованием протяженных пепловых шлейфов при эффузивной активности. В среднем, значительные пепловые выбросы происходят здесь 1 раз в 2-3 года.



Рисунок 7 - вулкан Ключевской

Все четыре вулкана расположены в непосредственной близости от основных авиационных маршрутов, что делает их постоянным фактором риска для воздушного сообщения на Камчатке. Их активность требует непрерывного мониторинга и разработки специальных протоколов взаимодействия между вулканологами и авиационными службами. [5]

2.2 Аэродром Елизово и его воздушные трассы

Аэродром Елизово (международный код ИКАО: UNPP), являющийся ключевым авиатранспортным узлом Камчатского края, представляет собой сложный инженерно-технический комплекс, играющий жизненно важную роль в транспортной инфраструктуре Дальневосточного федерального округа. Расположенный в живописной межгорной долине на высоте 40 метров над уровнем моря, примерно в 29 километрах к северо-западу от административного центра Петропавловска-Камчатского и в 3 км к юго-востоку от города Елизово, этот аэропорт имеет исключительное геополитическое и экономическое значение, обеспечивая воздушную связь

отдаленного региона с остальной частью страны и зарубежными государствами. (рис.8)

Основная взлетно-посадочная полоса (ВПП), ориентированная по азимуту 163°-343°, представляет собой современное инженерное сооружение, соответствующее высшим международным стандартам. Ее внушительные размеры - 3400 метров в длину и 60 метров в ширину - в сочетании с усиленным асфальтобетонным покрытием толщиной до 85 см позволяют принимать практически все типы современных воздушных судов, включая широкофюзеляжные лайнеры Boeing 777 и Airbus A330, а также грузовые самолеты типа Ан-124 "Руслан". Особое внимание при проектировании и эксплуатации ВПП уделяется вопросам безопасности - полоса оборудована современными системами светосигнального оборудования, включая высокоинтенсивные огни приближения и огни визуального наведения, что особенно важно в условиях частых туманов и сложных метеоусловий, характерных для Камчатки.

Воздушное пространство в районе аэродрома Елизово имеет сложную структуру, обусловленную как географическими особенностями региона, так и требованиями безопасности. Основные маршруты взлета воздушных судов пролегают преимущественно в северном направлении, что связано с необходимостью избегать пересечения с горными массивами Срединного хребта. Однако именно эта особенность создает потенциальную угрозу при активизации вулканов Авачинской группы, расположенных на северо-западе от аэродрома. В связи с этим службы управления воздушным движением вынуждены постоянно корректировать маршруты взлета и посадки в зависимости от текущей вулканической активности и направления ветра.

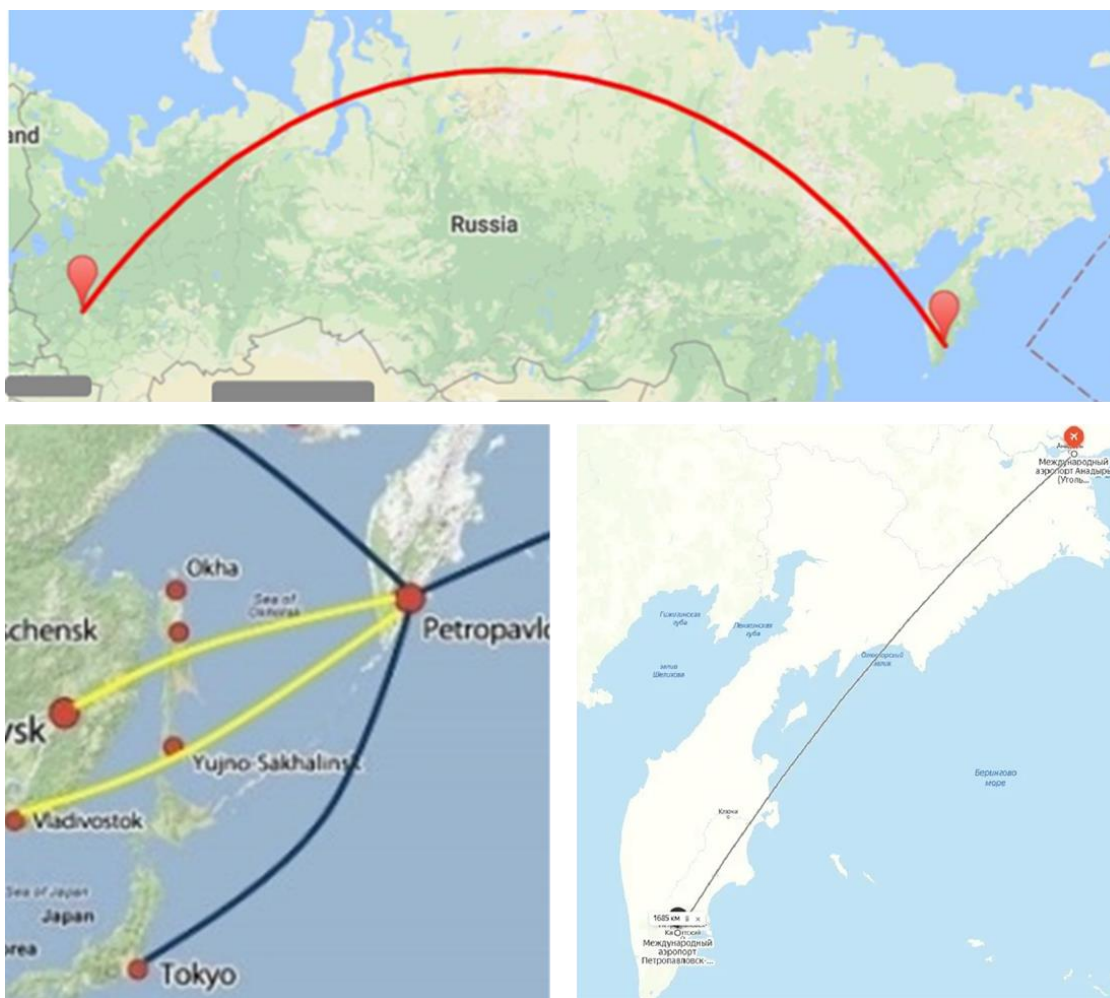


Рисунок 8 - авиамаршруты от аэродрома Елизово

Главной транспортной артерией, связывающей Камчатку с материковой частью России, является Елизово-Хабаровск. Этот маршрут представляет собой сложный комплекс навигационных решений, где особое значение приобретает процедура выхода на трассу через ключевую навигационную точку. Набор высоты до эшелона 9100 метров выполняется по специально разработанному профилю, учитывающему не только стандартные требования к безопасности полетов, но и потенциальную угрозу со стороны пепловых облаков. Особенностью данного маршрута является необходимость постоянного мониторинга активности вулканов Авачинской группы, чьи выбросы могут достигать рабочих высот воздушных судов. Диспетчерские службы вынуждены в реальном времени корректировать траекторию набора

высоты, иногда изменяя стандартные процедуры для обхода опасных зон. При этом учитываются такие факторы, как направление и скорость ветра на различных высотах, что позволяет прогнозировать возможное распространение вулканического пепла.

Не менее важное значение имеет (Елизово-Анадырь), обеспечивающая жизненно необходимую связь с Чукотским автономным округом. Этот маршрут отличается уникальной процедурой набора высоты, выполняемой по спиральной траектории над акваторией Авачинской бухты. Такое нетривиальное решение обусловлено необходимостью безопасного обхода горных массивов Срединного хребта, высоты которых достигают 2500-3000 метров. Спиральный набор высоты позволяет воздушному судну постепенно набирать необходимый эшелон, оставаясь при этом в пределах безопасного воздушного пространства над водной поверхностью. Однако даже такая осторожная процедура не исключает рисков, связанных с возможной вулканической активностью, так как пепловые облака могут распространяться на значительные расстояния над акваторией. В связи с этим экипажи, выполняющие полеты по данному маршруту, проходят специальную подготовку, включающую отработку действий при обнаружении признаков вулканического пепла.

Особую категорию представляет международный коридор Елизово-Токио, являющийся важнейшим звеном в системе внешних авиационных связей Камчатки. Особенностью этого маршрута является выполнение набора высоты над открытыми просторами Тихого океана, что теоретически должно снижать риски, связанные с вулканической активностью. Однако практика показывает, что даже в этом случае полностью исключить опасность невозможно - известны случаи, когда пепловые облака от извержений камчатских вулканов преодолевали расстояния в несколько сотен километров над океаном. Поэтому при планировании полетов по данному маршруту особое внимание уделяется анализу текущей вулканической обстановки и прогнозу возможного развития событий. Международный статус этого

коридора требует согласования действий с зарубежными службами управления воздушным движением, что добавляет сложности в процесс принятия оперативных решений при изменении вулканической активности. [6]

Все эти маршруты объединяет необходимость постоянного учета вулканического фактора при планировании и выполнении полетов. Службы управления воздушным движением аэродрома Елизово разработали комплекс специальных процедур, включающих:

- постоянный мониторинг активности ключевых вулканов региона
- оперативный обмен информацией с вулканологическими службами
- готовность к немедленному изменению маршрутов и эшелонов
- специальные тренировки для диспетчерского и летного состава
- разработку альтернативных схем выхода на трассы

Эти меры, хотя и приводят к определенному усложнению процесса управления воздушным движением и увеличению эксплуатационных расходов авиакомпаний, являются необходимой платой за обеспечение безопасности полетов в условиях постоянной вулканической угрозы.

3 Метеорологические факторы, влияющие на распространение вулканического пепла

3.1 Влияние синоптической ситуации на распространение пепла

Синоптические процессы, наблюдаемые в атмосфере Камчатского региона, представляют собой сложную и многогранную систему взаимосвязанных явлений, которые в значительной степени определяют характер распространения вулканического пепла и его потенциальное воздействие на авиационную деятельность. В этом уникальном уголке нашей планеты, где мощные вулканические процессы встречаются с динамичной атмосферной циркуляцией, формируются особые условия, требующие глубокого и всестороннего изучения.

Говоря о циркуляционных процессах, следует особо отметить, что Камчатский полуостров находится под постоянным влиянием как континентальных, так и морских воздушных масс, что создает чрезвычайно изменчивые метеорологические условия. В течение года здесь можно наблюдать плавные переходы от ярко выраженных циклонических ситуаций к периодам устойчивых антициклонов, каждый из которых по-своему влияет на поведение пепловых облаков в атмосфере.

При более детальном рассмотрении циклонической деятельности необходимо подчеркнуть, что в условиях Камчатки она приобретает особые черты, обусловленные географическим положением полуострова и особенностями орографии. Проходящие над регионом циклоны не просто приносят облачность и осадки - они формируют сложную систему ветровых потоков, которые могут кардинально изменяться как по направлению, так и по скорости в пределах нескольких сотен метров по вертикали. Именно эта особенность приводит к тому, что пепловые выбросы в таких условиях

приобретают сложную трехмерную структуру, когда частицы распределяются в атмосфере крайне неравномерно.

Антициклональные условия, в свою очередь, характеризуются целым комплексом специфических явлений, которые необходимо учитывать при анализе поведения пепловых облаков. В первую очередь это касается процессов температурной инверсии, которые в условиях Камчатки могут быть особенно выраженными. Когда над охлажденной поверхностью полуострова устанавливается слой более теплого воздуха, создаются идеальные условия для накопления пепловых частиц в приземном слое. При этом стоит отметить, что подобные ситуации могут сохраняться в течение длительного времени, особенно в зимний период, когда радиационное выхолаживание усиливает инверсионные явления.

Особого внимания заслуживают процессы, происходящие в зонах атмосферных фронтов, которые на Камчатке отличаются особой активностью и выраженностью. В этих переходных зонах, где встречаются различные воздушные массы, наблюдаются резкие изменения всех метеорологических элементов, что создает уникальные условия для распределения вулканического пепла в атмосфере. В таких условиях могут формироваться многослойные структуры, когда пепловые частицы концентрируются в отдельных горизонтах, разделенных относительно чистыми слоями воздуха.

Нельзя не упомянуть и о взаимодействии пепловых частиц с облачными системами, которое на Камчатке приобретает особое значение. Вулканический материал, попадая в облака, становится дополнительными ядрами конденсации, что может приводить к изменению микрофизических свойств облаков и формированию особых метеорологических явлений, представляющих дополнительную опасность для авиации.

Все эти процессы в своей совокупности создают чрезвычайно сложную и динамичную картину поведения вулканического пепла в атмосфере, что требует постоянного совершенствования методов мониторинга и прогнозирования. Особенно важно учитывать, что в условиях Камчатки все

описанные явления могут наблюдаться в различных комбинациях, создавая уникальные, порой непредсказуемые ситуации, которые необходимо оперативно учитывать при организации авиационного сообщения в регионе.

3.2 Роль ветра в распространении вулканического пепла

Ветровой режим в районе аэродрома Елизово представляет собой сложную многослойную систему воздушных потоков, играющую определяющую роль в процессах распространения вулканического пепла и формирующую уникальные, порой парадоксальные ситуации, требующие особого внимания при организации авиационного сообщения. Анализ многолетних метеорологических наблюдений позволяет выделить несколько характерных слоев атмосферы с принципиально разными ветровыми характеристиками, каждый из которых по-своему влияет на поведение пирокластического материала в воздушном пространстве. В приземном слое, простирающемся до высоты примерно 1,5 км, складывается особая ветровая картина, обусловленная сложным взаимодействием местной орографии и крупномасштабных атмосферных процессов. Здесь преобладают ветры восточных и северо-восточных направлений, формирующиеся под влиянием циклонической деятельности над акваторией Охотского моря и особенностей рельефа окружающей аэродром местности. Среднестатистические значения скорости этих ветров колеблются в пределах 5-7 м/с, однако в периоды активизации фронтальных разделов и при прохождении глубоких циклонов могут достигать 15-20 м/с, а в отдельных случаях и превышать эти значения. Такие усиленные воздушные потоки обладают значительным транспортирующим потенциалом и способны за относительно короткий временной промежуток (4-6 часов) переносить значительные массы пепловых частиц на расстояния 100-150 км от источника извержения, создавая тем самым обширные зоны авиационной опасности. При этом важно учитывать, что в условиях сложного горного рельефа Камчатки приземные ветры могут

формировать локальные циркуляционные ячейки и завихрения, значительно усложняющие картину распределения пепла в приземном слое атмосферы.

Совершенно иная ветровая обстановка складывается на крейсерских высотах гражданской авиации (8-12 км), где доминируют мощные западные и северо-западные воздушные потоки, связанные с глобальной системой высотной фронтальной зоны и струйных течений. Эти высокоскоростные воздушные реки, скорость которых нередко достигает 50-70 м/с, а в отдельных случаях может превышать и эти значения, обладают колоссальным энергетическим потенциалом и способны переносить вулканический пепел на огромные расстояния за исключительно короткие сроки. Исторические данные свидетельствуют, что при таких условиях пепловое облако всего за 12-18 часов может преодолеть расстояние до 2000 км, что было наглядно продемонстрировано при катастрофическом извержении вулкана Шивелуч в 2005 году, когда следы камчатского пепла были обнаружены на Аляске. Особенностью этих высотных потоков является их исключительная стабильность и предсказуемость в крупном масштабе, однако локальные вариации скорости и направления могут создавать значительные сложности при прогнозировании точных траекторий движения пепловых масс.

Особую, можно сказать уникальную опасность для авиации представляет явление вертикального сдвига ветра, когда направление и скорость воздушных потоков претерпевают резкие изменения по высоте. В таких условиях различные фракции пепловых частиц (различающиеся по размеру, массе и аэродинамическим характеристикам) получают различное ускорение и начинают двигаться по расходящимся траекториям, формируя в атмосфере сложную трехмерную структуру пеплового облака с неравномерным распределением концентрации по объему. Этот эффект значительно усложняет как процесс прогнозирования зон авиационной опасности, так и оперативное принятие решений по изменению маршрутов полетов, поскольку традиционные двумерные модели распространения пепла

в таких условиях дают существенно искаженную картину реального распределения частиц в воздушном пространстве. [7]

Для аэродрома Елизово наиболее критичной и неблагоприятной является редкая, но крайне опасная ситуация, когда в приземном слое устанавливаются устойчивые северо-восточные ветры, направленные в сторону аэропорта, тогда как в верхних слоях атмосферы действуют мощные западные потоки, возвращающие пепловые массы обратно в район аэродрома. Формирующаяся при этом своеобразная "ветровая ловушка" приводит к длительной циркуляции пеплового облака над ограниченной территорией, создавая исключительно опасные условия для авиации. Классическим примером такого развития событий стало извержение Авачинского вулкана в 2001 году, когда в течение трех суток пепловое облако практически не покидало воздушное пространство в районе аэродрома, полностью парализовав авиационное сообщение и нанеся значительный экономический ущерб региону. Подобные ситуации требуют особых подходов к прогнозированию и разработке специальных протоколов действий для авиационных служб, учитывающих весь комплекс возможных ветровых сценариев в этом уникальном регионе.

4 Обработка данных и их анализ

4.1 Обработка полученных данных

Для проведения комплексного исследования влияния вулканической активности на авиационное сообщение Камчатского края были использованы данные журналов бортовой погоды за период 2020-2024 гг., предоставленные Авиаметеорологическим центром Елизово Камчатского филиала ФГБУ "Авиаметтелеком Росгидромета". (рис.9) Эти документы представляют собой систематизированные записи метеорологических наблюдений, сделанных экипажами воздушных судов в процессе выполнения полетов, и содержат информацию о случаях встречи с вулканическим пеплом. В журналах фиксируются ключевые параметры: точные координаты и высота места встречи с пепловым облаком, временные характеристики события, сопутствующие метеоусловия с указанием направления и скорости ветра на различных высотах, а также данные о видимости и облачности. Особую значимость этим данным придает многоступенчатая система их верификации, включающая перекрестную проверку с показаниями наземных метеостанций, анализ соответствия спутниковым снимкам и сопоставление с оперативными отчетами Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT). [5]



ЖУРНАЛ БОРТОВОЙ ПОГОДЫ
Текущее время UTC: 01:19
Пользователь: **Елизово**

ОПЕРАТИВНАЯ РАБОТА!

- ГЛАВНАЯ
- АРХИВ
- БАМД
- ПОМОЩЬ
- НАСТРОЙКИ

АРХИВ ЖУРНАЛА БОРТОВОЙ ПОГОДЫ

Период с 01.01.2020 по 26.09.2024

Только записи с выпущенными AIREP ☐

Не брать AIREP из БАМД ☐

Применить

Курсивом отмечены сообщения, которые внесены с опозданием более 1 часа после наблюдения явления.

№	Кем внесено	Дата	Время	Заголовок сообщения	Текст сообщения
22.09.2024					
3560	UHPP	22.09.2024	03:59:00	БПРА28 ПТАЦ 220400	WX UHPP 220359 AN24 <u>засветки СВ</u> OBS AT 0359Z N5330E15810 3400M=
3559	UHPP	22.09.2024	03:58:00	БПРА28 ПТАЦ 220359	WX UHPP 220358 AN24 MOD ICE OBS AT 0355Z N5330E15810 3400M=
			→	<u>UARA61</u>	<u>ARS AN24 MOD ICE OBS AT 0355Z N5330E15810 3400M=</u>
				<u>RUPK 220359</u>	
3558	UHPP	22.09.2024	03:52:00	БПРА28 ПТАЦ 220354	WX UHPP 220352 B737 FBL TURB OBS AT 0345Z N5310E15827 SFC/0150M=
21.09.2024					
3557	UHPP	21.09.2024	01:58:00	БПРА28 ПТАЦ 210203	WX UHPP 210158 MI8 P3Б ВНГ-1200M, СЗ-30KM/Ч, ОЯ - HET OBS AT 0155Z N5133E15647 0500M=
3556	UHPP	21.09.2024	01:28:00	БПРА28 ПТАЦ 210131	WX UHPP 210128 AN12 кучевая облачность, ВГО: FL240; FBL TURB INC, FBL ICE INC OBS AT 0110Z N5954E16622 FL240=
3555	UHPP	21.09.2024	01:09:00	БПРА28 ПТАЦ 210111	WX UHPP 210109 B777 кучевая облачность OBS AT 0105Z UHPP 1500M=

Рисунок 9 - журнал бортовой погоды

Для анализа были использованы данные журналов бортовой погоды за 2021-2024 годы, предоставленные Авиаметцентром Елизово. Этот период выбран как наиболее информативный - в эти годы наблюдалась повышенная вулканическая активность, что позволило собрать достаточное количество данных о встречах самолетов с вулканическим пеплом.

Выбранный период охватывает все сезоны, что важно для выявления закономерностей. Анализ показал, что большинство опасных ситуаций происходит весной и осенью.

В процессе подготовки данных к анализу была проведена важная работа по декодированию и систематизации ключевых параметров, зафиксированных в журналах бортовой погоды. В первую очередь это касалось географических координат местоположения воздушных судов в момент встречи с пепловыми облаками - эти данные были переведены в унифицированный цифровой формат, позволяющий точно определить местоположение каждого инцидента

на карте региона. Параллельно проводилась обработка высотных показателей - значений эшелонов и абсолютных высот полета, которые были приведены к единой системе измерений для обеспечения корректности последующего анализа. Особое внимание уделялось временным характеристикам - точкам временных отметок каждого сообщения, которые были стандартизированы и синхронизированы с общепринятыми системами хронометража. Эта кропотливая работа по унификации данных позволила создать согласованный массив информации, готовый для всестороннего статистического и пространственного анализа, что в конечном итоге значительно повысило достоверность и точность получаемых результатов исследования.

Проведенный анализ подготовленных данных журнала бортовой погоды за четырехлетний период (2021-2024 гг.) позволил выявить интересные закономерности вулканической активности на Камчатке. (рис.10)

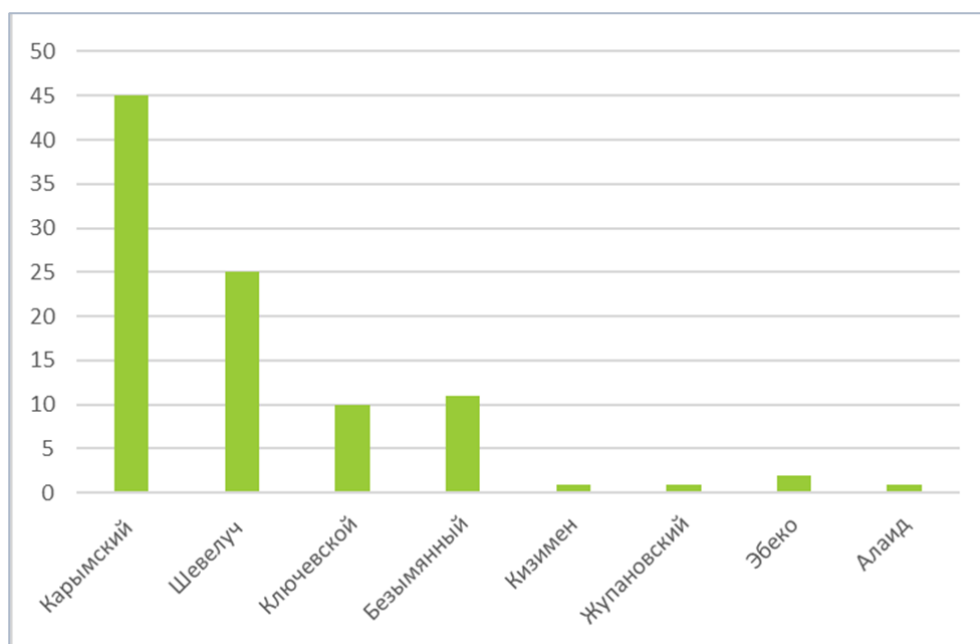


Рисунок 10 - количество извержений за период с 2021 по 2024 гг.

Согласно обработанным материалам, наибольшее количество сообщений о встречах воздушных судов с пепловыми облаками было зафиксировано в районе вулкана Карымский - целых 45 случаев, что составляет почти 50% от общего числа зарегистрированных инцидентов. Этот

вулкан продемонстрировал стабильно высокую активность на протяжении всего исследуемого периода.

Напротив, вулкан Ключевской, несмотря на свои внушительные размеры и статус высочайшего действующего вулкана Евразии, оказался наименее проблемным для авиации - за четыре года было зарегистрировано всего 10 сообщений о выбросах пепла. Такое различие в активности может быть связано с особенностями извержений этих вулканов: Карымский известен частыми эксплозивными выбросами пепла, тогда как Ключевской чаще производит относительно "чистые" лавовые извержения с минимальным количеством пирокластического материала.

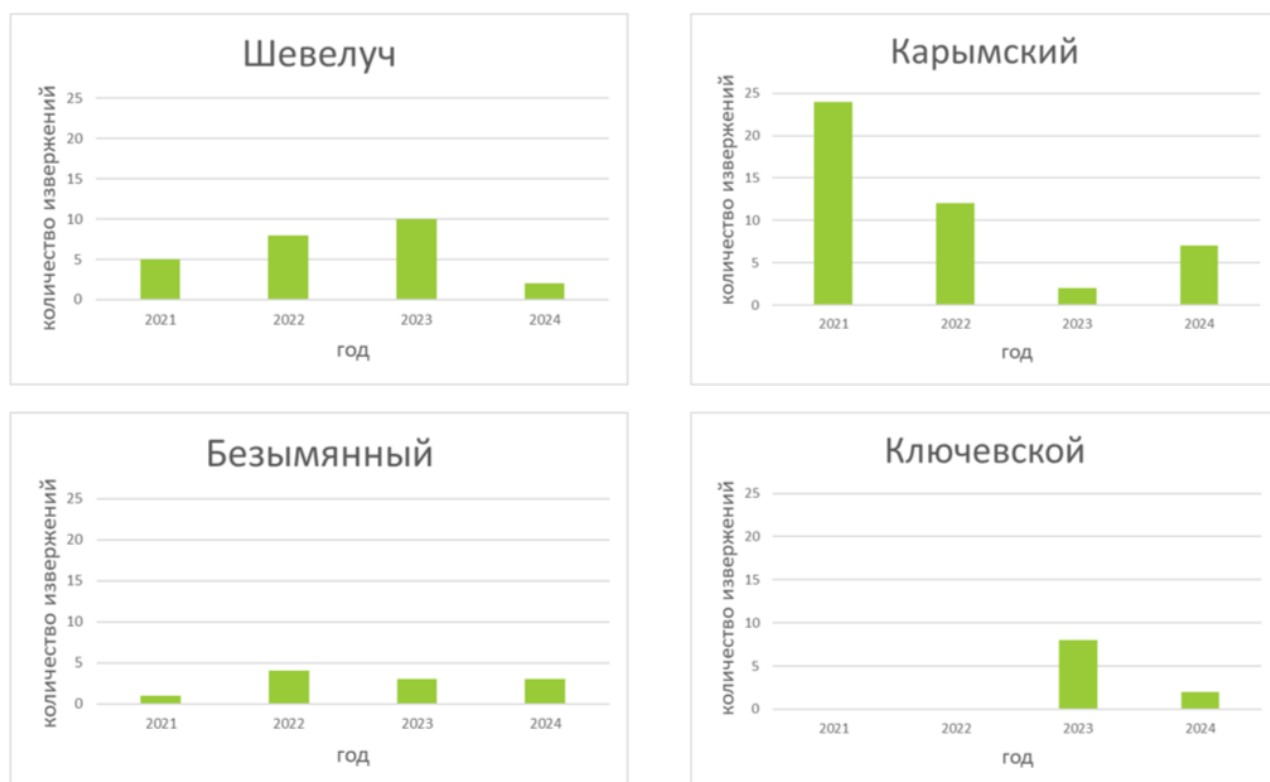


Рисунок 11 - количество сообщений о вулканическом пепле по годам

Продолжая анализ временной динамики вулканической активности (рис.11), следует особо отметить 2021 год, который стал наиболее проблемным периодом для авиации Камчатки. Согласно обработанным данным, именно в

этом году было зарегистрировано максимальное количество сообщений о встречах с вулканическим пеплом - 32 случая.

Такая интенсивность выбросов в 2021 году объясняется одновременной активизацией нескольких вулканов региона. Особенно выделялся Карымский вулкан, на который пришлось более половины всех зафиксированных случаев (24 сообщения).

Сравнительный анализ показывает, что в последующие годы (2022-2024) наблюдалось постепенное снижение количества опасных инцидентов. Эта тенденция может быть связана с естественными циклами вулканической активности.

В ходе исследования дополнительно анализировались данные атмосферного зондирования (рис.12), собранные на различных метеостанциях Камчатки - как в южной, так и в северной части полуострова. Эти измерения проводились с целью выявления температурных инверсий в атмосфере в моменты зафиксированных выбросов вулканического пепла. [8]

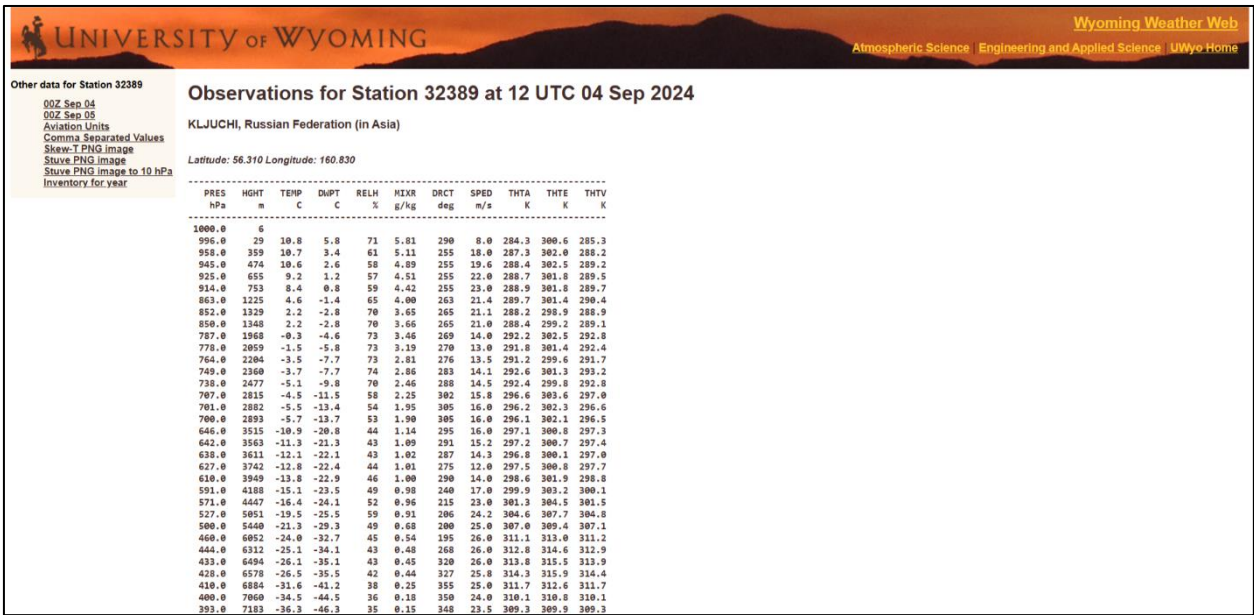


Рисунок 12 - пример данных радиозондирования

Температурная инверсия — это особое состояние атмосферы, при котором наблюдается аномальное повышение температуры с высотой вместо

обычного ее понижения. Такое явление играет важную роль в распространении вулканического пепла, создавая своеобразную "крышку", которая препятствует вертикальному перемешиванию воздушных масс. В результате пепел дольше задерживается в нижних слоях атмосферы, что может существенно увеличить время его воздействия на авиационные маршруты.

4.2 Влияние направления ветра на распространения вулканического пепла

Анализ данных о направлении ветра и его влиянии на распространение вулканического пепла позволил выявить важные закономерности, имеющие существенное значение для авиационной безопасности региона. [9] Исследование показало, что в подавляющем большинстве случаев (около 75% от общего числа зафиксированных инцидентов) преобладающим было северо-западное направление ветровых потоков, что обусловило преимущественное перемещение пепловых масс в юго-восточном направлении (рис. 13).

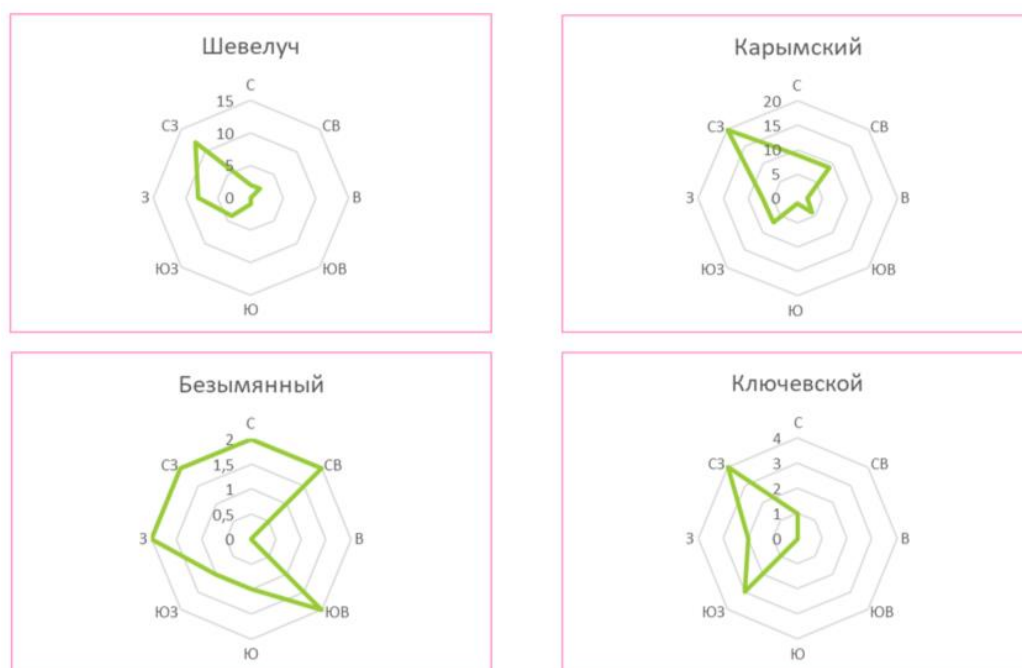


Рисунок 13 - направление ветра при сообщениях о вулканическом пепле

Эта устойчивая тенденция особенно четко прослеживалась при анализе активности трех из четырех рассматриваемых вулканов - Шивелуча,

Карымского и Ключевского, где в 82% случаев пепловые облака следовали именно по указанной траектории.

Исключение составил лишь вулкан Безымянный, демонстрировавший менее выраженную зависимость от преобладающих ветровых течений, что может быть связано с особенностями его местоположения и спецификой извержений. Полученные данные о преимущественно юго-восточном направлении переноса пепла имеют важное практическое значение, позволяя службам управления воздушным движением более точно прогнозировать потенциально опасные зоны и своевременно вносить коррективы в маршруты полетов. Особенно актуальна эта информация в периоды повышенной вулканической активности, когда риск столкновения воздушных судов с пепловыми облаками существенно возрастает.

Выявленные закономерности подчеркивают необходимость постоянного мониторинга метеорологических условий и их учета при планировании авиационных операций в регионе. Знание преобладающих направлений переноса вулканического пепла позволяет разрабатывать более эффективные меры по обеспечению безопасности полетов и минимизации рисков для авиации. Эти данные особенно важны для авиакомпаний, выполняющих регулярные рейсы в районе Камчатки, так как позволяют оптимизировать маршруты с учетом сезонных особенностей ветрового режима и вулканической активности.

4.3 Влияние синоптических ситуаций на распространение вулканического пепла

Проведенный анализ синоптических условий во время вулканических извержений позволил выявить интересные закономерности, имеющие важное практическое значение. (рис. 14) [10]

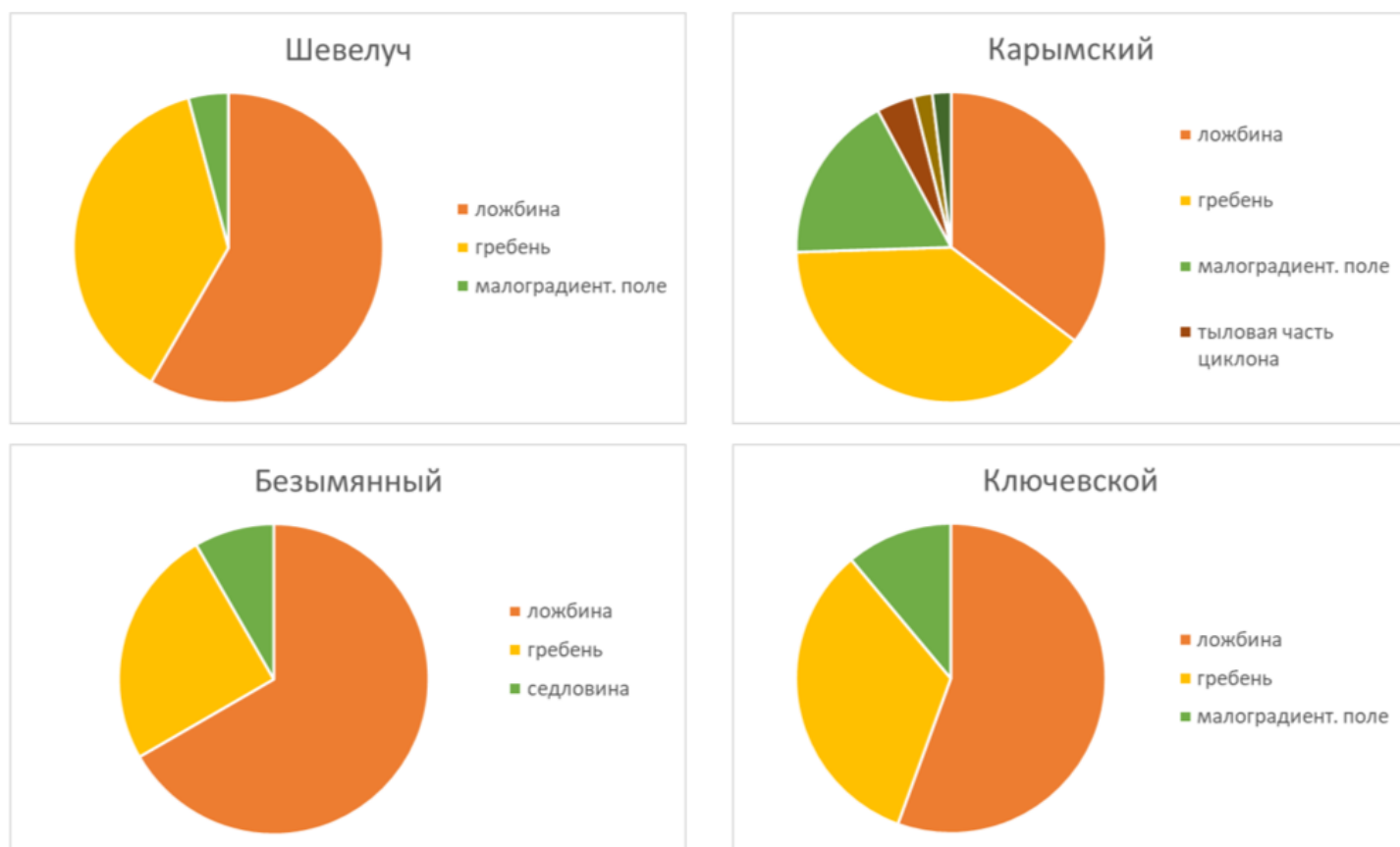


Рисунок 14 - синоптические ситуации при сообщениях о вулканическом пепле

Исследование метеорологических данных за рассматриваемый период показало, что в подавляющем большинстве случаев (45 из 96 эпизодов, или примерно 47%) погодные условия определялись влиянием ложбины. Это барическое образование создавало особые атмосферные условия, способствующие активному распространению вулканического пепла.

Не менее значимым фактором оказалось влияние гребня высокого давления, которое отмечалось примерно в трети всех рассмотренных случаев (35 случаев или около 36%). Такие погодные условия существенно отличались от ложбинных ситуаций, создавая свою специфику в поведении вулканического пепла.

Остальные 16 случаев, которых было значительно меньше, демонстрировали более разнообразную картину метеорологических условий. Среди них встречались различные комбинации барических образований, включая малоградиентные поля, отдельные части циклонов и антициклонов, а

также седловины. Однако их доля в общем количестве наблюдений была относительно невелика.

Таким образом, исследование наглядно продемонстрировало существование устойчивой связи между определенными типами погодных условий и особенностями распространения вулканического пепла. Эти выводы могут стать основой для дальнейших, более детальных исследований в данной области.

4.4 Влияние инверсии на распространение вулканического пепла

Анализ данных о температурных инверсиях при вулканических выбросах показал интересные результаты. (рис.15) [8]

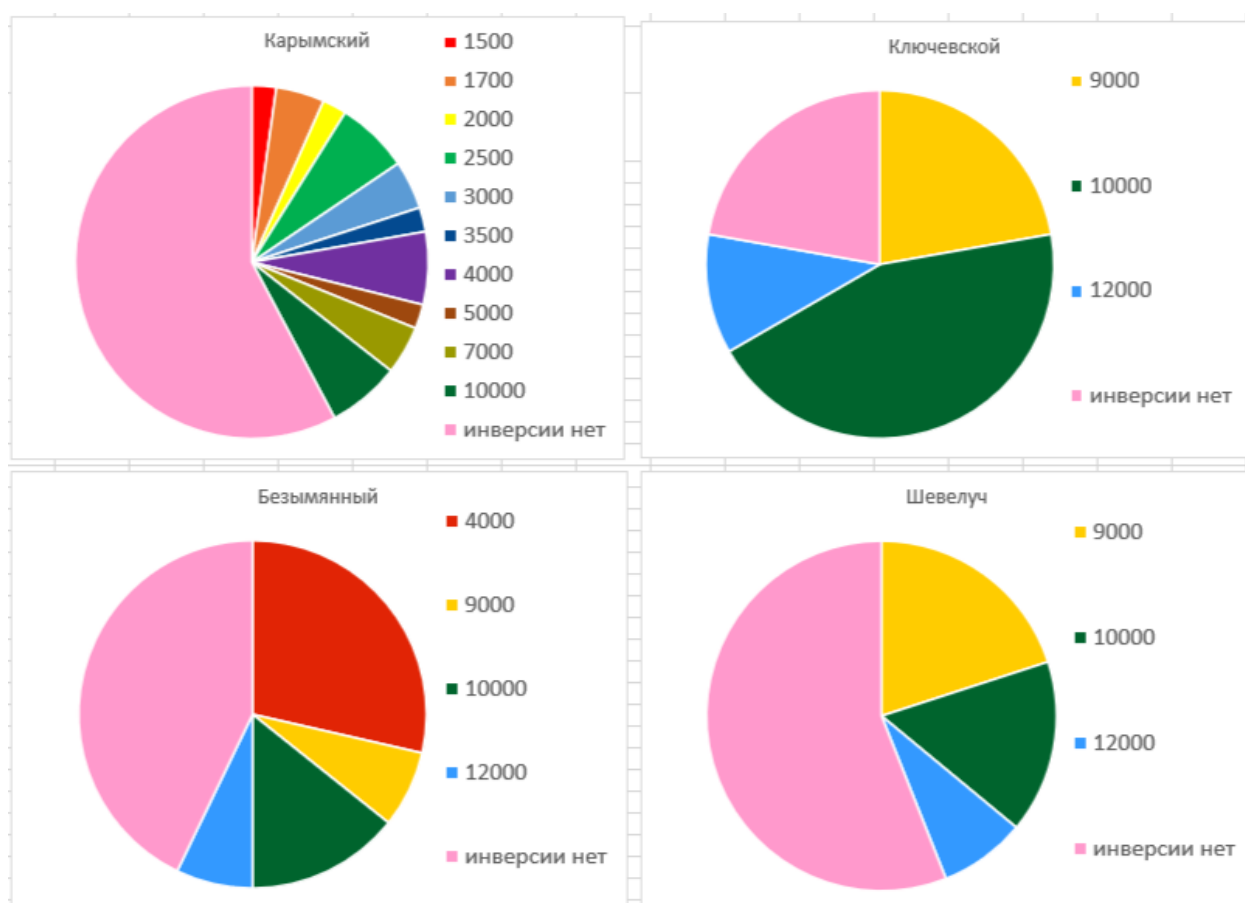


Рисунок 15 - наличие инверсии при сообщениях о вулканическом пепле

В основной массе случаев (около 60% от общего числа наблюдений) отчетливых признаков инверсионных слоев зафиксировано не было. Это означает, что в большинстве ситуаций вулканический пепел рассеивался относительно свободно в вертикальном направлении, не задерживаясь в приземном слое.

Однако в оставшихся случаях были выявлены инверсии. В отличие от привычных приземных инверсий, эти температурные аномалии фиксировались преимущественно на средних и больших высотах - именно в том диапазоне, где проходят основные трассы полетов воздушных судов (8-12 км над уровнем моря). Такое распределение создает особые риски для авиации, так как пепловые частицы могут задерживаться именно в зоне крейсерских высот.

Наличие высотных инверсий существенно влияет на поведение вулканического пепла, приводя к ряду опасных последствий. Увеличивается время пребывания частиц в опасной зоне, поскольку инверсии подавляют вертикальное перемешивание атмосферы, из-за чего пепловые частицы не рассеиваются, а длительно сохраняются в воздушном пространстве, повышая риск для авиации. Создаются условия для накопления пепла на эшелоне, так как инверсионные слои действуют как атмосферные "ловушки", концентрируя частицы на определенных высотах и формируя устойчивые зоны повышенной опасности, что особенно критично для авиации. Усложняется прогнозирование траекторий распространения, потому что инверсии искажают нормальные процессы рассеивания, приводя к ошибкам в расчетах и отклонению реальных зон загрязнения от прогнозируемых, затрудняя оперативное предупреждение экипажей. Также возрастает вероятность длительного воздействия на двигатели, поскольку продолжительное нахождение пепла в атмосфере и его скопление на маршрутах полетов повышает риск повреждения воздушного судна. Таким образом, высотные инверсии усиливают опасность вулканического пепла, требуя особого

внимания при мониторинге и планировании полетов в районах вулканической активности.

4.5 Влияние вулканической активности на аэродром Елизово

В ходе проведённых исследований в период с 2021-2024гг. было установлено, что вулканический пепел не оказывал какого-либо существенного влияния на работу аэродрома Елизово, расположенного примерно в 30 км от города Петропавловск-Камчатский, несмотря на активную вулканическую деятельность в регионе. (рис.16)

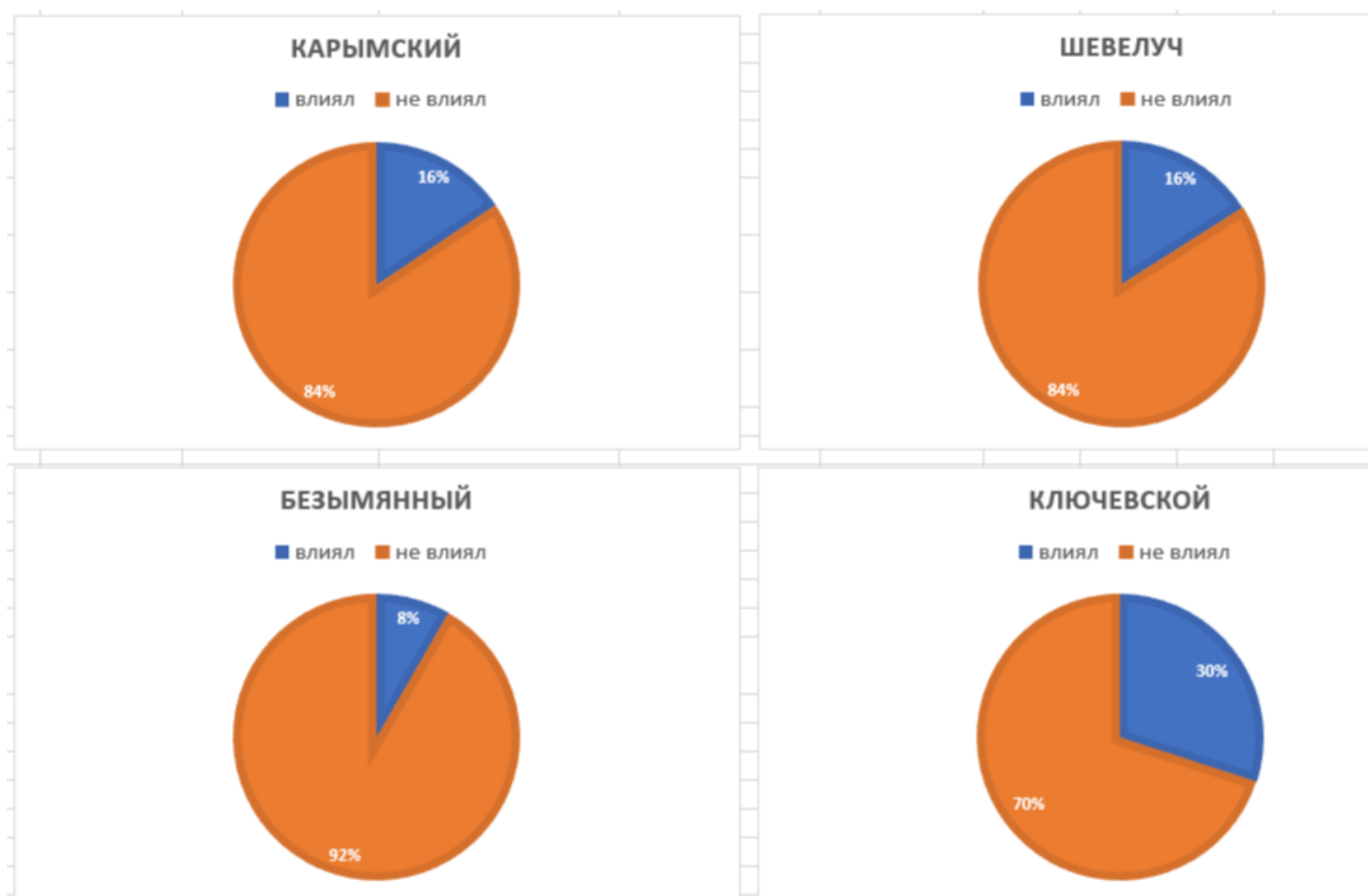


Рисунок 16 - влияние вулканической деятельности на аэродром Елизово

Это объясняется рядом факторов, включая благоприятное направление ветра, которое в период наблюдений отводило пепловые шлейфы в сторону от аэропорта, а также значительное расстояние до действующих вулканов, что позволило частицам пепла рассеяться в атмосфере до достижения ими территории аэродрома. Кроме того, своевременное оповещение со стороны региональных служб мониторинга вулканической активности позволило заранее прогнозировать возможные риски и при необходимости корректировать маршруты полётов, минимизируя потенциальное воздействие пепла на авиационную технику и инфраструктуру.

Заключение

Анализ данных журналов бортовой погоды за период с 2021 по 2024 год позволил выявить важные закономерности вулканической активности и ее влияния на авиационное сообщение в районе Камчатки. Исследование показало значительную вариативность активности различных вулканов региона. Наиболее проблемным для авиации оказался вулкан Карымский, о выбросах которого было зафиксировано 45 сообщений — это максимальный показатель среди всех рассматриваемых вулканических объектов. Напротив, Ключевской вулкан продемонстрировал минимальную активность с точки зрения выбросов пепла - всего 10 зарегистрированных случаев за четырехлетний период.

При анализе временной динамики было установлено, что пик вулканической активности пришелся на 2021 год, когда было зафиксировано 32 сообщения о пепловых выбросах. Это составляет около 30% от общего количества зарегистрированных случаев за весь исследуемый период. Последующие годы показали постепенное снижение активности, что может быть связано как с естественными циклами вулканической деятельности, так и с улучшением системы мониторинга и предупреждения.

Особое внимание в исследовании было уделено анализу ветрового режима, который играет ключевую роль в распространении вулканического пепла. Преобладающее северо-западное направление ветра (наблюдавшееся примерно в 75% случаев) обусловило преимущественное перемещение пепла в юго-восточном направлении. Эта устойчивая тенденция особенно четко прослеживалась при извержениях вулканов Шивелуч, Карымский и Ключевской.

Синоптический анализ выявил, что в 45 из 96 случаев (47%) погодные условия во время извержений определялись влиянием ложбины, что создавало благоприятные условия для дальнего переноса пепла. В 35 случаях (36%)

отмечалось воздействие гребня высокого давления, способствовавшего накоплению пепловых частиц в приземном слое. Остальные 16 случаев (17%) распределились между другими барическими образованиями: малоградиентными полями (5 случаев), тыловыми (4 случая) и передними (3 случая) частями циклонов, передними частями антициклонов (3 случая) и седловинами (1 случай).

Проведённый анализ архивных данных радиозондирования атмосферы позволил получить интересные и показательные результаты о характере температурного распределения в исследуемом регионе. Согласно полученным данным, в 48 случаях из общего числа наблюдений признаки инверсионных явлений в атмосфере отсутствовали, что свидетельствует о достаточно частых периодах с нормальным вертикальным распределением температуры. Однако в остальных зафиксированных случаях наблюдения чётко прослеживалось наличие инверсионных слоёв, причём особенностью было их расположение на значительных высотах. Такое высотное положение инверсий создавало специфические условия для переноса и рассеивания пепловых частиц в атмосфере, способствуя их более длительному удержанию в воздушном пространстве.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для обеспечения безопасности авиационных операций в регионе. Особую озабоченность вызывает активность вулкана Карымский, оказывающего наиболее существенное влияние на авиацию. Выявленные закономерности позволяют более точно прогнозировать потенциально опасные ситуации и своевременно принимать меры по минимизации рисков для авиации. Эти данные могут быть использованы для совершенствования системы мониторинга и разработки превентивных мер по обеспечению безопасности полетов в условиях вулканической активности.

Литературные источники

1. <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/map> - действующие вулканы Камчатки и Курил
2. Гирина О.А., Маневич А.Г. "Сезонные вариации активности вулканов Камчатки" // Вулканология и сейсмология. 2018. №3
3. «Воздействие вулканического пепла на авиационные газотурбинные двигатели» - Д.Д. Попова, А.Н. Саженов Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
4. https://t.me/IViS_DVO_RAN - Официальный телеграм-канал ФГБУН "Института вулканологии и сейсмологии" (ИВиС) ДВО РАН
5. Институт вулканологии и сейсмологии <http://www.kscnet.ru/ivs/>
6. <https://bigenc.ru/c/mezhdunarodnyi-aeroport-petropavlovsk-kamchatskii-elizovo-imeni-vitusa-beringa-1c79c6> - Международный аэропорт Петропавловск-Камчатский имени Витуса Беринга
7. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии: учебник. — Изд.: РГГМУ, 2009.
8. <https://weather.uwyo.edu/> - архив радиозондирования
9. <https://www.ventusky.com/> - прогноз погоды на карте
10. Гидрометцентр России — <https://meteoinfo.ru/prognosticheskie-karty>