

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Малик Наталия Александровна

**ПЕПЛЫ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ (2006-2013 гг.):
СОСТАВ, МАССА И ВОДОРАСТВОРНЫЙ КОМПЛЕКС**

**Специальность:
25.00.04 – петрология, вулканология**

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Научный руководитель
д.г.-м.н. Г.А. Карпов

Петропавловск-Камчатский
2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений.....	4
Введение.....	5
ГЛАВА 1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПЕПЛЫ И ИХ ВОДРАСТВОРИМЫЙ КОМПЛЕКС (ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ).....	12
1.1. Типы извержений и их продукты. Тефра, её общая масса и гранулометрический состав.....	12
1.2. Водорасторимый комплекс пеплов	15
1.3. Влияние вулканических пеплов на окружающую среду	24
1.4. Заключение к главе 1.....	26
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕПЛОВ И ОЦЕНКИ ИХ ИЗВЕРЖЕННОЙ МАССЫ.....	28
2.1. Особенности методики отбора и обработки свежих пеплов для приготовления и анализа водных вытяжек.....	28
2.2. Оценка массы выброшенного пепла.....	31
2.3. Методы гранулометрического анализа.....	39
2.4. Методы химического анализа жидких и твердых проб.....	40
2.5. Методы отбора вулканических газов и конденсатов.....	41
2.6. Выводы к главе 2.....	41
ГЛАВА 3. ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В 2006–2013 ГГ.: МАССА И СОСТАВ ПЕПЛОВ	44
3.1. Извержения Безымянного вулкана.....	44
3.2. Извержение вулкана Кизимен (2010–2013 гг.).....	53
3.3. Активность вулкана Шивелуч	58
3.4. Эксплозивная активность вулкана Карымский.....	61
3.5. Трещинное Толбачинское извержение (2012–2013 гг.).....	66
3.6. Краткое описание извержений других вулканов (Жупановского, Ключевского, Алайда).....	67
3.7. Петрохимические особенности пирокластики.....	69
3.8. Основные выводы к главе 3.....	78
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕПЛОВ....	80
4.1. Гранулометрический состав пеплов андезитовых вулканов.....	80
4.1.1. Пеплы извержений вулкана Безымянный в 2006, 2009, 2012 гг.....	80

4.1.2. Пеплы вулкана Кизимен (2010–2011 гг.).....	85
4.1.3. Пеплы вулкана Шивелуч.....	87
4.1.4. Пеплы вулкана Карымский	88
Гранулометрический состав пеплов вулканов Жупановский и 4.1.4. Камбальный.....	89
4.2. Гранулометрия пеплов основного состава (ТТИ-50, вулканов Ключевской и Алаид).....	90
4.3. Сравнительная характеристика гранулометрического состава пеплов.....	91
ГЛАВА 5. ВОДОРАСТВОРИМЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЕПЛОВ И ИХ ВЫНОС В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ	98
5.1. Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Безымянnyй.....	98
5.2. Водорастворимые компоненты пирокластики и постэруптивные газы извержения 2010–13 гг. вулкана Кизимен.....	104
5.3. Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Шивелуч (2006–2007, 2010, 2014–16 гг.).....	108
5.4. Вытяжки из пеплов вулкана Карымский (2007–2016 гг.).....	112
5.5. Водорастворимые компоненты пеплов вулкана Жупановский.....	113
5.6. Трещинное Толбачинское извержение: сорбированные компоненты тефры и эруптивные газы.....	113
5.7. Водорастворимый комплекс пеплов извержений других базальтовых вулканов (Алаид, Ключевской).....	117
5.8. Микрокомпонентный состав водорастворимого комплекса пеплов.....	119
5.9. Сравнительная характеристика водорастворимого комплекса пеплов и основные выводы.....	120
Заключение.....	127
Список литературы.....	132
Приложения.....	149

Список сокращений и условных обозначений

АЦ ИВиС – Аналитический центр Института вулканологии и сеймологии
БТТИ – Большое Трещинное Толбачинское извержение 1975–76 гг.

вес.% – весовые проценты

В – восток, восточный

З – запад, западный

ИВиС ДВО РАН - Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

КФ ФИЦ ЕГС РАН - Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН"

мас. % – массовые проценты

мол. % – молярные проценты

н/о – не определялся

н.п.о. – ниже порога определения

н.у.м. – над уровнем моря

ПОПП – пеплы облаков пирокластических потоков

ПП – пирокластический поток

С – север, северный

СВ – северо-восток, северо-восточный

СЗ – северо-запад, северо-западный

СП – Северный прорыв БТТИ

ср. – средний

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

ТТИ-50 – Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии 2012–13 гг.

УПП – удельная поверхность пеплов – общая поверхность частиц пепла в единице массы или объема, $\text{м}^2/\text{кг}$, м^{-1} ($\text{м}^2/\text{м}^3$)

Ю – юг, южный

ЮВ – юго-восток, юго-восточный

ЮЗ – юго-запад, юго-западный

ЮП – Южный прорыв БТТИ

L – расстояние от вулкана (км)

l – расстояние от оси пеплопада (км)

m – масса пепла, выпавшего на единицу площади в результате пеплопада ($\text{г}/\text{м}^2$)

C – содержание водорастворимых веществ в определенной массе пепла ($\text{мг}/100 \text{ г}$, $\text{г}/\text{т}$)

S – содержание водорастворимых веществ, в $\text{мг}/\text{м}^2$ удельной поверхности пепла

Σ – сумма

ρ – плотность

ВВЕДЕНИЕ

Значительный научный и практический интерес представляют извержения эксплозивного типа, сопровождающиеся выбросом в атмосферу больших объёмов тефры – фрагментов вулканических пород, выпадающих на поверхность земли из эруптивной колонны, которые могут распространяться на обширных территориях.

Выбросы больших объемов тефры наиболее характерны для извержений вулканов среднего и кислого состава, к которым относятся многие действующие вулканы Курило-Камчатского региона.

Актуальность темы. Эксплозии, поставляющие на поверхность Земли (в атмосферу, гидросферу, литосферу) гигантские массы вещества в виде пирокластики – важнейший компонент извержений вулканов. Попадая в атмосферу, наиболее мелкие фракции пирокластики (вулканический пепел – частицы <2 мм) переносятся воздушными течениями на большие расстояния, что определяет разнообразие их воздействия на среду обитания человека и природные экосистемы – от локального, обусловленного высокими концентрациями пепловых частиц в воздухе и на подстилающей поверхности земли в зонах пеплопадов, до глобального, через увеличение общего содержания атмосферной пыли, что влечет за собой изменения в радиационном балансе планеты. Масса пепла, его гранулометрический и химический состав принадлежат к числу важнейших параметров эксплозивного извержения, используемых при классификации отложений и типа извержений, исследованиях атмосферного переноса и осаждения, оценках воздействия пепла на природные экосистемы и человека. Пеплы, как наиболее доступный материал, могут представлять первичную информацию о составе изверженных пород при труднодоступности района извержения и невозможности отбора других эруптивных продуктов.

Основной движущей силой эксплозивного извержения, вызывающей фрагментацию магмы, является энергия газовой фазы. Одновременный выброс газов и пепла в атмосферу в процессе извержений приводит к захвату магматических летучих в виде водорастворимых соединений на поверхности частиц пепла. В итоге эти вещества во время пеплопадов попадают на земную поверхность.

Исследование состава сорбированных веществ на поверхности пеплов имеет важное научное и практическое значение. Непосредственный отбор вулканических газов

даже во время эффузивных извержений – опасное и сложное мероприятие. В последние десятилетия в мировой вулканологии применяются дистанционные методы исследования вулканических газов – спутниковые и наземные системы, основанные на спектроскопических методах измерения [Allard et al., 2005; Galle et al., 2010]. Однако измерения в ультрафиолетовом диапазоне (метод DOAS – Differential Optic Absorption Spectroscopy) дают ограниченную информацию (только концентрация SO_2). Измерения инфракрасными спектрометрами (FTIR – Fourier transform Infra-Red Spectrophotometer) позволяют получить информацию о концентрации воды и «кислых» компонентов газа (CO_2 , SO_2 , H_2S , HF, HCl), но они сложны в использовании и дороги. Оба типа спектрометров для вулканологических исследований в России (на Камчатке и Курильских о-вах) применяются редко. Поэтому водные вытяжки из пеплов – это один из наиболее доступных источников первичной информации о количественных соотношениях таких компонентов в газах эксплозивных извержений, как HCl, HF и SO_2 . Вариации этих отношений (S/Cl, Cl/F) для вулканических газов обычно свидетельствуют об изменении в режиме активности вулкана и могут служить её показателем [Rose, 1977; Stoiber et al., 1980, 1981; Bagnato et al., 2011]. Изучение водорастворимого комплекса пеплов также важно для оценки баланса летучих компонентов, выброшенных в ходе извержения.

Взаимодействие вещества пепла с кислыми газами и их аэрозолями в эруптивном облаке приводит к выщелачиванию из пепловых частиц петрогенных компонентов (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Si, Р и др.), многие из которых, попадая в почву, имеют фертилизационные свойства. Сорбированные из шлейфа и вытесненные из пеплов агрессивные и токсичные вещества (F, Cl, As, Fe, Al, Pb) оказывают негативное влияние на состояние окружающей среды и здоровье людей [Witham et al., 2005]. Поэтому задача оценки содержаний выше перечисленных компонентов посредством химических анализов водных вытяжек из пеплов является особенно актуальной.

Цель работы – оценка массы пеплов и выносимых ими водорастворимых веществ, поступающих в окружающую среду в результате эксплозивных извержений вулканов Камчатки, а также изучение свойств пеплов, определяющих особенности их переноса и отложения, характер извержения, влияние на окружающую среду и здоровье человека.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Оценка состояния изученности водорастворимого комплекса изверженных пеплов и их влияния на состав природных вод в районах активного вулканизма по литературным данным.
2. Выбор/разработка методики оценки массы изверженного пепла и её применение к извержениям 2006–2013 гг. с репрезентативным количеством проб.
3. Гранулометрический анализ пеплов, выявление общих закономерностей формирования гранулометрического состава пеплов для разных типов вулканов и извержений.
4. Исследование взаимосвязи между составом водорастворимого комплекса пеплов и их гранулометрическим, петрохимическим составом и типом извержения.
5. Исследование вариаций содержания водорастворимых веществ и соотношения S/Cl в вытяжках из пеплов в процессе извержения.
6. Оценка количества пеплов и растворимых компонентов, вынесенных в окружающую среду извержениями вулканов Камчатки в 2006–13 гг.

Объекты исследования – активные вулканы Камчатки и Северных Курил.

Предмет исследования – пеплы их извержений 2006–17 гг.



Рис. 1. Схема расположения объектов изучения.

Фактические материалы и личный вклад автора. В основу работы положен материал, полученный автором за время полевых исследований извержений вулканов региона активных в период 2006–17 гг. Часть проб свежевыпавшего пепла была

предоставлена сотрудниками ИВиС ДВО РАН. Наиболее полно изучен материал извержений вулканов Безымянный в 2006, 2009 и 2012 гг., Кизимен в 2010–13 гг., Шивелуч в 2006–07, 2010 гг., Карымский в 2007–11 гг., Толбачик (ТТИ-50) в 2012–13 гг. Также представлены данные по извержениям вулканов Жупановский (2013–15 гг.), Ключевской (2013, 2015 гг.), Алаид (Северные Курилы, 2012 г.), Шивелуч (2014–16 гг.), Карымский (2013–16 гг.), Камбальный 2017. Всего автором было обработано более 600 площадных (отобранных с известной площади) проб пеплов, проанализированы ~200 водных вытяжек из них, выполнено ~100 гранулометрических анализов, в т.ч. 60 – с использованием лазерного дифракционного анализатора частиц, выполнен анализ породообразующих окислов в 150 пробах пирокластики, изучены минералы на рентгеноспектральном микроанализаторе для некоторых извержений.

Научная новизна работы:

1. Впервые комплексно изучена тефра извержений вулканов Камчатки 2006–13 гг.
2. Комбинированным методом ситового анализа и лазерной дифракции определен гранулометрический состав представительного числа проб пеплов, позволивший с высокой точностью определить состав пылеватой фракции.
3. С участием автора разработана методика оценки массы изверженной тефры, а также её суммарного гранулометрического состава и распределения массы пеплового выброса по высотам в эруптивной колонне по результатам численного моделирования атмосферного переноса пепловых частиц от вулкана [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015].
4. Построены карты-схемы пеплопадов извержений вулканов, позволившие оценить геологический и геохимический эффект эксплозивного вулканизма на территории Камчатки за определенный период (2006–13 гг.).
5. Дана сравнительная характеристика состава водорастворимого комплекса пеплов разных стадий одного извержения (вулкан Кизимен), серии извержений одного вулкана (Безымянный), нескольких вулканов близкого и различного состава, разных типов извержений.

Практическая значимость. Разработанный метод оценки массы пепла и других характеристик эксплозивной активности вулканов, а также полученные результаты для конкретных извержений (схемы пепловых отложений, масса выпавшего на единицу площади пепла, количество его водорастворимых компонентов) могут использоваться

для обоснования степени вулканической опасности для населения и объектов хозяйственной деятельности. Полученные данные позволяют учитывать влияние вулканической деятельности на состояние поверхностных водоемов, в т.ч. используемых для питьевого водоснабжения, почвы, растительный и животный мир на территориях охваченных извержением.

Выполненные оценки выноса пеплов и поступающих с ними водорастворимых веществ для вулканов Камчатки, могут использоваться в экологических целях для расчетов общего выноса вулканического материала в окружающую среду.

Полученные данные о содержании в пеплах фракций вредных для здоровья (<4 и <10 мкм) могут использоваться для оценки респираторной опасности во время пеплопадов при извержениях разных вулканов.

Защищаемые положения.

1. По данным отбора площадных проб пеплов взрывных извержений вулканов Безымянный, Шивелуч, Карымский, Кизимен и ТТИ-50 в период 2006–2013 гг. установлено, что масса тефры, изверженной вулканами Камчатки за 8 лет, составила 150 ± 50 млн т среднего и кислого состава и 80 ± 10 млн т основного состава. Ежегодно вулканы Камчатки выбрасывали в атмосферу в среднем 29 млн т тефры.
2. С пеплами извержений вулканов Камчатки в 2006–13 гг. на земную поверхность ежегодно в среднем поступало более 80 тыс. т водорастворимых веществ, в том числе около 41 тыс. т SO_4^{2-} , 13 тыс. т Cl^- , 3 тыс. т F^- . Наибольший вклад внесла постоянная активность вулкана Шивелуч (не менее 45%), а также регулярные, средней силы, извержения вулкана Безымянный (~16%), мощные извержения данного периода – ТТИ-50 (~18%) и вулкана Кизимен (~16%).
3. В пеплах таких андезитовых вулканов Камчатки как Кизимен, Безымянный, Шивелуч, для извержений которых характерно формирование пирокластических потоков, выявлено высокое содержание (>40 мас.%) пылеватой фракции (<56 мкм), в том числе в ближней зоне пеплопадов. Эта особенность связана с совместным осаждением пеплов из эруптивной колонны и из облаков, сопровождающих сход пирокластических потоков, и влияет на сорбционные, минералогические, петрохимические и другие характеристики пеплов этих вулканов.
4. Количество и соотношения водорастворимых веществ вулканических пеплов зависят от состава пород вулкана, типа и стадии извержения, гранулометрического состава

пепла. Максимальные концентрации сульфат-иона и других водорастворимых веществ выявлены для пеплов фреатических извержений, а F^- и Cl^- – для пеплов основного состава. В ходе длительных извержений отмечено закономерное изменение содержаний сульфат- и хлорид-ионов и их отношений в составе водорастворимого комплекса пеплов.

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ в изданиях рекомендованных ВАК, более 19 – в материалах конференций, 2 главы в монографии. Результаты проведенных исследований докладывались на международных и российских научных конференциях: ежегодных конференциях, посвященных Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский, 2010–2016; научной конференции "Вклад России в МПГ", Сочи, 2008; 6-й Международной конференции "Вулканизм, биосфера и экологические проблемы", Майкоп-Туапсе, 2011; VII, VIII и X международных совещаниях по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (JKASP), Саппоро, 2014, Петропавловск-Камчатский, 2011, 2018.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории активного вулканизма и динамики извержений ИВиС ДВО РАН.

Результаты работы были использованы в отчетах ИВиС ДВО РАН (2009–11, 2012–16 гг.). Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ (№14-35-50453 мол_нр, 14-05-92108, 16-35-50004 мол_нр) и ДВО РАН (№ 09-III-B-09-520, №10-III-B-09-234, 11-III-B-09-226, 13-III-B-08-021, 14-III-B-08-195, 12-III-A-08-172, 15-I-2-093), РОСГИДРОМЕТа (№ 53/ГФ/Н-08 2008–10 гг.).

Структура и объем работы. Работа имеет общий объем 160 страниц, включает 54 рисунка, 23 таблицы и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (185 наименований), списка сокращений и 8 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность за обсуждение результатов, поддержку, ценные советы научному руководителю д.г.-м.н. Г.А. Карпову, заведующему лабораторией активного вулканизма и динамики извержений, академику, д.ф.-м.н. Е.И. Гордееву, сотрудникам ИВиС: к.г.-м.н. О.А. Гириной, к.г.-м.н. Н.В. Горбач, к.г.-м.н. А.П. Максимову, к.г.н. Я.Д. Муравьеву, д.г.-м.н. Т.К. Пинегиной, д.г.-м.н. Е.Г. Сидорову, д.г.-м.н. Ю.А. Тарапу, д.ф.-м.н. П.П. Фирстову; за предоставленные многочисленные образцы, отобранные непосредственно после извержений, начальнику

Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга Ю.В. Демянчуку, за участие в сборе материала в процессе совместных полевых работ сотрудникам ИВиС Т.М. Маневич, А.А. Овсянникову, А.В. Сокоренко, И.И. Тембrelу; сотрудникам АЦ ИВиС: Е.В. Карташевой, А.А. Кузьминой, С.В. Сергеевой, В.В. Дунин-Барковской, Л.Н. Гарцевой, Н.И. Чебровой, В.М. Рагулиной за выполнение химических анализов; сотруднику ИВиС А.Б. Белоусову, которым был приобретен лазерный дифракционный анализатор частиц «Analysette 22 Compact» по гранту фонда А. фон Гумбольдта. Выражаю особую признательность соавторам публикаций за обработку данных и полученные результаты: сотруднику ИФА РАН им. А.М. Обухова к.ф.-м.н. К.Б. Моисеенко, ИЭМ РАН к.г.-м.н. М.Е. Зеленскому, заведующему лабораторией вулканогенного рудообразования ИВиС к.г.-м.н. В.М. Округину.

ГЛАВА 1.

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПЕПЛЫ И ИХ ВОДОРАСТВОРНЫЙ КОМПЛЕКС (ОБЗОР
ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ)

1.1. Типы извержений и их продукты. Тефра, её общая масса и гранулометрический состав

Каталог И.И. Гущенко [1979] насчитывает на Земле 933 вулкана, из которых 609 действовали в историческое время, 72 – потенциально действующие и 252 проявляют сольфатарную активность. В работе [Encyclopedia of volcanoes, 2015, с. 242] указываются 575 вулканов с исторически документированными извержениями и 1250 извергавшихся в голоцене. В списке голоценовых вулканов GPV [Global Volcanism Program, 2013. Volcanoes of the World, v. 4.7.4] указано 1434 вулкана, из которых 869 – с датированными извержениями (до 10450 лет до н.э.).

По динамике поступления магматических продуктов на земную поверхность извержения делятся на эфузивные, экструзивные, эксплозивные и смешанные. Продукты извержений представляют собой лавы потоков и куполов, либо пирокластический материал. На современном этапе большая по объему и массе часть твердых продуктов наземных вулканических извержений представлена пирокластикой – рыхлым обломочным материалом, образующимся в результате эксплозий при фрагментации магмы/лавы [Мархинин, 1967]. Доля пирокластических продуктов (процентное содержание которых определяет коэффициент эксплозивности [Владавец, 1984]) зависит от типа извержения и состава магмы вулкана. Значения коэффициента эксплозивности минимальны для извержений гавайского типа ($\leq 10\%$) и последовательно возрастают для извержений стромболианского (50–70%) и вулканского (80–90%) типов. Максимальные значения данного коэффициента ($> 90\%$) имеют место в случае плинианских извержений. Тип извержения и особенности его продуктов зависят от двух главных факторов – вязкости магмы и содержания в ней газов. Вязкость лавы обуславливается её температурой, силикатным составом и газонасыщенностью [Мархинин, 1985]. Для вулканов, извергающих породы основного состава, характерны преимущественно эфузивные и эфузивно-эсплозивные извержения гавайского и стромболианского. Для вулканов среднего состава характерны эксплозивные,

эксплозивно-эфузивные и эксплозивно-экструзивные извержения вулканского и плинианского типов, кислого состава – экструзивные и экструзивно-эксплозивные.

В работе [Будников, 1996] рассмотрены свойства и особенности пирокластики базальтовых извержений на примере Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975–76 гг. и извержений вулкана Алайд 1972 и 1981 гг., их зависимость от динамики извержения, типа вулканизма. Инженерно-геологические особенности пирокластических отложений современных извержений андезитовых вулканов Камчатки (Безымянного и Шивелуча) исследованы в работе [Гирина, 1998]. В ней приводятся следующие генетические типы пирокластических отложений: тефры (1); пирокластических потоков (2), пирокластических волн (3), пепловых облаков пирокластических потоков (4), направленного взрыва (5). Отложения второго–четвертого типов взаимосвязаны и характерны в основном для эксплозивных извержений андезитовых вулканов.

Тефра (от греч. *téphra* пепел, зола), термин, предложенный в [Thorarinsson, 1954] – фрагменты вулканических пород, переносимых воздушными потоками; пирокластические продукты, выпадающие на поверхность земли из эруптивной колонны [Encyclopedia of Volcanoes, 2000, с. 421]. Наиболее легкие частицы тефры (<2 мм, вулканический пепел) ввиду малой скорости гравитационного осаждения находятся в атмосфере достаточно долго (от десятков минут до 2–3 месяцев, в зависимости от размеров частиц и высоты выброса) и могут распространяться на большие расстояния от эруптивного центра. Это определяет большое разнообразие условий их отложения на дневной поверхности Земли и широкий диапазон воздействия на среду обитания человека и природные экосистемы – от локального, обусловленного высокими концентрациями пепловых частиц в воздухе и на подстилающей поверхности в зонах пеплопадов, до глобального, через увеличение концентрации диоксида серы и аэрозольных частиц в верхних слоях атмосферы и возрастание общего содержания атмосферной пыли, что может повлечь за собой заметные изменения в радиационном балансе планеты. Поэтому, для конкретных извержений большое научное и практическое значение имеет вопрос о массе и гранулометрическом составе тефры, как части общей массы изверженных пород.

Масса и объем тефры принадлежат к числу важнейших характеристик извержений, используемых при оценке их динамики и физических параметров

[например, Pyle, 1989], классификации извержений (например, VEI) и степени связанной с ними опасности и воздействия на земную атмосферу (в т.ч. климатических эффектов) [Newhall, Self, 1982], оценках экологической нагрузки на природные экосистемы, расчетов темпа поступления магмы, долгосрочного прогноза активности и возможной опасности вулкана [например, Мелекесцев и др., 1994]. Показатель вулканической эксплозивности (VEI — англ. *Volcanic Explosivity Index*) — показатель силы извержения вулкана, магнитуды, основанный на оценке объёма извергнутых пирокластических продуктов (тефры) и высоте столба пепла [Newhall, Self, 1982]. Вопрос методики оценки массы тefры извержений рассмотрен в Главе 2 (п. 2.2).

Гранулометрический состав тefры используется при классификации отложений [Гирина, 1998, 2010], идентификации источника пепла (эруптивная колонна и облака ПП) [Darteville et al., 2002; Evans et al., 2009], характера извержения и механизма образования пепла [Heiken, Wohletz, 1985; Kaminski, Jaupart, 1998], исследованиях механизмов атмосферного переноса и отложения пеплового материала [Bonadonna, Philips, 2003; Моисеенко, Малик, 2015а,в], оценках опасности для здоровья населения [Darteville et al., 2002; Horwell et al., 2003; Hillman et al., 2012], анализе различных свойств пепловых частиц, в т.ч. сорбционных [Гущенко, 1965; Малик, 2011, 2016], оценках опасности для авиации [Casadevall, 1994]. При исследованиях древнего вулканизма гранулометрические параметры, наряду с мощностью отложений тefры, использовались в ряде работ с целью определения высоты эруптивной колонны, интенсивности извержений и общей массы извергнутого материала [Гущенко, 1986], реконструкции летописи эксплозивных извержений тefрохронологическим методом [Брайцева, Мелекесцев, 1989], пространственной локализации эруптивного центра [Кирьянов, 1987; Кирьянов, Рожков, 1989], исследований режимов атмосферной циркуляции в геологическом прошлом [Eaton, 1963], а также оценки скорости осадконакопления пирокластических продуктов извержений в отдельных регионах [Гущенко, 1965]. Взаимосвязанное изменение гранулометрического, химического, минералогического состава тefры по мере удаления от вулкана, происходящее в результате гравитационной эоловой дифференциации, изучено в работах [Кирьянов, 1983; Кирьянов, Соловьева, 1990]. Методы гранулометрического анализа приведены в Главе 2 (раздел 2.3).

Важность исследований тефры обосновывается А.Н. Земцовым [1986], который разработал представления об эруптивном вулканическом облаке как дисперсной системе с развитой межфазной границей магматический газ – твердое тело, и в т.ч. изучил возможности осуществления в нем процессов каталитического синтеза углеродсодержащих молекул. В связи с этим в его работе детально рассмотрены вопросы как гранулометрического состава пирокластики: определение гранулометрических параметров, общее распределение изверженного пепла по размерам частиц и оценка его удельной поверхности и доли мельчайшей фракции, так и определения её объема.

1.2. Водорастворимый комплекс пеплов

В результате эксплозивных извержений, кроме пирокластики, вулканы выбрасывают в атмосферу большое количество кислых газов (CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl , HF), часть которых сорбируется на поверхности пепловых частиц и возвращается на земную поверхность. Затем в результате вымывания талыми, дождовыми и поверхностными водами сорбированные вещества (Cl^- , F^- , SO_4^{2-}) попадают в гидросферу и почву. Вместе с ними из частиц тефры выщелачиваются петрогенные компоненты (Mg , Ca , K , Na , Al , Fe , Si , а также Cu , Mn , Sr , Ba , Zn и другие микрокомпоненты) [Bagnato et al., 2011]. Таким образом, водорастворимый комплекс пеплов – это эфемерные минералы (соли) на поверхности пепловых частиц, образованные вследствие химических реакций сорбированных эруптивных газов (SO_2 , H_2S , HCl , HF) с петрогенными компонентами (Mg , Ca , K , Na , Al , Fe , Si и др.), извлеченными из породы.

Вулканические газы выделяются также в постэруптивные и межэруптивные периоды (стационарная дегазация) по системе трещин в пределах фумарольных полей. Чистый магматический газ содержит в основном H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HF и HCl (конденсирующиеся компоненты) и Ar , He , H_2 , N_2 , CO (неконденсирующиеся газы). В эти периоды у исследователей больше возможностей для непосредственных отборов вулканических газов, хотя состав газов может быть существенно изменен.

Одно из первых упоминаний о водорастворимых веществах, адсорбированных на вулканическом пепле, было сделано A. Lacroix [1907] по поводу извержения вулкана Везувий (Италия) в 1906 г. Deger E. анализировал вытяжки из пеплов извержения вулкана Сантьяго в ноябре 1929 г. и Фуэго (Гватемала) в январе 1932 г. [Taylor, Stoiber,

1973]. Stefanson и Sigurjonsson [1957] писали о высоком содержании фтора на пепловых частицах, который был губительным для скота во время извержения Геклы в 1947–48 гг. в Исландии; аналогичная ситуация наблюдалась и в 1970 г. [Thorarinsson, Sigvaldason, 1972]. Анализы вытяжек из пеплов вулкана Иразу (Коста-Рика) в 1963–65 гг. опубликованы в 1966 г. K.J. Murata и др. [Taylor, Stoiber, 1973].

В отечественной вулканологии изучение водных вытяжек из пеплов начинается с работ Л.А. Башариной в 50-х гг. XX в. В ее статье «Водные вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного» [1958] впервые подробно исследовались водные вытяжки из пеплов извержения 1955–1956 гг. с целью определения растворимой части пепла, в которую, как она отметила, входят адсорбированные возгоны и газы извержения, а также катионы, вытесненные из породы. Указывается, что состав вытяжек зависел от расстояния, которое пролетел пепел (отмечено уменьшение концентрации веществ в вытяжке из пепла с увеличением расстояния отбора проб с 16 до 45 км от вулкана), и его механического состава (более крупнозернистый пепел адсорбирует меньшее количество веществ). В статьях [Башарина, 1958, 1960] представлены результаты анализов водных вытяжек пеплов, слагающих фумаролы агломератового потока, и воды сухих рек, сделан вывод, что при существенно сульфатном составе газов вулкана эксгаляции его первой фазы (1955 г.) содержали хлора значительно больше, чем последующие. Отношение S/Cl стало максимальным во время и непосредственно после кульминационного извержения, а в последующие годы стало снижаться за счет возрастания доли галогенных газов [Гущенко, 1965; Малышев, 2000].

По оценкам И.И. Товаровой [1958], в результате извержения вулкана Безымянный 1955–56 гг. в бассейн р. Камчатка на поверхность было вынесено около 20 млн т легкорастворимых веществ, в т.ч. 6.6 млн т – с пеплами извержения 1955 г., 3.5 – млн т с пеплами пароксизmalного взрыва 30.03.1956 г., 7.7 млн т – с материалом агломератового потока.

Изучение фумарол агломератового потока вулкана Безымянный, позволило отметить следующие моменты: адсорбция газообразных продуктов материалом потока (25 км^3) в момент взрыва, вымывание и выщелачивание метеорными водами легко- и частично труднорастворимых компонентов, питание потока сильно минерализованными водами ледника Желтого и р. Сухой Хапицы и выщелачивание ими элементов из потока, стойкость которого сильно нарушена фумарольными газами и кислыми водами в первые

месяцы существования, геохимический цикл – вынос и переотложение элементов [Борисов, 1960].

В комплексной работе, посвященной пеплам Северной Камчатки [Гущенко, 1965] подтверждается, что анионная часть водных экстрактов пеплов должна рассматриваться как сорбированная. Для выяснения генезиса катионной части, показателем которых к растворению является величина рН, которая колеблется в зависимости от содержания анионов, были проведены специально подготовленные эксперименты. Их результаты показывают приуроченность избыточных количеств металлов к поверхности пепловых частиц, формой их существования считается поверхностная пленка пеплов. На размер и состав пленки существенное влияние оказывают интенсивность, тип и стадия извержения. Её наличие характерно, в первую очередь, для андезитовых резургентных пеплов, максимальный размер – при вулкано-плинианском типе извержения. Основной компонент пленки – железо. Накопление металлов (Fe, Ti, Mg, Mn) пеплами благодаря адсорбции значительно и колеблется от 35 до 75% относительно общего их содержания.

В работе [Дубик, Меняйлов, 1969] также рассматривается анионная часть вытяжек из пеплов извержения Безымянного вулкана 1965 г. как сорбированная из эруптивной тучи, отражающая состав летучих, а про происхождение катионной части в водных вытяжках сказано, что оно не ясно, но не исключена возможность выщелачивания её водой, интенсивность которого зависит от величины рН раствора. При сравнении пеплов одного пеплопада, отобранных на расстоянии 2–39 км авторы установили, аналогично работе [Башарина, 1958], уменьшение количества ионов в вытяжках по мере удаления от вулкана, хотя заметно увеличение содержания Cl^- , F^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ начиная с расстояния 15–30 км. Различное поведение кривых, отражающих количество каждого отдельного компонента, авторы объясняют изменением минералогического состава пеплов в пробах, отобранных на различных расстояниях от вулкана: предполагается избирательная сорбция Cl^- и F^- на зернах плагиоклазов и SO_4^{2-} и HCO_3^{3-} – пироксенов и стекла. Авторы отмечают, что в стадиях вулканских взрывов и пирокластических потоков в эксгалациях Безымянного преобладают газы группы серы и отношение S/Cl выше, чем в газах, адсорбированных мелким материалом пепловых облаков ПП/раскаленных лавин, где преобладает HCl . Они объясняют это фактом, что

серы как менее растворимая в магме при поступлении ее на поверхность выделяется в первую очередь, в отличие от менее растворимых галогенводородов.

Различия в отношении S/Cl в вытяжках из заполнителей пирокластических потоков и из материала пепловых облаков потоков вулкана Безымянного объяснено различной степенью десорбции этих летучих соединений [Скрипко, 1975]. Другое объяснение можно получить из предположения [Dartevelle et al., 2005], что коингнимбритовые облака (облака ПП) потенциально более богаты водой, чем эксплозивные колонны сходной интенсивности, в результате чего HCl сорбируется более эффективно. Можно найти и другие объяснения, основанные на разной скорости окисления газов серы и галогенов и времени взаимодействия пепла с газом [Armienta et al., 2002].

Исследование водных вытяжек из пеплов извержения вулкана Алаид в 1972 г. показало зависимость сорбционных свойств пеплов от расстояния от эруптивного центра, на котором они были отобраны, и их гранулометрического состава [Будников, Малеев, 1977]. В работах, посвященных извержению этого же вулкана в 1981 г., исследуется вопрос влияния поведения компонентов эруптивных газов в процессе извержения на изменение состава водорастворимого комплекса пеплов, выявлено, что величины отношений S/Cl и Cl/F меняются в зависимости от интенсивности извержения [Флеров и др., 1982; Будников, 1996].

В работах В.А. Будникова [1979, 1996], посвященных пеплам вулкана Толбачик (БТТИ) 1975–76 гг. и их водным вытяжкам, приведены расчеты объемов и массы выброшенной пирокластики на Северном и Южном прорывах БТТИ ($9.6 \cdot 10^8$ т и $0.3 \cdot 10^8$ т, включая материал конусов), гранулометрический, петрохимический и количественно-минеральный состав пеплов, рассмотрены их сорбционные свойства, количество легкорастворимых веществ, вынесенных с тефвой обоих прорывов ($5.66 \cdot 10^5$ т и $2.2 \cdot 10^4$ т). Составы водорастворимого комплекса пеплов и вулканических газов БТТИ рассмотрены в работах [Меняйлов и др., 1978, 1979, 1980]. Для Северного прорыва отмечена взаимосвязь между концентрацией веществ в водных вытяжках из пеплов и общей поверхностью пеплов, показана зависимость содержания летучих элементов и величин их отношений в вытяжках от времени отбора пеплов, т.е. в развитии извержения – минерализация и отношения S/Cl и Cl/F закономерно увеличивались на конечных стадиях отдельных этапов извержения. На Южном прорыве удалось

одновременно с пробами эруптивных газов отобрать пеплы из эксплозивной тучи; величины отношений S/Cl и Cl/F для водных вытяжек и газов оказались близкими. Отмечен значительный рост минерализации и величины отношений S/Cl и Cl/F в вытяжках с начала к середине извержения, а затем их плавное падение к концу извержения. Для обоих прорывов посчитаны масштабы выноса вещества на пеплах в тоннах и к содержанию в породе (%), выделены наиболее подвижные элементы в процессе извержения – Cl, S, Ag и др.

При изучении продуктов извержения вулкана Горелый 1980–81 гг. [Кирсанов, Озеров, 1983], было замечено, что в ювенильном материале в 2–5 раз меньше всех водорастворимых компонентов по сравнению с резургентными. При сравнении с компонентами водных вытяжек из пеплов вулканов Ключевской и Безымянного на Горелом их количество в 10–50 раз больше. Наибольшее количество водно-растворимых веществ было отмечено в прикрaterной зоне (0–100 м), на расстоянии 1.5 км происходит уменьшение их содержаний, а в пробах, отобранных в 8.5 км от кратера опять увеличение, что, видимо, связано с ростом доли мелкой фракции в пепле. Для преимущественно резургентных пеплов подобная смена концентраций на расстоянии 0.1–8.5 км от кратера отмечена не для всех компонентов.

При извержении вулкана Чикурачки в 1986 г. (о. Парамушир, Северные Курильские о-ва) по оценкам [Овсянников, Муравьев, 1992] было выброшено ~100 млн т пирокластики и вместе с ней около 310 тыс. т водорастворимых компонентов.

Изучение водных вытяжек из пеплов извержения Авачинского вулкана в 1991 г. [Дроздин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995] показало увеличение галоидной составляющей (F^- и Cl^-) относительно сульфат-иона в процессе извержения на фоне роста общей минерализации вытяжек. Вероятная причина этого – увеличение ювенильности выбрасываемых продуктов – начальные эксплозии (13 января) носили фреатомагматический характер и выносили обогащенный серой материал вулканической постройки, материал последующих выбросов был ювенильным. Также следует отметить значительное содержание водорастворимых веществ в пеплах извержения Авачинского вулкана 1991 г. по сравнению с другими вулканами.

Химический состав водной вытяжки из пепла вулкана Шивелуч (извержение 1993 г.) и суммарное количество химических элементов, сорбированных на пепле и вынесенных в окружающую среду (24 тыс. т) даны в работе [Хубуная и др., 1995].

Указано, что величины отношений компонентов в водных вытяжках из пеплов ($S/Cl=3.4$; $F/Cl=0.003$; $K/Na=0.28$; $Ca/Mg=9.8$) сходны с таковыми извержения Шивелуча 1964 г., что, вероятно, свидетельствует о том, что качественный состав эруптивных газов не изменился.

Водные вытяжки из пеплов 1966 г. вулкана Ключевской представлены в работе И.Т. Кирсанова [1968]. Так как не описана методика их приготовления и нет пересчетов количества водорастворимых компонентов на единицу массы пепла, по этим данным можно судить только об отношении веществ в вытяжке: среди анионов в пробах вершинного кратера преобладает сульфат-, в пробах прорыва в первые дни хлорид-, затем сульфат-ион.

Количество водорастворимых компонентов пеплов вулкана Карымский, приведенное в работе [Иванов, 1970] для выбросов 1962–63 гг. и [Дубик и др., 1972] для эксплозий 1970 г., настолько мало, что единственной объяснение этому то, что пеплы были промыты до их отбора и приготовления вытяжек. Краткие сведения о составе вытяжек из пеплов вулкана Карымский приведены в работах: [Андреев, Николаева, 2008] для активности 2007 г., [Лупикина, Карпов, 2008] для пеплов 2003–07 гг.

В зарубежной литературе в 1973 г. были высказаны первые предположения об источнике растворимого материала в пеплах Центральноамериканских вулканах [Taylor, Stoiber, 1973]. Они показали, что преобладающим источником вымываемого материала должны быть газы, осаждающиеся на поверхности частиц. Открытия этой и последующих работ [например, Rose, 1977] показали, что анализ материала сорбированного на пеплах, дает информацию о составе летучих эруптивного шлейфа, так же как и о воздействии на окружающую среду. В этой работе также впервые оценена доля сорбированных газов на основании изучения расплавных включений в фенокристаллах и вытяжек из пепла; вычисление бюджета летучих показало, что 17% HCl и 30–35% S были изъяты из выбросов в атмосферу [Rose, 1977; Varekamp et al., 1984]. Авторы этих и др. работ [Nogami et al., 2001] приходят к выводу, что изменения в отношении S/Cl в вытяжках из пепла отражают соответствующие изменения в эруптивных газах, что предположительно является показателем вулканической активности [Меняйлов, 1976]. Показано также, что водорастворимые вещества аккумулируются на внешней поверхности частиц в виде солей: $CaSO_4$, $NaCl$, Na_2SO_4 ; а

K, F, Mg, Mn, Zn, Cu, Ba, Se присутствуют в виде микро составляющих в сульфатных и галитных минералах и/или в виде следовых минералов.

На примере извержения вулкана Гекла (Исландия) в 1970 г. показано весовое распределение растворимого фтора на территории пеплопада, рассмотрены определяющие его факторы – формирование гранулометрического состава пепловых отложений, процессы образования солей, адсорбции, конденсации в эруптивной колонне и шлейфе [Oskarsson, 1980]. Впервые описанные эксперименты по взаимодействию газов и тефры показали его максимальную эффективность для HF при температурах 300–700°C, количественную зависимость от площади поверхности частиц. Анализ методами сканирующей электронной микроскопии и рентгено-флуоресцентной спектрометрии показал, что водорастворимый фтор химически адсорбирован на поверхности частиц в виде CaF₂ (при высоких температурах) и CaSiF₆ (при низких температурах).

Исследования на вулкане Сент-Хеленс в разные периоды активности 1980 г. показали важность наблюдений за отношением S/Cl в вытяжках из пеплов с одновременным измерением эмиссии SO₂ [Stoiber et al., 1980; Stoiber et al., 1981]. Если в первые дни активности наблюдались низкие показатели, характерные для извержений с небольшой магматической составляющей, то в период пароксизmalного извержения они значительно возросли, достигнув уровня извержений вулканов с преобладающей ювенильной составляющей. Состав водорастворимого комплекса также был использован для оценки минимальной массы вынесенной в процессе извержения серы.

Изучение состава вытяжек из пеплов вулкана Попокатепетль [Armienta et al., 2002] показало различные тренды изменения концентраций анионов с расстоянием для трех извержений, что объясняется рядом причин: тип и интенсивность извержения, распределение тефры по размерам, степень взаимодействия частиц с вулканическими газами, влажность, характеристики твердых частиц, время переноса от кратера до места отложения и угол между направлением ветра и линией отбора. Коэффициенты обогащения и тренды концентраций для металлов в вытяжках из пеплов с расстоянием показали, что Co, Ni, Cu и Pb адсорбируются из вулканических газов.

Компилятивная работа [Witham et al., 2005] синтезирует литературные материалы по теме вытяжек из вулканического пепла и факторов адсорбции летучих. Она дает достаточно полное представление о работах зарубежных ученых, посвященных

исследуемой проблеме, опубликованных до 2005 г.: M.A. Armienta, E. Bagnato, R.E. Stoiber, D.B. Smith и др.

В последнее десятилетие появился ряд работ группы авторов (P. Ayris, P. Delmel, E.C. Maters и др.), которые экспериментально изучают адсорбцию газов вулканическими стеклами. В работе [Ayris et al., 2013] показано, что захват SO_2 стеклами достигает максимальной эффективности при температуре 600°C, при этом на поверхности частиц образуются отложения CaSO_4 . Этот процесс поддерживается диффузией Ca^{2+} из породы к поверхности частицы. Т.о., если раньше сорбция SO_2 тефвой считалась низкотемпературной (<200°C) реакцией внутри шлейфа между конденсатом H_2SO_4 и частицами тефры, то в работе предполагается высокотемпературный захват SO_2 тефвой витрокластического состава, происходящий за счет диффузии Ca^{2+} . Используя простую математическую модель, эффективность захвата SO_2 поверхностью пеплов при 800°C составила от <1% до 73% и увеличивается с глубиной фрагментации и содержанием Ca^{2+} в стекле. Такие процессы свойственны крупным эксклозивным извержениям с большой глубиной фрагментации магмы. В другой работе этих же авторов [Ayris et al., 2014] проведены аналогичные исследования способности вулканических стекол тефритового, фонолитового, дацитового и риолитового составов адсорбировать HCl при температурах 200–800°C. Они показали особую активность тефритовых и фонолитовых стекол к HCl (видимо, благодаря большому содержанию Na_2O), которая реализуется посредством диффузии Na^+ и других активных к хлору катионов к поверхности частиц через обмен с H^+ . Основной продукт реакции – галит, в меньшей степени $\text{Ca}-$, $\text{K}-$, $\text{Al}-$ и Fe -содержащие хлориды; максимальная эффективность – при температуре 400–600°C. Но ряд допущений в этих двух статьях, а именно – неучет способности кристаллической фракции к адсорбции, отсутствие воды в эксперименте, неучет процесса адсорбции ниже температуры конденсации кислот (~200°C), происходящего в виде налипания капель раствора кислоты на поверхность частицы, делает все приведенные расчеты чисто информативными. Тем не менее, авторы пришли к заключению о том, что адсорбция газов (SO_2 , HCl и HF) пеплами в высокотемпературном выбросе крупных извержений намного более значительный процесс, чем предполагалось ранее.

Исследование водных вытяжек из пеплов вулкана Стромболи [Bagnato et al., 2011] показало значительные различия и временную изменчивость их состава, т.о. предполагая многочисленность обуславливающих его процессов. И хотя

подтверждается, что конденсация газов на поверхности пеплов играет ключевую роль в формировании водорастворимого комплекса, состав последнего только косвенно (и временно) отражает состав эруптивных газов, в результате: избирательной сорбции отдельных газов (HF) поверхностью частиц, поступлению солей благодаря кислотному выщелачиванию пеплов, а также дополнительного привноса серы и других веществ с резургентными, гидротермально измененными породами. Т.о. составы вытяжек из пеплов базальтовых "open-vent" вулканов связаны с состоянием вулканической активности сложно и не линейно, на что влияет ряд факторов: расход газа, содержание пепла, состав и текстура пепла и т.д. Однако для нескольких событий обнаружено отражение усиления активности в виде повышения отношения S/F в вытяжках из пеплов.

В публикации [Bagnato et al., 2013], посвященной извержению исландского вулкана Эйяфьятлайокудль в 2010 г., выявлен ряд закономерностей. Газово-аэрозольное взаимодействие в шлейфе способствует избирательному выщелачиванию катионов из пеплов: щелочные металлы и Ca (Cu и Zn среди микроэлементов) переводятся в растворимые соли на поверхности частиц быстрее относительно более инертных элементов (Mg, Ti). Адсорбция кислых газов на пепле возрастает почти линейно с расстоянием от вулкана, благодаря увеличению УПП пепла и продолжительности времени взаимодействия газов и пепла, что дало возможность оценить скорость образования серо- и галогенсодержащих солей на поверхности пеплов (3×10^{-9} – 2×10^{-8} моль·м²/с) и среднюю скорость растворения пеплов (1.5×10^{-8} моль·м²/с). Выявлено, что адсорбция для HF происходит в ~3 раза быстрее, чем для SO₂ и HCl, поэтому отношения S/Cl/F в вытяжках из пеплов не являются прямыми показателями газового состава эруптивного шлейфа. Однако критический комментарий к этой статье [Delmel et al., 2014] и ответ на него [Bagnato et al., 2014] показали, что в мировой науке еще много разногласий, и нет однозначного сложившегося понимания процессов, происходящих в пепло-газовой смеси эруптивного облака и формирования водорастворимого комплекса пеплов.

Так, если в ранних работах, посвященных изучению водорастворимого комплекса пеплов, содержание анионов и их отношения, считались явными показателями газового состава шлейфа, то в более поздних работах этот факт ставится под сомнение или оговаривается рядом условий. Происхождение катионной части вытяжек из пеплов

объяснялось как извлечением их из породы кислыми растворами, так и адсорбцией из эруптивного шлейфа. Но единых оценок генезиса отдельных элементов до сих пор нет.

Таким образом, дальнейшее изучение водорастворимых компонентов пеплов: как накопление фактического материала, так и экспериментальные исследования имеет важное научное значение. Кроме того, остается всегда актуальным практическое значение этого вопроса – изучение влияния пеплов и их водорастворимых компонентов на окружающую среду и человека.

1.3. Влияние вулканических пеплов на окружающую среду

Выделение вулканогенных экосистем и оригинального азонального вулканогенного типа ландшафта обосновано в работах В.Е. Быкасова [1981, 1982, 2005]. Вулканизм рассматривается как аналог антропогенной деятельности, что может использоваться в качестве методологической основы в природопользовании. Предпосылками обособления вулканогенных экосистем являются разнообразие и интенсивность проявления вулканических и поствулканических процессов, действующих на природную среду: вулканизм оказывает влияние рельефообразующие процессы, приводит к формированию вулканогенно-осадочного типа литогенеза; является непрерывным источником обогащения атмосферы, гидросферы и почв газами, аэрозолями, пирокластикой и вымываемыми из последней химическими элементами и соединениями, т.е. предопределяет специфику геохимических процессов в вулканических областях; интенсивно воздействует на биоту (механическое, термическое и химическое поражение). В качестве частного примера процессов, характерных для вулканогенного ландшафта, рассмотрено поражение и уничтожение, и последующее восстановление, растительного покрова Толбачинского дала в результате БТТИ в июле-сентябре 1975 г. Рассматривая три вышеперечисленные фактора поражения, отмечено, что полное уничтожение растительности происходит при мощности рыхлых отложений более 40 см; тепловое воздействие ограничено территорией в радиусе 3–4 км от действующих конусов; химическое отравление – основная причина поражения растительного покрова, особенно каменноберезняков и кедрового стланика: во время извержения осадки, промывающие газо-эруптивное облако, представляли собой раствор кислот ($\text{pH}=2-3$) и солей (содержание фтора до 60 мг/л) [Меняйлов и др., 1980], а в вегетационные периоды 1976–77 гг. талые воды

усиленно промывали шлаково-пепловую толщу, попадая в корни растений [Быкасов, 1981]. Выделено два фактора химического поражения биоты: токсичные газы и «кислые осадки» эруптивных туч (приводят к поражению ассимиляционного аппарата, нарушению процессов метаболизма, раздражению слизистых оболочек у животных и клеточному и ферментному отравлению, некрозу и дефолиации у растений) и вымывание химических веществ из продуктов извержений (приводит к внутриклеточному поражению растений через корневую систему и отравление животных зараженной пищей и водой) [Быкасов, 2005]. Высказывается предположение, что комплекс свойств тефры Южного прорыва (физико-механические, сорбционные, геохимические) является более благоприятным для произрастания лиственницы и других древесных и кустарниковых пород, по сравнению с Северным прорывом [Андреев, Быкасов, 1989].

Изучению воздействия извержений в кальдере Академии Наук в 1996 г. и вулкана Карымский с 1996 по 2008 г. на окружающую среду, в частности, на гидрохимические характеристики и биоценозы вод озера Карымское посвящена серия работ [Федотов и др., 2002; Карпов и др., 2007; Самойленко, Карпов, 2007; Карпов и др., 2008; Лупикина, Карпов, 2008].

В статьях [Башарина, 1958, 1960] приведен химический анализ воздуха во время пеплопада в Ключах 30 марта 1956 г. (содержания некоторых вулканических газов значительно превышали ПДК). Исследования влияния вулканической деятельности на химический состав атмосферных осадков и воздух Камчатки показали, что это влияние локальное (фумарольная активность) и кратковременное (во время извержений) [Башарина, 1974]. В работе [Кирсанова и др., 1978] авторы приходят к выводу, что влияние извержения (БТТИ) на химический состав поверхностных и подземных вод существенно, но ограничено небольшой площадью.

О влиянии пепловых выбросов и газовых эмиссий вулкана Редаут на химию снега и о связи последней с составом газового шлейфа указано в работе [Jaffer et al., 1993]. Данное исследование показало, что влияние вулканической активности на химию снега проявляется повышенными содержаниями Cl^- и SO_4^{2-} , Ca, Na и Mg, общей минерализацией и pH в присутствии тефры. При отсутствии пепла, газовые эмиссии SO_2 и HCl уменьшают pH в снежной толще. HCl более значимая кислота в близлежащем снежном покрове из-за её более эффективного осаждения со снегом, чем SO_2 .

В работе [Мелекесцев, 1989] на основе тефрохронологических исследований дана характеристика сильных пеплопадов в районе г. Петропавловск-Камчатский за последние 1800 лет и их вероятность в ближайшее время; также кратко рассмотрено воздействие пеплопадов на природную среду, хозяйственныe объекты и человека.

Впервые для района Петропавловск-Елизовской городской агломерации показана на примере гидротермально-фреатического извержения вулкана Корякского (20.12.2008–26.08.2009) возможность загрязнения свежевыпавшей тефвой водотоков: повышение кислотности $\text{pH}=4.1\text{--}4.35$, содержания железа и алюминия, твердой взвеси выше ПДК для питьевой воды; т.о. их вода была непригодна для питья и полива [Мелекесцев и др., 2011].

Воздействие вулканизма, в особенности, пеплопадов на почвообразование изучено в монографии [Соколов, 1973] и работах [Захарихина, Литвиненко, 2008; Захарихина и др., 2016]. Влияние вулканизма на растительность детально рассмотрено в работе [Манько, Сидельников, 1989], а также упоминается в [Манько, Ворошилов, 1978]; в основном, внимание уделено отрицательному эффекту. В отличие от этого, И.И. Куренков [1975] рассматривает положительное влияние пеплопада вулкана Безымянного 1956 г. на численность нерки в водоеме.

При рассмотрении воздействия отдельных компонентов вулканических загрязнителей, особенно выделена негативная роль фтора. Это показано на примере извержений в Исландии [Stefanson, Sigurjonsson, 1957; Thorarinsson, Sigvaldason, 1972; Oskarsson, 1980], а также при исследовании растительности на склонах Этны (Италия), в которой не выявлены аномалии в содержании серы, зато концентрации фтора превышают фоновые в 10–30 раз [Le Guern et al., 1988]. Объяснение этому – фтор, который не участвует в метаболизме, концентрируется в листьях, в то время как сера, жизненно важный для растений элемент, участвует в физиологических реакциях и, соответственно, удаляется.

1.4. Заключение к Главе 1

Важность изучения пеплов, как наиболее динамичной части изверженных продуктов, в особенности их изверженной массы, гранулометрического и химического состава, не вызывает сомнения (раздел 1.1). Ранее комплексные исследования пеплов проводились И.И. Гущенко [1965], А.Н. Земцовым [1986], В.А. Будниковым [1996].

Однако в последнее время изучению пеплов извержений вулканов Камчатки и Курил на современном методическом уровне уделялось мало внимания.

Изучение водорастворимых компонентов пеплов посредством анализа водных вытяжек из них, начатое в отечественной вулканологии в 50-х гг., активно проводилось и развивалось до 90-х гг. ХХ в. Однако после работ, посвященных извержению вулкана Авачинский в 1991 г. [Дроздин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995], т.е. последние 20–25 лет детальных исследований водорастворимого комплекса пеплов не проводилось, во всяком случае, об этом свидетельствует отсутствие опубликованных работ по данной тематике.

В зарубежной науке после статьи о Центральноамериканских вулканах в 1973 г. [Taylor, Stoiber, 1973] опубликовано множество работ, посвященных всесторонним исследованиям водорастворимых компонентов пеплов – их происхождению, форме нахождения на поверхности частиц, связи с различными характеристиками извержения и свойствами пеплов и др. Кроме того, экспериментально изучаются процессы адсорбции газов (SO_2 , HCl) на вулканических стеклах. Не смотря на столь многочисленные и качественные исследования в этой области, нет однозначного мнения по ряду вопросов. Так, если в ранних работах, содержание анионов в вытяжках из пеплов и их отношения, считались явными показателями газового состава шлейфа, то в более поздних работах этот факт ставится под сомнение или оговаривается рядом условий. Происхождение катионной части вытяжек из пеплов объяснялось как извлечением их из породы кислыми растворами, так и адсорбцией из эруптивного шлейфа. Но количественные оценки и надежные определения генезиса отдельных элементов в водных вытяжках до настоящего времени весьма противоречивы.

Таким образом, дальнейшие исследования в данной области: как накопление фактического материала, с целью выявления зависимостей и закономерностей, так и экспериментальные исследования, имеют большое значение. Кроме того, остается неясным вопрос о положительном и негативном влиянии пеплопадов на окружающую среду (почвы, растительность). Практическое значение имеют исследования о влиянии извержений вулканов на состояние населенных территорий (качество воздуха, питьевые ресурсы, сельское хозяйство и др.), которые позволяют сделать прогнозные оценки.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕПЛОВ И ОЦЕНКИ ИХ ИЗВЕРЖЕННОЙ МАССЫ

2.1. Особенности методики отбора и обработки свежих пеплов для приготовления и анализа водных вытяжек

В труднодоступных условиях Камчатки отобрать сухие пробы пепла (для приготовления водных вытяжек и др. обработки) в процессе извержения или сразу после него – редкая возможность. Если извержение началось после установления снежного покрова, отбор проб с поверхности снега или из снежной толщи – более реальная задача. В этом случае получают природные вытяжки из пеплов в результате таяния отобранных проб пепла с вмещающим его снегом и дальнейшего их разделения (фильтрования). Отбор площадных проб пепла с поверхности снега или из снежных шурфов позволяет оценить объемы изверженного материала, а также исследовать концентрации и состав растворимых и нерастворимых примесей, накопленных в сезонном снежном покрове за зиму (рис. 2.1), т.е. оценить вклад эксплозивной вулканической деятельности в загрязнение окружающей среды, а также дает возможность по составу анионной части получить информацию о летучих компонентах магмы, выделяющихся в эксплозивную стадию. Такая геохимическая снегосъемка ранее была использована, для количественной оценки геологического эффекта извержений вулканов Чикурачки (1986 г.) и Авачинский (1991 г.) [Овсянников, Муравьев, 1992; Дроздин, Муравьев, 1994].

Шурфование снежной толщи и отбор площадных проб пепла имеет особое значение для исследования труднодоступных вулканов с длительной эксплозивной активностью, т.к. в течение холодного сезона (с октября по май) в снежном покрове накапливается и послойно сохраняется весь изверженный за это время пирокластический материал (рис. 2.1). Его послойное изучение может показать динамику активности вулкана, а суммарные площадные пробы оценить объем изверженного материала за снежный период. [Малик, 2010; Маневич и др., 2012; Miyaji et al., 1990].

Снег обладает высокой сорбционной емкостью, он аккумулируют не только твердые вещества – тефру, приводя к образованию агрегатов, и аэрозоли (одна снежинка может захватить до 10^6 аэрозольных частиц), но и газы и пары металлов [Алексеев, Алексеева, 1989]. Таким образом, свежевыпавший снег переводит объемное распределение загрязняющих веществ в площадное. Методы изучения химического

состава снега, накапливающего за зиму загрязняющие вещества, с 70-х гг. XX века широко применяются для оценки антропогенной загрязненности территории [Прокачева, Усачев, 1989]. Аналогично можно оценивать также и влияние фумарольной деятельности на атмосферу и осадки. Так, исследовалось поступление тяжелых металлов и других микроэлементов в снежной покров при фумарольной деятельности на склоне вулкана Авачинский [Алексеев, Алексеева, 1989; Научно-технический отчет..., 1994а, б], влияние деятельности вулканов Мутновский и Горелый на химический состав снежного покрова [Транбенкова, Муравьев, 2003].

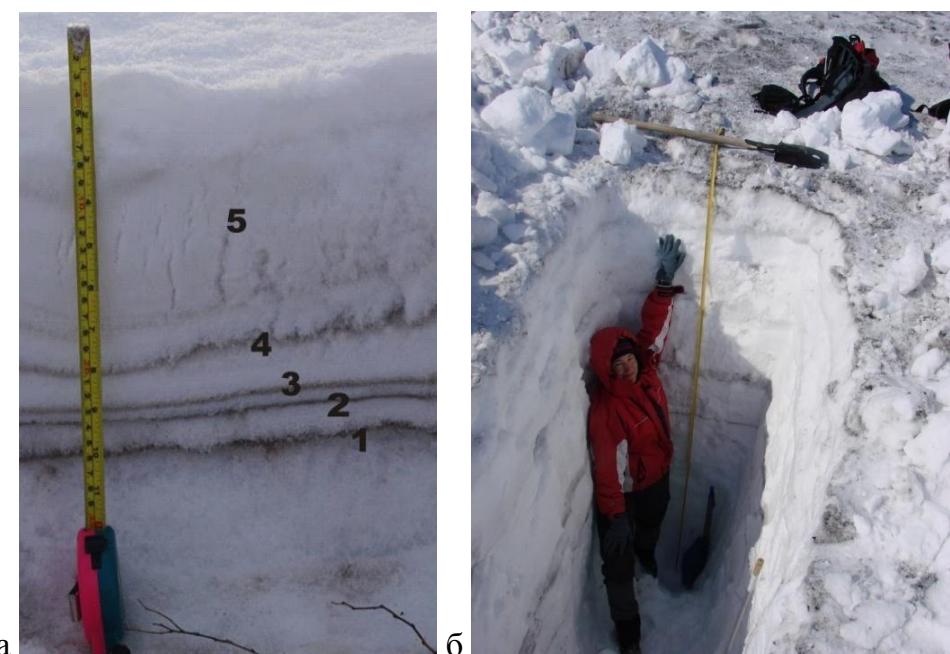


Рис. 2.1. Разрезы снежной толщи: а – в районе базы «Ипуйин» 14.01.2011 г., цифры на рисунке – пепловые горизонты вулкана Кизимен: 1 – 28.01.2010 г. $510 \text{ г}/\text{м}^2$, 2 – 7.01.2011 г. $320 \text{ г}/\text{м}^2$, 3 – 9.01.2011 г. $150 \text{ г}/\text{м}^2$, 4 – 11.01.2011 г. $110 \text{ г}/\text{м}^2$, 5 – 9 см снега запыленного пеплом, $45 \text{ г}/\text{м}^2$; б – в районе вулкана Карымский (снежный шурф) в апреле 2011 г.

Автором на территории, подверженной пеплопадам, проводилась геохимическая снегосъемка для оценки объемов изверженного материала, а также исследования концентрации и состава растворимых примесей, накопленных в сезонном снежном покрове после извержений. Пробы пепла отбирались вместе с подстилающими или вмещающими слоями снега в полиэтиленовые мешки.

Пробы снега с пеплом таяли при комнатной температуре, фильтровались на фильтровальном аппарате с помощью обеззоленных отмытых дистиллированной водой или нейлоновых фильтров. Снеговая вода и полученный фильтрат после измерения pH сливалась в пластиковые бутылки, промытые дистиллятом, и сдавались на гидрохимический анализ. Полученные пеплы высушивались, взвешивались, масса

пересчитывалась на площадь отбора пробы. Пробы пепла подвергались дальнейшему анализу – гранулометрическому, химическому, минералогическому. Результаты химического анализа суговых вытяжек пересчитывались на 100 г пепла (через объем талой воды и массу пробы пепла).

Обычно параллельно с пробами снега с пеплом отбирались фоновые пробы снега или учитывались фоновые пробы, отобранные ранее в этом районе (табл. 2.1). Чистые атмосферные осадки имеют слабокислую реакцию, на величину которой из естественных агентов наибольшее влияние оказывает CO_2 . В среднем pH атмосферных осадков – 5.5–5.6. [Прокачева, Усачев, 1989]. Как показал опыт, подтвержденный литературными материалами [Башарина, 1974], содержание таких макрокомпонентов в снеге как Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ сильно меняется с удалением от берега океана и, кроме того, зависит от направления ветра, при котором выпадает снег. Особенно внимательно следует относиться к пробам, отобранным в районе побережья, т.к. концентрация хлора на расстоянии 500 м от берега может достигать 15 мг/л и экспоненциально убывает с расстоянием [Бримблкумб, 1988]. Поэтому учесть фоновые концентрации при пересчете чрезвычайно сложно, но, т.к. на расстоянии более 50 км от берега они небольшие, ими можно пренебречь, если минерализация снега с пеплом превышает фоновую в 10 и более раз. Обычно это достигается при концентрации пепла в снегу >10–15 г/л. При приготовлении вытяжек из сухого пепла рекомендуют навеску 40 г/л [Witham et al., 2005]. При незначительном содержании пепла в талой воде (до 10 г/л) при пересчете содержания водорастворимых веществ на 100 г пепла происходит их значительное завышение. В тоже время, при большой концентрации растворение сорбированных веществ затрудняется. Так, при концентрации пепла более 250 г/л полному растворению сульфат- и фторид-ионов препятствует перенасыщение раствора соответствующими соединениями (гипсом, флюоритом) [Witham et al., 2005].

При приготовлении **вытяжек из сухого пепла** использовалась концентрация от 40 до 200 г пепла на 1 л. Эксперимент с различным содержанием пепла в вытяжке показал почти идентичные концентрации анионов и катионов (табл. 2.2).

Время приготовления суговых вытяжек обычно составляло около суток, в течение которого они таяли и достигали комнатной температуры. Как показал опыт приготовления вытяжек из сухого пепла вулкана Карымский в течение 5 и 28 ч, в их составе заметно отличалось только содержание серы и фтора, которых было больше в 1-

м случае на 20–30% (табл. 2.2). Таким образом, основная часть растворимых компонентов выносится с первыми порциями талой воды [Прокачева, Усачев, 1989; Witham et al., 2005].

Таблица 2.1. Химический состав фоновых проб снега, мг/л талой воды.

Компоненты	Район пос. Ключи (14) ~80 км	Вулкан Карымский (5) 27 км	Вулкан Кизимен (1) 80 км	Развилка на с. Эссо* (3) ~150 км	Район вулкана Авачинский (17) ~ 20 км
pH	4.8-5.8 / 5.38	4.8-5.5 / 5.23	5.48	5.15	5.1-5.8 / 5.4
HCO ₃ ⁻	0.7-2.9 / 1.9	0.29-1.61 / 1.17	Н.п.о.	Н.п.о.	0.24-4.27 / 2.02
F ⁻	0.004–0.13 / 0.03	0.01–0.08 / 0.047	Н.п.о.	Н.п.о.	0.03–0.12 / 0.05
Cl ⁻	0.2–5.9 / 1.0	0.15–0.64 / 0.45	Н.п.о.	Н.п.о.	0.17–1.94 / 1
SO ₄ ²⁻	0.05–2.25 / 0.44	0.02–1.98 / 0.58	0.96	3.8–6.7 / 4.8	0.29–0.73 / 0.52
Na ⁺	0.03–3.62 / 1.45	0.07–0.75 / 0.3	0.3	0.1–0.63 / 0.36	0.15–1.72 / 0.62
K ⁺	0.02–0.94 / 0.14	0.01–0.74 / 0.26	Н.п.о.	0.1	0.04–0.55 / 0.2
Ca ²⁺	0.09–1.6 / 0.22	0.07–0.28 / 0.16	0.6	1.2	0.04–0.74 / 0.19
Mg ²⁺	0.019–0.37/0.04	0.01–0.075/0.035	0.12	0.48	0.02–0.3 / 0.08
Σ	5.22	3.00	1.98	6.94	4.68

Примечание. * – трасса Петропавловск-Камчатский–Усть-Камчатск. Приведены пределы содержаний и среднее. В скобках указано количество проб, затем расстояние от океана до района отбора.

Таблица 2.2. Содержание химических компонентов в вытяжках из пеплов вулкана Карымский с использованием разной методики их приготовления, в мг/100 г пепла.

Дата	6.08.2013 г.		21.04.2007 г.	
	Содержание пепла в вытяжке		Время приготовления вытяжки	
компоненты	40 г/л	80 г/л	5 часов	28 часов
F ⁻	Н.п.о.	Н.п.о.	0.95	0.64
Cl ⁻	33.7	33.7	40.0	39.5
SO ₄ ²⁻	93.7	92.5	267	217
Na ⁺	11.44	10.63	51.8	49.6
K ⁺	3.35	2.88	0.31	0.295
Ca ²⁺	38.6	41.3	65.3	74.0
Mg ²⁺	1.52	1.97	12.7	12.8

Примечание: * – время приготовления 22 ч, ** – содержание пепла в вытяжке 200 г/л.

2.2. Оценка массы выброшенного пепла

При изучении извержений вулканов важное значение для оценки их продуктивности и долгосрочного прогноза активности имеет оценка массы и объема изверженных пород (см. раздел 1.1). При возможности проведения аэрофотосъемки до и после извержения оценка объема лавовых потоков, отложений ПП, новообразованных шлаковых конусов и др. получается достаточно точной [Dvigalo et al., 2016]. Указанный

метод, однако, неприменим для оценки объема тефры, ввиду ее распространения на большие расстояния от вулкана и небольшой мощности отложений.

При оценке геологического эффекта извержений используется масса либо объем изверженных пород, в т.ч. тефры. Выбор характеристики зависит от характера первичных данных. Так, результаты аэрофотосъемки позволяют оценить объем отложений. Измерения толщины слоя тефры также дают возможность подсчитать объем, а отбор площадных проб ($\text{кг}/\text{м}^2$) – массу отложенной тефры. Для сравнения разных отложений их объемы пересчитываются на плотную породу (DRE – англ. *dens rock equivalent*), однако, они не показательны, если не указаны плотность исходной и плотной породы [Encyclopedia of volcanoes, 2015, с. 259]. В целом, представляется более корректным сопоставление разных типов отложений именно по массе, а также использование изверженной массы как основы для шкал магнитуды и интенсивности, т.к. плотность разных типов отложений, так и отложений разных вулканов существенно различается. Автором работы проводились оценки массы тефры, на основании данных отбора площадных проб в отдельных пунктах на территории, охваченной пеплопадом.

Существующие в настоящее время методики подсчета массы основаны на: (1) оценке тепловой мощности извержения по наблюдениям высот эруптивных колонн и пепловых шлейфов в атмосфере [Федотов, 1982]; (2) расчетах суммарной энергии извержения по регистрируемым акустическим сигналам [Фирстов, 1996; Фирстов, Махмудов, 2011; Гордеев и др., 2013]; (3) построении изолиний мощности/массы отложений, основываясь на данных измерения мощности или отбора площадных проб пепла в отдельных пунктах на территории пеплопада [Широков, 1985; Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000]; (4) спутниковых наблюдениях эруптивных облаков и шлейфов [Pouget et al., 2013].

Любой из указанных методов характеризуется высокой степенью неопределенности итоговых оценок и значительной погрешностью ввиду большого разнообразия не учитываемых сопутствующих факторов. Использование первого и второго методов, основанных на энергетическом подходе, сопряжено с большими неточностями ввиду сильно нелинейного характера зависимости высоты эруптивной колонны (амплитуды акустического сигналов) от тепловой мощности источника, параметров турбулентности в зоне конвективных течений, условий в выводящем канале и характера извержения в целом, а также особенностей распространения сигнала в

пространственно неоднородной среде. При использовании спутниковых изображений возникают трудности методического характера, обусловленные спецификой дистанционных наблюдений, в том числе, сильной зависимостью параметров принимаемого сигнала от свойств частиц и атмосферных условий [Wen, Rose, 1994; Webley et al., 2009], вследствие чего получаемые оценки характеризуются пока значительной долей неопределенности.

В данной работе расчет общей массы тефры исследуемых извержений производился с использованием ряда методик, основанных на отборе площадных проб.

Стандартный подход к оценке суммарной массы изверженной тефры состоит в использовании методов седиментологического анализа, основанных на подсчёте площадей территорий, ограниченных изолиниями равной мощности (изопахитами) отложений. Самый простой способ, заключающийся в умножении площади между соседними изолиниями на среднеарифметическое значение мощности между ними, приводит к завышенным значениям [Широков, 1985]. Хотя по наблюдениям автора завышение не значительно, если количество отобранных проб позволяет провести достаточное число изолиний.

На практике требуемого количества пунктов отбора проб и их оптимального расположения добиться трудно ввиду удалённости вулканов, труднодоступности местности, обширности зоны пеплопада, выпадения части пепла в океан и (зачастую) отсутствия необходимой изначальной информации о пространственных характеристиках отложений. Таким образом, в случае выпадения тефры на больших площадях, территория отбора проб фактически охватывает лишь сравнительно небольшую часть зоны пеплопада, за пределами которой характер распределения поля осаждённой массы остаётся неизвестным. Особенно это касается ближней и дальней зоны отложения тефры. Масса именно лёгкой фракции, отлагаемой преимущественно в неохваченной наблюдениями дальней зоне, может быть значительной, и её недооценка может быть одним из существенных источников ошибок при подсчётах общей массы пепла.

Наиболее часто используемый подход к преодолению указанных проблем состоит в привлечении полуэмпирических зависимостей между массой(m)/мощностью(h) и площадью отложений(s)/расстоянием(r) от вулкана, допускающих экстраполяцию на

территории, не охваченные наблюдениями. Обычно используется степенная ($h \sim 1/r^n$) и экспоненциальная зависимости ($h \sim e^{-kr}$) (см. раздел 3.1, рис. 3.2).

Степенная зависимость ($n \approx 2$) использовалась при расчетах объемов тефры вулкана Тятя в 1973 г. на расстояниях 3–100 км от кратера [Мархинин и др., 1974]. Возможность аппроксимации степенной зависимостью показана в работе [Трубников, Адамчук, 1982], причем среднее для нескольких извержений значение $n \approx 2$. Земцов [1986] уточняет, что мощность тефры именно базальтовых извержений убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра извержения ($h \sim 1/r^2$). Широков [1985] предлагает ряд формул для разных форм распределения изопахит из предположения степенной зависимости изменения мощности с расстоянием, причем n также меняется с расстоянием; как показано, для дальней зоны $n > 2 \approx 3$; примеры для ближней зоны, в т.ч из других работ и данных автора, показывают, что $n < 2$.

В работах [например, Froggat, 1982; Pyle, 1989] показано, что мощность отложений тефры многих извержений убывает экспоненциально с удалением от вулкана; по [Земцов, 1986] это характерно для извержений вулканов с андезитовым и более кислым составом. На основе экспоненциальной зависимости предложен ряд эмпирических формул (методов) оценки объема выпавшей тефры [Froggat, 1982; Pyle, 1989; Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000]. Однако авторы работ указывают, что при отсутствии данных для средней и/или дальней зоны, экстраполяция зависимости, полученной для ближней зоны, на дальнюю зону может приводить к существенной недооценке объема, т.к. для хорошо изученных отложений наблюдается перелом аппроксимирующей линии на полулогарифмическом графике мощности от (площади) $^{1/2}$, т.е. скорость уменьшения количества выпавшей тефры замедляется. Особенно существенно это для извержений, продуцирующих большое количество пылеватых пеплов.

Исследования, основанные на большом наборе точек опробования изверженного пепла на расстоянии от 0.2 до 200 км от вулкана Руапеху (Новая Зеландия), показали, что утончение отложений пеплопада с расстоянием достоверно может быть описано как минимум тремя отдельными сегментами экспоненциальной зависимости, а также с такой же точностью одной степенной, причем интегрирование функций в обоих случаях дало сходные объемы [Bonadonna, Houghton, 2005]. При отсутствии полноценных данных в какой-либо зоне аппроксимация одним-двумя сегментами экспоненциальной

зависимости приводит к недооценке изверженного объема. Однако и аппроксимация степенной зависимостью имеет свои недостатки такие, как выбор пределов интегрирования, экстраполяция на ближнюю зону (при отсутствии опробования в ней), которая может приводить к значительному завышению объемов [там же].

Таким образом, выбор и использование аппроксимирующих зависимостей оказываются проблематичными в ситуации, когда количество точек отбора проб очень невелико ($<10-15$) и они не охватывают всю территорию пеплопада от ближней до дальней зоны. Как следствие, результаты экстраполяции оказываются сильно чувствительными к количеству используемых изолиний и ошибкам при подсчетах ограничивающей ими массы. При недостатке точек отбора в дальней зоне экстраполяция экспоненциальной зависимости приводит к занижению изверженных объемов до 2 раз, а степенной – дает лучшие результаты. При отсутствии опробования в ближней зоне, оба метода дают ошибки: экспоненциальная аппроксимация – занижение до 3 раз, степенная – завышение до 5 раз [Bonadonna, Houghton, 2005]. Для всего диапазона расстояний нельзя достоверно подобрать одну зависимость, поскольку гравитационное оседание пепловых частиц в отдельных диапазонах размеров происходит, как правило, в существенно различных режимах – турбулентном в случае крупных частиц (>250 мкм) и ламинарном для пылеватых (<63 мкм) фракций.

Автором для подсчета суммарной массы тефры применялись методы в зависимости от расположения точек отбора относительно вулкана; зачастую применялись несколько методов, что позволяло судить об итоговой неопределенности полученных оценок.

Для подсчета суммарной массы тефры длительных извержений вулканов Шивелуч, Карымский, Кизимен, ТТИ-50, выброшенной в результате нескольких пеплопадов за определенный период (обычно за снежный) с опробованием в разных зонах пеплопада или только в ближней зоне (Карымский) использовалась степенная зависимость с меняющимся от расстояния степенным показателем. Территория вокруг вулкана делилась на несколько секторов, в каждом из них проводились изолинии исходя из данных отбора пепла, и подсчитывалась общая масса по формулам [Широков, 1985]. Ввиду недостатка точек отбора, в расчет брались роза ветров, спутниковые снимки, история активности (по сейсмическим данным). Выбор степенного показателя n для ближней и дальней зон за пределами конечных изолиний осуществлялся исходя из

опыта данных других извержений либо принимался равным вычисленному для ближайших изолиний.

Для кратковременных извержений, происходящих 1-2 раза в год на вулкане Безымянном, а также для отдельных мощных выбросов вулканов Шивелуч (28.10.2010), Кизимен (1.01.2011, 13.01.2011), применялись также методики, основанные на экспоненциальной аппроксимации [Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000], которые более предпочтительны, когда основное количество проб отобрано в дальней зоне.

Альтернативный подход к определению суммарной изверженной массы тефры состоит в реконструкции зоны пеплопада на основе численных модельных расчётов переноса/осаждения пепловых частиц при задании реалистичных полей ветра и турбулентности в окрестности вулкана. Использование данного подхода позволяет существенно уменьшить неопределенности, возникающие в связи с сильным влиянием атмосферного фактора на пространственное распределение и структуру пепловых отложений. Если предположить, что параметры атмосферного переноса полностью известны, то единственными оставшимися факторами неопределенности в подобных расчётах будут параметры первоначального выброса (распределение массы в эruptивной колонне и интенсивность выброса), играющие роль граничных условий в модели переноса, а также процессы и физические факторы, влияющие на скорость гравитационного осаждения отдельных частиц. Сопоставляя результаты прямых расчётов массы осаждённого пепла для конкретных наборов модельных параметров с данными отбора проб, можно провести численную реконструкцию зоны пеплопада и восстановить с той или иной степенью достоверности массовые параметры источника выброса, включая суммарную массу и гранулометрический состав пепловых частиц [Bonasia et al., 2009; Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015а,б].

Большинство из широко используемых в настоящее время моделей (например, классы моделей TEPHRA [Bonasia et al., 2009] и PUFF [Scollo et al., 2011]) основано на решении упрощённого адвективно-диффузионного уравнения переноса в рамках полуаналитического подхода, использующего предположения о горизонтально-однородном поле ветра и пространственно-однородном поле турбулентности (коэффициенты турбулентного перемешивания в таких моделях полагаются постоянными во всей области, в которой ищется решение). При использовании подобных моделей исследователи ограничиваются извержениями с относительно

низким коэффициентом эксплозивности, либо рассмотрением грубодисперсных фракций тефры, выпадающих на расстояниях $<30\text{--}50$ км от вулкана, например: извержение вулкана Везувий в 472 г. до н.э. [Bonasia et al., 2009].

Разработанный алгоритм оценки параметров пеплового выброса строится в рамках наиболее полного учёта влияния орографии, и атмосферных условий в целом, применительно к высокогорному району Камчатки в окрестности Ключевской группы вулканов на основе численного гидродинамического модельного комплекса RAMS, адаптированного для расчетов переноса популяций пепловых частиц [Moiseenko, Malik, 2014].

Данный подход был реализован в рамках совместных проектов с сотрудниками ИФА РАН им. А.М. Обухова, поддерживаемых грантами ДВО и РФФИ. Был создан программно-математический комплекс для расчётов атмосферного переноса и осаждения вулканического пепла (рис. 2.2). На его основе разработана и реализована в виде программного кода методика восстановления суммарной массы тефры, основанная на статистическом оценивании методом наименьших квадратов параметров источника пеплового выброса (эксплозивного извержения) при наличии данных о суммарной плотности осаждённого пепла в отдельных пунктах в подветренной зоне [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015б].

По сравнению с предшествующими, разработанная методика позволяет:

- корректно учитывать особенности процесса эоловой гравитационной дифференциации пеплового материала в горных районах в конкретных атмосферных ситуациях и проводить количественные оценки суммарной массы выброса пепловых частиц и его распределения по высотам;
- учитывать на качественно новом уровне роль атмосферных процессов, включая горизонтальную и вертикальную неоднородность полей ветра и турбулентности, в пространственной дифференциации исходного спектра частиц;
- проводить оценку параметров пеплового выброса при небольшом количестве пепловых проб и объёме информации о характере извержения;
- восстанавливать, наряду с суммарной изверженной массой, суммарный гранулометрический состав изверженного материала, выполнить приближенную реконструкцию зоны пеплопада, в том числе для территорий, не охваченных полевыми

наблюдениями, получить другие параметры выброса – распределение материала по высоте.

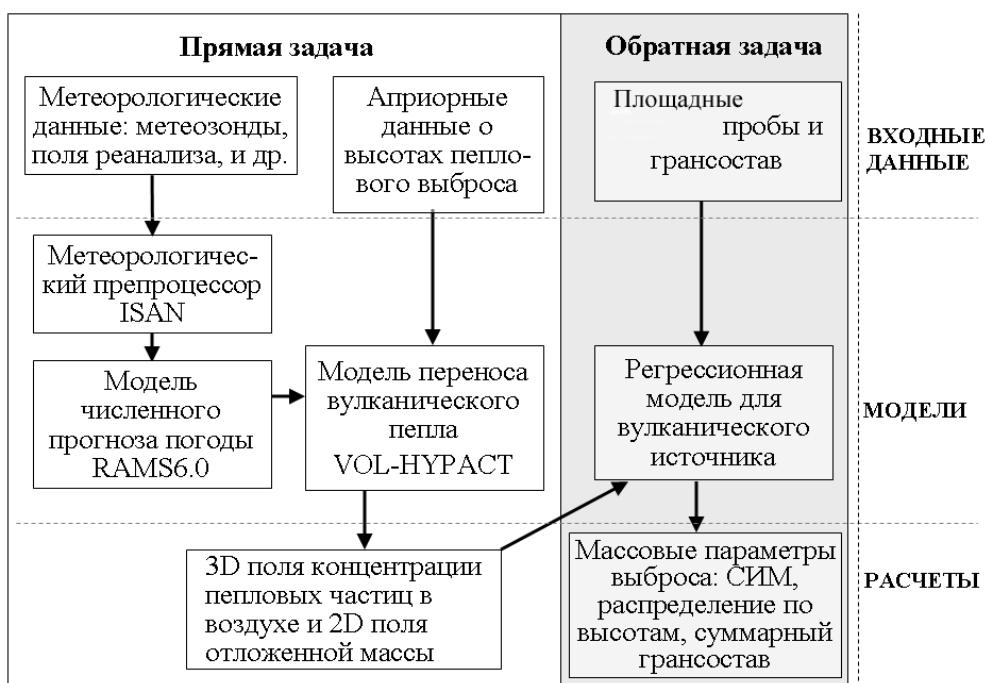


Рис. 2.2. Блок-схема расчетного комплекса. СИМ – суммарная изверженная масса.

Основным недостатком разработанного подхода, в его текущей реализации, являются большие трудозатраты, связанные с проведением численных расчетов и усвоением входных данных. Поэтому расчеты с его помощью были проведены только для нескольких событий.

С использованием данной методики изучены извержения вулкана Безымянный (24.12.2006 и 17.12.2009 гг.) [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015б,в] и отдельная эксплозия вулкана Кизимен (13.01.2011 г.) [Моисеенко, Малик, 2015а], для которых имеется хороший набор площадных проб пепла и результаты его гранулометрического анализа. Работы по моделированию распространения и осаждения пеплов на примере этих событий показали: полученные оценки суммарной массы пепла характеризуются устойчивостью и хорошо согласуются с результатами, получаемыми на основе других методик.

Точность проводимых оценок

Точность оценок суммарной изверженной массы тефры проводимых с использованием полуэмпирических зависимостей приблизительно оценивается в 30% (при достаточном количестве точек и их оптимальном расположении, т.е. когда можно построить 3 и более изолиний), исходя из разницы результатов, полученных разными

методами, и значений ошибок, приведенных в литературе для соответствующих методов [Bonadonna, Houghton, 2005; Bonadonna, Costa, 2012]. При малом количестве точек и их неудачном расположении (можно построить не более 1-2 изолинии) погрешность может составлять 50–70%.

2.3. Методы гранулометрического анализа

Гранулометрический анализ тефры и других типов пирокластических отложений выполнялся ситовым методом по стандартной методике [ГОСТ 12536–2014] с промывкой водой, т.к. в большинстве проб преобладают пылеватые частицы. Использовались сита с размером ячеек (0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2 мм) в соответствии с ф-шкалой ($\varphi = -\log_2 d$, где d – диаметр частиц в мм), используемой иностранными исследователями. Дополнительно для выделения наиболее мелкой фракции использовалось сито с минимальным размером ячейки – 0.056 мм.

Для более детального и качественного изучения гранулометрического состава тефры кроме ситового анализа, использовался лазерный дифракционный анализатор «Analysette-22 COMPACT» фирмы FRITSCH GmbH, позволяющего определять распределение частиц по размерам в диапазоне 0.3–300 мкм. Использование совместно этих методов позволяет производить разделение пробы на фракции в широком диапазоне (от 0.3 мкм до 2 мм и более). Результаты анализа пробы ситовым методом и наиболее мелкой фракции (<56 мкм) методом лазерной дифракции объединялись с помощью программного обеспечения «A-22» к лазерному дифракционному анализатору «Analysette-22 COMPACT». С его использованием также вычислялись такие гранулометрические характеристики как суммарная площадь поверхности частиц (удельная поверхность пепла – УПП) ($\text{м}^2/\text{кг}$, м^{-1}), средний размер, стандартное отклонение и т.д. Получаемые таким методом величины УПП используются автором только для сравнения между собой (т.е. с величинами, определенными таким же методом). В зарубежной литературе [например, Delmel et al., 2005] для определения УПП используют приборы, работа которых основана на методе БЭТ (англ. *BET method*, названный по первым буквам фамилий Брунауэр-Эммет-Теллер) – метод математического описания физической адсорбции, основанный на теории полимолекулярной (многослойной) адсорбции.

В работе применяется термин «пылеватая фракция» для частиц менее 56 мкм (в соответствии с минимальным размером ячеек сит). Согласно ГОСТ 25100-2011 к

пылеватым относятся частицы размером 2-50 мкм. В исследуемых пробах содержание глинистых частиц (<2 мкм) не превышает 7%.

Использование лазерного дифракционного анализатора частиц позволило выделить наиболее опасные для здоровья гранулометрические фракции: <4 и <10 мкм (см. раздел 4.3, рис. 4.19).

2.4. Методы химического анализа жидких и твердых проб

Все гидрохимические макрокомпонентные и часть микрокомпонентных анализов выполнялись в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН, имеющем аттестат аккредитации Госстандарта России, аналитиками А.А. Кузьминой, С.В. Сергеевой, Л.Н. Гарцевой, Н.А. Соловьевой, В.В. Дунин-Барковской. Макрокомпоненты определялись методами классического гидрохимического анализа, кроме этого применялся хроматограф жидкостный/ионный «СТАЙЕР», иономеры. Микрокомпоненты (Fe, Ni, Cu, Co, Pb, Zn, Li, Mn, V) определялись в специально подготовленных пробах с помощью атомно-абсорбционный спектрофотометра “ThermoElectron SOLAAR M”, укомплектованного пламенным и беспламенным узлами атомизации образцов.

Начиная с 2013 г. проводился анализ проб методами ICP-MS и ICP-AES в аккредитованном Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов (АСИЦ ИПТМ РАН), п. Черноголовка, что позволяет определить содержание следующих элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Nb, Ru, Rh, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U, а также в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (ИТИГ ДВО РАН), г. Хабаровск, методом ICP-MS. Было проанализировано по одной водной вытяжке из пеплов вулканов Карымский, Толбачик, Жупановский, Камбальный.

Содержание породообразующих окислов в пробах пирокластики определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в АЦ ИВиС ДВО РАН на спектрометре «S4 PIONEER», а также в лабораториях Института геохимии СО РАН, г. Иркутск и ИГЕМ РАН, г. Москва. Подготовка пробы к химическому анализу проводилась автором по единой методике.

Химический анализ минералов и стекол производился на рентгеноспектральном микроанализаторе “Camebax”, сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega3 SEM в Лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС.

2.5. Методы отбора вулканических газов и конденсатов

Пробы вулканического газа на вулкане Кизимен отбирались по стандартной методике в вакуумированные барботеры и ампулы Гигенбаха, содержащие 4N раствор щелочи (КОН или NaOH) с ацетатом кадмия или без него. На ТТИ-50 из-за большой примеси воздуха в вулканическом газе, пробы отбирались методом прокачки газа с помощью насоса через щелочной поглотитель для определения соотношений конденсируемых компонентов – воды и кислых вулканических газов (CO_2 , HCl, HF, SO_2).

Конденсаты вулканических газов ТТИ-50 и фумарол вулкана Кизимен были отобраны по «стандартной» методике (прокачиванием их насосом через охлаждаемые снего-водяной смесью два-три последовательно соединенных барботера) и проанализированы методами ICP.

2.6. Выводы к главе 2

1. В основу работы положены результаты исследования пеплов, отобранных методом геохимической снегосъемки, который в условиях удаленности и труднодоступности вулканов Камчатки, а также длительности снежного периода (7–9 месяцев) является наиболее доступным и результативным способом отбора проб пепла и позволяет оценить количество твердого и водорастворимого материала, выносимого при извержениях вулканов в окружающую среду.

На основе собственных экспериментов и литературных данных уточнена методика приготовления вытяжек из пепла: учет фоновых концентраций, оптимальное соотношение пепла и воды (15–200 г/л), время приготовления.

2. Проведенный анализ опубликованных работ показал, что при отсутствии полноценного отбора площадных проб пепла вблизи, в средней и дальней зонах от вулкана аппроксимация как экспоненциальной, так и степенной зависимостями убывания количества пепла с расстоянием от вулкана дает существенные ошибки в определении суммарной изверженной массы (объема) пепла. Для надежного подсчета

суммарного объема экспоненциальная аппроксимирующая зависимость должна иметь как минимум три сегмента, в противном случае итоговые оценки оказываются систематически заниженными [Bonadonna, Houghton, 2005]. Аппроксимация степенной функцией, хотя и дает лучшие результаты при отсутствии проб пепла в дальней зоне, но приводит к большим погрешностям (занышениям) при экстраполяции в ближнюю зону [Bonadonna, Houghton, 2005]; по данным [Широков, 1985] степенной показатель также не остается постоянным с расстоянием, что требует привлечения подходов, основанных на интерполяции по отдельным интервалам расстояний.

В данной работе использовались методы определения общей массы пепла, основанные на аппроксимации убывания количества выпавшего пепла с расстоянием от вулкана как экспоненциальной, так и степенной функциями. Выбор метода в каждом случае основывался на расположении точек отбора проб в зоне пеплопада.

Для повышения точности оценок количества изверженного пепла в условиях недостаточного числа отобранных проб пепла была разработана (с участием автора) методика оценки общей массы изверженного пепла на основе специально созданного программно-математического комплекса переноса/осаждения вулканического пепла. Она позволяет учитывать роль атмосферных процессов, а также восстанавливать суммарный гранулометрический состав и распределение изверженного материала по высоте, выполнить приближенную реконструкцию зоны пеплопада. Проведённые численные эксперименты показали, что оценки общей массы пепла, получаемые в рамках разработанного подхода, характеризуются устойчивостью относительно вариаций модельных параметров в диапазонах их неопределённостей, и достаточно хорошо согласуются с результатами, получаемыми на основе других методик, основанных на выводах теории конвективных струй и построении изолиний массы. Основное преимущество данного подхода связано с возможностью его использования в условиях, когда количество пепловых проб и объём сопутствующей информации о характере извержения сильно ограничены. В подобных ситуациях учёт конкретных особенностей пространственного распределения осаждённой массы для частиц в широком диапазоне размеров может предоставить важную информацию о пространственных масштабах переноса и, в конечном итоге, об объёмах наиболее лёгких фракций пепловых частиц.

Представляется, что при исследованиях конкретных эпизодов извержений наиболее надёжные оценки массы выброса можно получить, используя по возможности все перечисленные выше методы: энергетические, основанные на построении изопахит, а также на основе прямого численного моделирования атмосферного переноса. Такой комплексный подход позволяет максимально учитывать всю имеющуюся информацию об извержении, а также более надёжно контролировать ошибки, связанные с использованием конкретного метода.

3. Качественно новые данные получены в результате гранулометрического анализа тефры, который выполнялся комбинированным методом ситового анализа с промывкой водой и лазерной дифракции (с использованием лазерного дифракционного анализатора частиц).

ГЛАВА 3. ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В 2006–2013 ГГ.: МАССА И СОСТАВ ПЕПЛОВ

В главе дается описание объектов исследования – вулканов Безымянnyй, Кизимен, Шивелуч, Карымский, Жупановский, Ключевской, Алаид и их извержений в период с 2006 по 2013 гг., также Трещинного Толбачинского извержения в 2012–2013 гг., в изучении которых автор принимал участие. Кратко описан ход извержений, рассмотрен их геологический эффект, основное внимание уделено изучению продуктов с эксплозивной активности. Приведены результаты изучения валового химического и минералогического состава изверженной пирокластики.

3.1. Извержения Безымянного вулкана

Вулкан Безымянnyй, расположенный в центральной части Ключевской группы вулканов, после возобновления его активности в октябре 1955 г. является одним из наиболее активных вулканов Камчатки. В результате пароксизмального извержения 30 марта 1956 г. образовался большой обвально-взрывной кратер, в котором по настоящее время происходит рост экструзивного купола и связанные с ним эксплозивные извержения. С 1977 г., наряду с жесткими блоками, начали выжиматься вязкие лавовые потоки [Богоявленская и др., 1981]. С этого времени на вулкане ежегодно происходят 1–2 кратковременных эксплозивных извержения, характеризующиеся подъемом эруптивной колонны до 6–15 км н.у.м. и пирокластическими потоками длиной до 12.5 км. После извержение 1 сентября 2012 г. в течение четырех лет до декабря 2016 г. наблюдался период относительного покоя.

В 2006 г. произошло два эксплозивных извержения вулкана: 9 мая и 24 декабря, в 2007 г. – эксплозивные извержения в мае и октябре, а в ноябре – событие, связанное с обрушением фронта лавового потока, в 2008–2011 гг. – по одному эксплозивному извержению в год, в 2012 г. – эксплозивные извержения в марте и сентябре.

В данной работе подробно рассмотрены эксплозивные извержения 24 декабря 2006 г., 17 декабря 2009 г. и 9 марта 2012 г., которые происходили после установления снежного покрова и при отрицательных температурах, что позволило получить сугробовые вытяжки из пепла, незатронутые таянием. Также кратко описано извержение 14 апреля 2011 г.

Извержение 24 декабря 2006 г.

По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, сейсмическая подготовка этого извержения началась в конце ноября 2006 г. [Гирина и др., 2006]. 23 декабря по видеоснимкам впервые были отмечены раскаленные лавины, сопровождавшиеся подъемом облаков пепла до 600 м над вулканом (3.5 км н.у.м.). 24 декабря с 11:50 (здесь и далее время местное) по видео и визуальным данным наблюдались крупные лавины и эксплозии с подъемом пепла до 6.5 км н.у.м. и распространением шлейфов в северо-восточном направлении. Согласно сейсмическим данным кульминационная фаза извержения происходила 24 декабря с 21:17 до 22:10. Пепловая колонна в форме гриба поднялась до 13–15 км н.у.м., в колонне наблюдались вспышки молний (из сообщения сотрудников сейсмостанции “Козыревск”). По данным сотрудников Камчатской вулканологической станции в ночь с 24 на 25 декабря в п. Ключи выпал пепел со снегом (во время и после пеплопада в воздухе ощущался запах серы).

По спутниковым данным пепловое облако на высоте 9–10 км перемещалось в начале на северо-восток (азимут около 40°), постепенно меняя направление на восточное (в 150 км от вулкана – азимут 58° , в 740 км – 83°), и отмечалось на расстоянии до 850 км от вулкана. Наиболее четко пепловое облако размером 45×25 км зафиксировано на спутниковом снимке NOAA18 (25 декабря 2:54 UTC) в 150 км на северо-восток от вулкана, т.е. перемещалось со скоростью около 8 м/с.

При изучении проб пепла было отмечено неравномерное распределение его по обе стороны от оси пеплопада (рис. 3.1). Результаты метеозондирования атмосферы в районе п. Ключи (по данным ЗГМО “Ключи”) показали, что во время извержения на высотах 1–2.5 км отмечался ветер юго-восточных румбов ($115\text{--}175^\circ$) со скоростью 9–14 м/с, а на высотах 2.7–13 км преобладал юго-западный ветер ($215\text{--}245^\circ$) со скоростью 3–25 м/с. Этим объясняется расположение пеплового облака и выпадение материала из его нижних частей к северо-северо-западу от основной оси пеплопада.

Геологический эффект декабрьского извержения проявился в виде отложений тефры, лавового и пирокластического потоков. Судя по данным, приведенным в работе [Carter et al., 2008], пирокластический поток с южного склона купола прошел 6.5 км в юго-восточном направлении. На расстоянии около 5 км от кратера он повернул на восток-юго-восток. Отложения потока заполнили долину шириной 425 м и включали несколько языков, отклонившихся от основного русла. Общая площадь потока была

оценена по термальной аномалии (территория с температурой на 10°C выше фона) в 2.04 км² [там же]. Обследовать эти отложения сразу после извержения не удалось. В результате последующего извержения 12 мая 2007 г. они были частично перекрыты новым пирокластическим потоком.

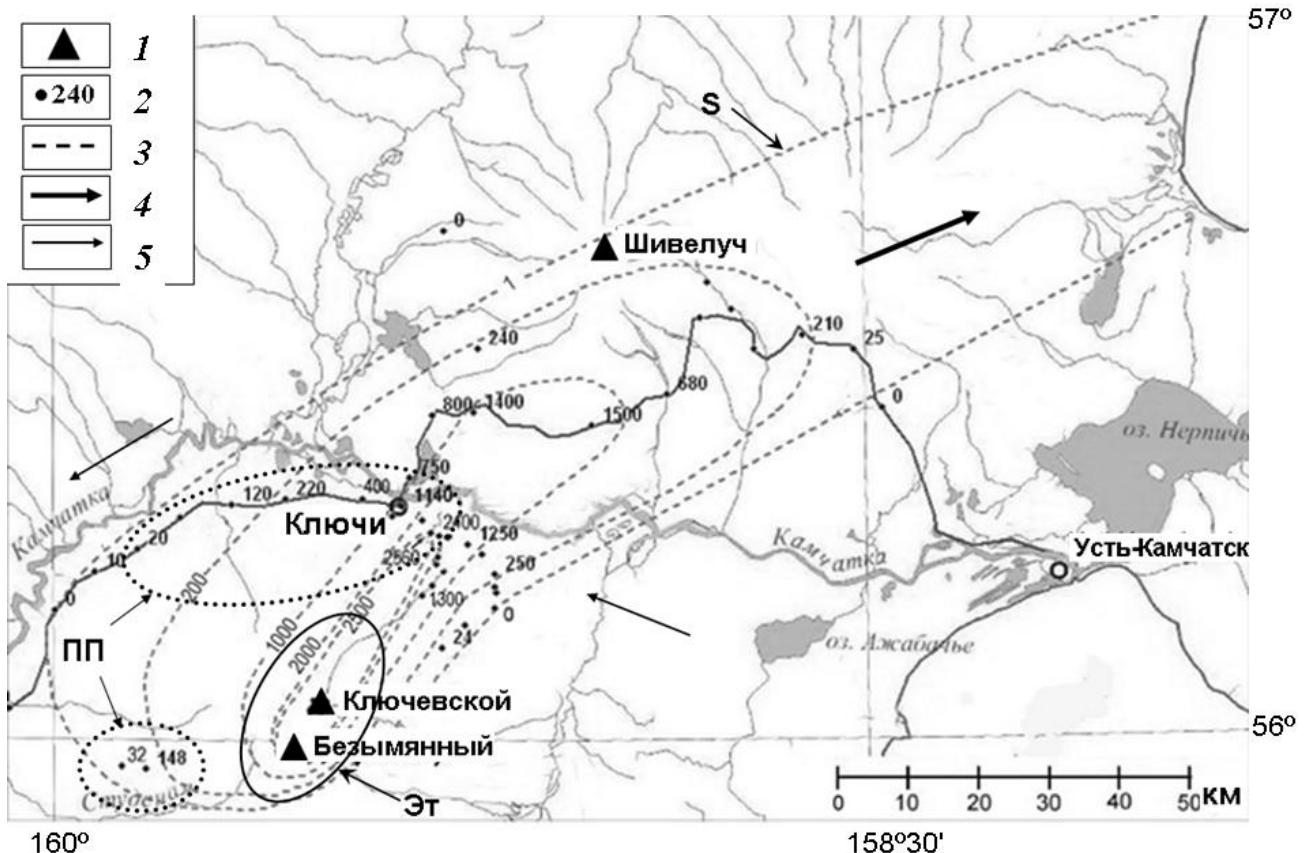


Рис. 3.1. Схема отложений пепла извержения Безымянного вулкана 24.12.2006: 1 – действующие вулканы, 2 – точки отбора и массы проб, г/м², 3 – изолинии массы пепла, г/м², 4, 5 – направление ветра в близи тропопаузы и на высотах <1.5 км, соответственно; Эт – схематичное положение границы эруптивной тучи, сформировавшейся в верхней части эруптивной колонны через 70 мин после начала извержения (снимок TERRA MODIS ch20b 10:30 UTC); ПП – зона отложений пепла с высотой менее 6 км (модельные расчеты [Моисеенко, Малик, 2015в]), S – граница зоны пепловых отложений по спутниковым данным NOAA.

По спутниковым изображениям в видимом и инфракрасном диапазоне на юго-восточном склоне купола был обнаружен лавовый поток длиной 625 м, шириной 200 м и площадью около 97200 м² [Carter et al., 2008].

Отложений грязевых потоков не было отмечено, что связано, вероятно, с небольшой мощностью снежного покрова на склонах вулкана в начале зимы.

Отложение пепла происходило на снег, что позволило во время полевых работ в январе–марте 2007 г. отобрать 40 образцов пеплов из шурfov, расположенных на расстоянии 23–80 км от вулкана, по оси и поперек пеплопада (рис. 3.1, Приложение 1).

Так как с декабря 2006 г. также происходило извержение вулкана Шивелуч, часть отложений тефры вулкана Безымянnyй, не перекрытых снегом, перемешалась с пеплом Шивелуча, усиление активности которого отмечалось 26–27 декабря с распространением пеплопадов в восточных направлениях. В настоящей работе рассматриваются только чистые пробы пепла вулкана Безымянnyй, без примеси материала Шивелуча, которая определялась по наличию в пеплах зерен роговой обманки.

Также были изучены вулканические бомбы, отобранные на седловине между вулканами Камень и Безымянnyй. Бомбы размером 5–10 см были впаяны в снег и окружены корочкой льда, что говорит об их высокой температуре во время падения.

На основании изучения пепла в 40 точках, а также спутниковых снимков, составлена схема распространения отложений тефры (рис. 3.1). Пеплопадом было охвачено более 8000 км^2 территории полуострова. Форма изолиний массы тефры ($\text{г}/\text{м}^2$) была принята эллиптической. Общая масса тефры, оцененная по формулам В.А. Широкова [1985, формулы 18–21], составила 5.5–7 млн т, принимая степенной показатель 1.8, полученный из графика (рис. 3.2), для ближней зоны – 1.5, для дальней – 2.5–3. При интегрировании степенной функции (рис. 3.2) в пределах 0.1–200 км по методу, предложенному [Bonadonna, Houghton, 2005] было получено ~ 8.5 млн т. Было учтено, что данный метод завышает оценки при отсутствии точек отбора в ближней зоне [там же]. По методам [Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000] оценка составила 4–4.3 млн т (рис. 3.2). Если учесть, что использование экспоненциальной зависимости при отсутствии данных в одной или нескольких зонах (в данном случае – в ближней), занижает реальную изверженную массу пепла на 20–65% [Bonadonna, Houghton, 2005], то значения массы изверженного пепла могут составлять 5.4–9.7 млн т. С использованием результатов численного моделирования атмосферного переноса пепловых частиц на основе модельного комплекса RAMS/HYPACT [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015б] были получены значения от 4 ± 0.4 до 4.8 ± 0.5 млн т для массы частиц размером $\leq 500 \text{ мкм}$; а с учетом более крупных фракций (до 32 мм) на основании суммарного гранулометрического состава отложений пеплопада извержения вулкана Руапеху, схожего с изучаемым [Bonadonna, Houghton, 2005], можно предположить вдвое большую оценку ~ 8 млн т. Таким образом, оценки, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой и находятся в пределах 5.4–8.5

млн т. Было принято среднее значение 7 ± 1 млн т или 0.004 км^3 (в пересчете на объемный вес уплотненного пепла¹ $1.7 \text{ г}/\text{см}^3$).

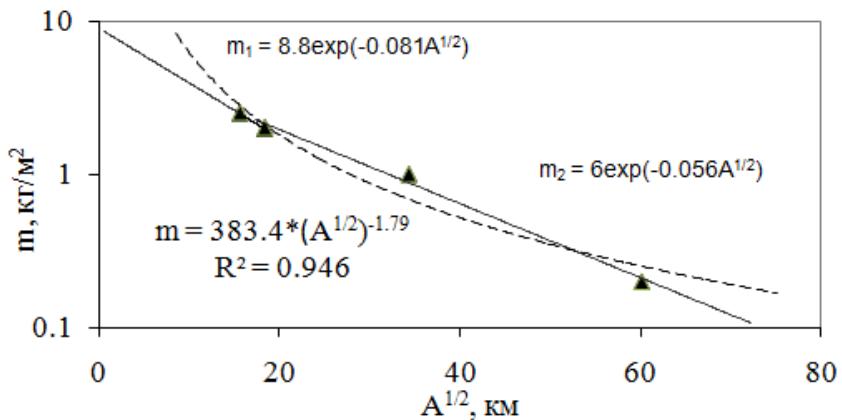


Рис. 3.2. Масса пепла на м^2 (в логарифмическом масштабе) от квадратного корня из площади, ограниченной изолинией массы, для проб пепла извержения вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г. Показаны линии трендов с уравнениями.

Объем отложений пирокластического потока при длине 6.5 км, ширине до 425 м и площади более 2 км^2 оценивается в $0.006\text{--}0.008 \text{ км}^3$ из предположения, что его средняя мощность по аналогии с потоками предыдущих извержений [Белоусов и др., 1998; Малышев, 2000; Girina, 2013] составляет 3-4 м. Полагая плотность сложения породы для заполнителя ПП равной $1.6 \text{ кг}/\text{м}^3$ [Гирина, 1998], получим массу отложений ПП $9\text{--}13 \cdot 10^6 \text{ т}$.

Общий объем пирокластического материала извержения составил $0.01\text{--}0.012 \text{ км}^3$ (15–21 млн т), что соответствует извержениям средней силы, характерным для периода активности вулкана Безымянный после 1956 г. [Жаринов, Демянчук, 2011; Girina, 2013].

Извержение 17 декабря 2009 г.

Сейсмическая подготовка извержения началась 8 декабря, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН². Кульминационная фаза эксплозивного извержения, по сейсмическим данным (КФ ФИЦ ЕГС РАН), происходила 17 декабря с 9:45 до 12:00, в дальнейшем до 16:00 отмечалась небольшая сейсмическая активность. На основании анализа сейсмограмм, графиков амплитуды огибающей сейсмического сигнала и акустических данных сделан вывод, что извержение 2009 г. началось с сильной эксплозии взрывного типа с резкой фрагментации лавового материала [Махмудов и др., 2011]. Длительность этого наиболее сильного события 160 с, длительность же всего извержения 120 мин.

¹ Вычислен автором по результатам замеров объема и массы сухого уплотненного пепла данного извержения в лабораторных условиях.

² <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>

После взрывной фазы происходило формирование пирокластических потоков на юго-восточном склоне, длина их отложений составила около 5 км. По спутниковым данным также предположительно происходило выжимание лавы на склон купола [Гирина и др., 2011].

В этот день по спутниковым снимкам наблюдалось пепловое облако на расстоянии до 370 км на северо-запад от вулкана на высоте около 8 км н.у.м. (по данным АВО). В п. Козыревск 17 декабря с 10:20 до 11:30 отмечался сильный пеплопад и дальше до 15:00 – слабое выпадение пепла. Размер пеплового облака на расстоянии 350 км – 75x40 км [Гирина и др., 2011].

В результате полевых работ в декабре 2009 – апреле 2010 гг. было отобрано 25 проб пепла с вмещающим снегом на расстоянии 22–56 км от вулкана (рис. 3.3, Приложение 2). По данным отбора проб пепла ось пеплопада прошла в районе п. Козыревск, где выпало до 800 г пепла на m^2 , и имела азимут 280–285°. По данным зондирования ветер соответствующих направлений наблюдался на высотах 5–9 км н.у.м. со скоростью 22–24 м/с. Ширина отложений пепла в районе п. Козыревск, т.е. на расстоянии 45 км от вулкана, составила 30–35 км (рис. 3.3).

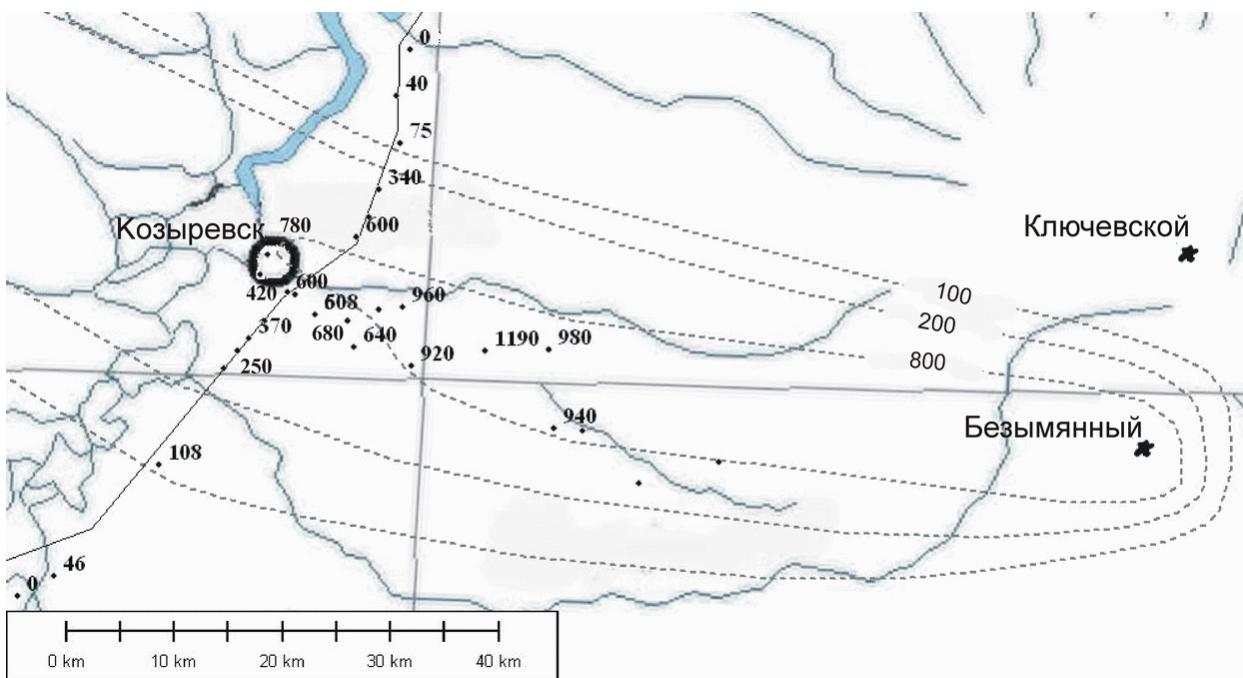


Рис. 3.3. Схема распределения отложений пепла извержения вулкана Безымянный 17 декабря 2009 г. Условные обозначения как на рис. 3.1.

Построив изолинии массы пепла на m^2 и приняв их форму эллиптической, общая масса тефры была посчитана по формулам [Fierstein, Nathenson, 1992] из предположения экспоненциальной зависимости массы пепла на m^2 от квадратного корня из площади

ограниченной изолинией с данной массой пепла, и составила около 3.5 млн т (рис. 3.4). Так как точки отбора площадных проб пепла имеются только в средней зоне пеплопада, данный метод может занижать оценки изверженной массы на 20–65% [Bonadonna, Houghton, 2005]. По формуле [Legros, 2000] минимальный объем тефры составил 3 млн т. По расчетам с помощью модельного комплекса [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015б] масса изверженного пепла (≤ 1 мм) варьировала около 4.4 млн т.

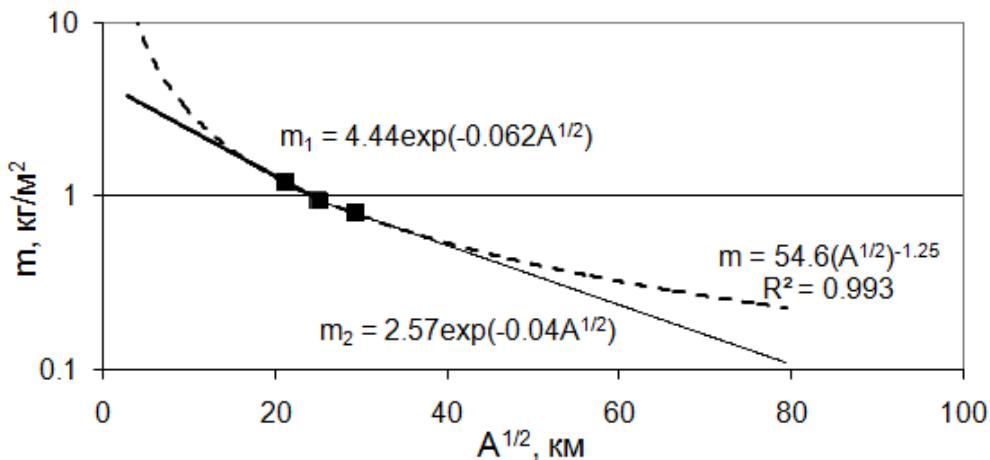


Рис. 3.4. Масса пепла на м^2 (в логарифмическом масштабе) от квадратного корня из площади, ограниченной изолинией массы, для проб пепла извержения вулкана Безымянный 17 декабря 2009 г. Показаны линии трендов с уравнениями.

Извержение 14 апреля 2011 г.

В апреле 2011 г. произошло очередное эксплозивное извержение вулкана. Пепловый шлейф распространился в северо-западном направлении. Сотрудниками Камчатской вулканологической станции было отобрано 8 площадных проб пепла поперек направления распространения шлейфа, что позволило определить ось пеплопада, на которой в 40 км от вулкана выпало 480 г/м^2 пепла. При полевом обследовании у подножия вулкана были обнаружены свежие пирокластические отложения, протяженность которых составила – 6.5 км, площадь 5.8 км^2 , объем 0.01 км^3 [Гирина и др., 2012].

Была проведена одна изолиния массы пепла (480 г/м^2) и подсчитана минимальная масса выброшенного пепла по формуле [Legros, 2000], которая составила ~0.4 млн т. Учитывая, что в 70% случаев минимальный объем, оцененный по одной изолинии, не более чем в 2 раза меньше оцененного с использованием большого числа изолиний [там же], можно предположить массу изверженного пепла в пределах 0.6–0.8 млн т.

Извержение 9 марта 2012 г.

По сейсмическим данным эксплозивное извержение происходило 9 марта с 9:27 до 10:10. По видеокамерам наблюдалось пепловое облако до высоты около 8 км н.у.м., перемещающееся на северо-восток. По данным AVO, в 11:24 пепловый шлейф длиной ~200 км протягивался на северо-восток на высоте ~6 км н.у.м.³

29 марта автором работы было проведено обследование подножия вулкана. В его юго-восточной части, в каньоне, начинающемся от крутостенного фронта лавового потока 2009 г. на высоте 2000 м, были обнаружены горячие обвалально-пирокластические отложения. Ширина отложений в верхней части – 50 м, в нижней – при выходе из каньона – несколько шире. Длина бесснежных, еще теплых, отложений составила около 800 м, явно выделяемый в виде вала высотой 1 м фронт находился в 2.6 км от вершины вулкана. На отложениях не было замечено ни выходов вторичных фумарол, ни запаха вулканических газов. Стоит отметить, что по данным Ю.В. Демянчука, проводившего обследование двумя неделями раньше, спустя неделю после извержения, отложения распространились на 4 км, хотя в нижней части были уже также прикрыты снегом. Из всего сказанного следует, что фаза формирования ПП этого извержения была маломощная и дополнена обвалом/обрушением фронтальных частей лавовых потоков прошлых извержений. О формировании подобных отложений (глыбово-пепловых ПП) при извержениях вулкана Безымянный указано в работе [Белоусов и др., 1998].

В результате полевых работ отряда Ключевской вулканологической станции и Вулканологического отряда в марте 2012 г. было отобрано 15 площадных проб пепла со снегом на расстоянии 3–20 км от вулкана (рис. 3.5, Приложение 3). Еще в нескольких точках было зафиксировано его отсутствие или наличие. Ось пеплопада прошла в районе базы «Апахончик», где выпало около 900 г пепла на м²; пеплопад отмечался в п. Усть-Камчатск, где выпало около 10 г/м² пепла. Сопоставляя направление оси пеплопада, выявленной по распределению массы выпавшего пепла, с данными атмосферного зондирования в пос. Ключи за 8.03.12 12:00 ч. и 9.03.12 00:00 ч., высота перемещения пеплового облака не превышала 6 км.

Масса выпавшего пепла, оцененная с помощью формул [Fierstein, Nathenson, 1992] на основе трех построенных изолиний (1, 0.9 и 0.01 кг), составила примерно 0.2 млн т, что является нижней границей возможной оценки, т.к. данный метод подсчета

³ <ftp://www.emsd.ru/pub/DATA/RTS/Volcanoes/>

массы пепла при недостатке проб дает занижения от 20 до 65% [Bonadonna, Houghton, 2005]. Исходя из количества и расположения точек отбора проб, определяющих точность проведения изолиний, можно предположить суммарную массу изверженного пепла 0.4–0.6 млн т (~0.5 млн т).

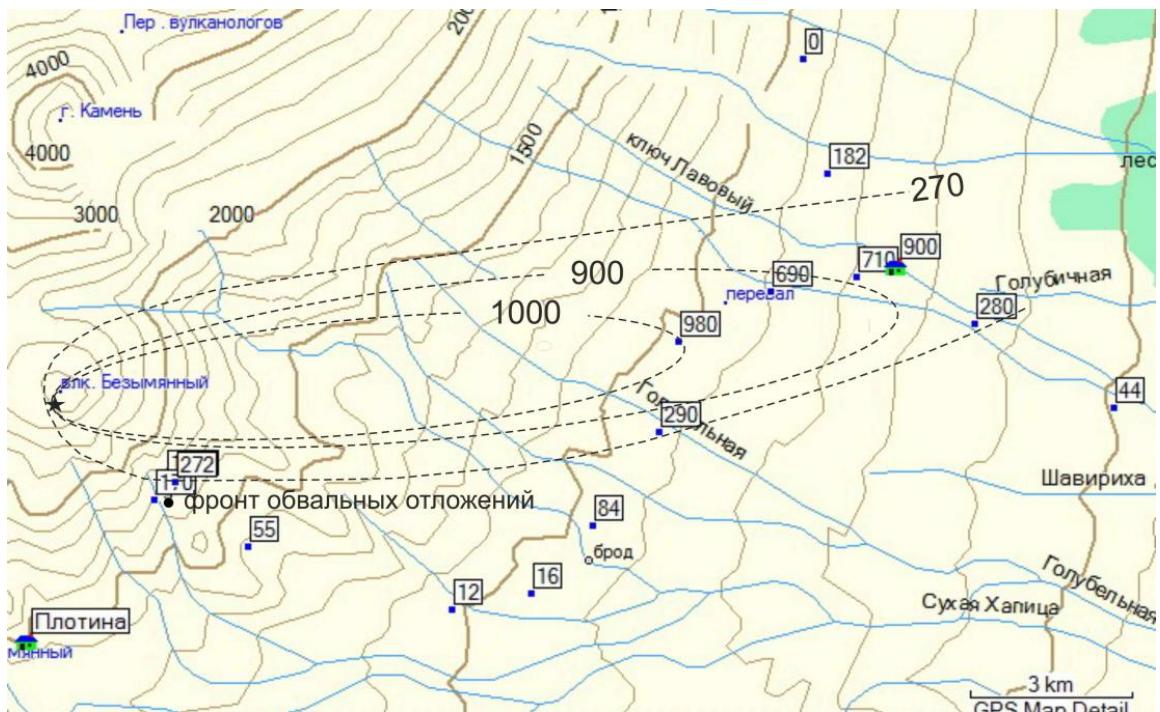


Рис. 3.5. Схема распределения отложений пепла извержения вулкана Безымянnyй 9 марта 2012 г. Условные обозначения как на рис. 3.1.

Общая характеристика извержений вулкана Безымянnyй

Рассмотренные извержения вулкана Безымянnyй 24.12.2006, 17.12.2009, 14.04.2011 и 9.03.2012 гг. имеют сходный кратковременный – мгновенный (импульсный) характер, с длительностью эксплозивной стадии от ~ 40 до 120 мин. Кульминационная стадия извержения, как правило, характеризуется сильным взрывом субплинианского типа, с последующим формированием пирокластических потоков. Можно отметить, что извержение 8 марта 2012 г. было слабее остальных, что видно по амплитуде сейсмических событий, высоте подъема пеплового облака, массе изверженного материала, а также преобладанию обвальных в отложениях глыбово-пепловых пирокластических потоков.

Результаты изучения 4-х извержений (рис. 3.6а) показали, что количество пепла, выброшенное во время эксплозивной стадии, зависит от высоты эруптивной колонны, возможно, благодаря близкой длительности кульминационных эксплозий Безымянного вулкана. Подобная зависимость уже отмечалась для извержений других вулканов

[Mastin et al., 2009]. Ранее в работе С.А. Федотова [1982] были приведены зависимости между высотой выброса и тепловой мощностью источника (расходом пирокластики), причем показатель степенной функции в большинстве формул был ~4, что близко к полученному (рис. 3.6а). При добавлении на график данных для кульминационного взрыва 1956 г. (35–40 км, ~600–650 млн т пепла⁴ [Богоявленская и др., 1985]) зависимость практически не меняется (рис. 3.6б).

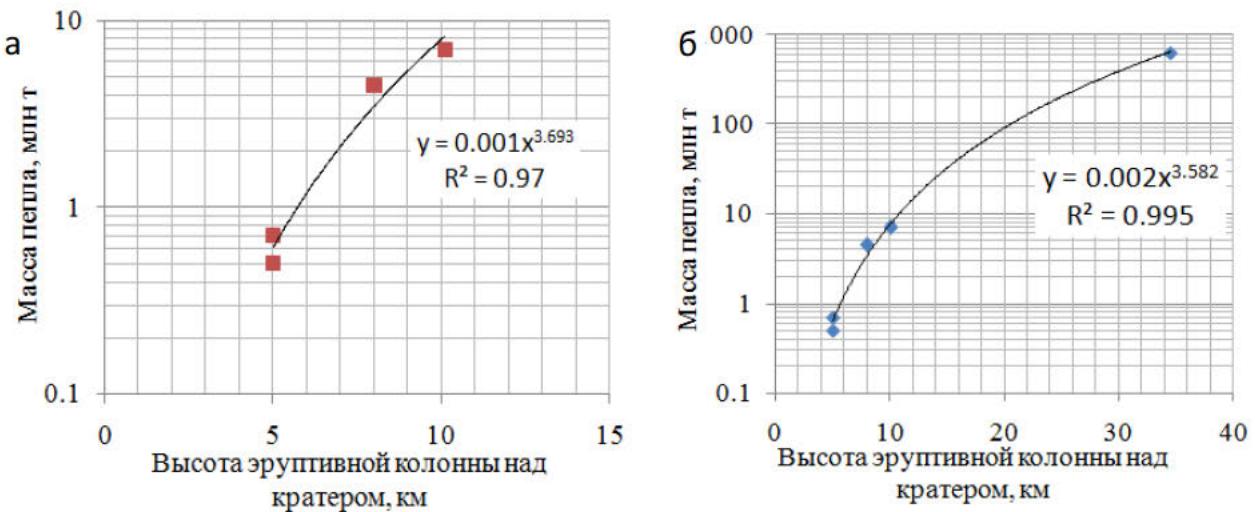


Рис. 3.6. Зависимость массы выброшенного пепла от высоты эруптивной колонны для четырех изученных извержений (а), для четырех изученных извержений и пароксизма 30.03.1956 (б).

Используя выявленную зависимость (рис. 3.6) и высоты эруптивных колон по [Гирина и др., 2014; Girina, 2013] для шести похожих извержений, произошедших в рассматриваемый период, получаем приблизительную массу выброшенного пепла: 13 млн т для 9.05.2006 (15 км н.у.м.), 0.8 млн т – 11.05.2007 (8 км), 2 млн т – 14.10.2007 (10 км), 1.2 млн т – 19.08.2008 (9 км), 2 млн т – 31.05.2010 (10 км), 2–5 млн т – 1.09.2012 (10–12 км). Всего за период 2006–2013 гг. вынос тефры вулканом Безымянnyй составил около 35 млн т или 4.5 млн т в год (Приложение 4).

3.2. Извержение вулкана Кизимен (2010–2013 гг.)

Вулкан Кизимен находится в центральной части Восточного вулканического пояса Камчатки в зоне сочленения Щапинского грабена и горста хребта Тумрок, осложненной системой сбросов северо-восточного простирания. Вулкан представляет собой одиночный конус высотой 2376 м, сложный по морфологии, с выступами экструзивных куполов и крупноглыбовыми лавовыми потоками. Породы первых трех

⁴ В работе [Богоявленская и др., 1985] приводится объем пепла 0.4–0.5 км³, взята плотность пепла 1.5 г/см³

этапов эруптивной активности вулкана, начавшейся около 11 тыс. лет назад, представлены роговообманковыми андезитами и дацитами; последний четвертый этап отличался излиянием лавовых потоков андезибазальтов и базальтов [Мелекесцев, 1992]. Для вулкана характерны эксплозивно-экструзивно-эффузивные извержения.

Так как единственное извержение вулкана Кизимен, отмеченное ранее в историческое время, в 1928–29 гг. [Пийп, 1946], в то время не изучалось, то начавшаяся в 2010 г. его новая активизация является первой возможностью для изучения свежих изверженных продуктов этого вулкана.

Динамика извержения

Извержение, начавшееся в октябре 2010 г. с образования 2-х газовых выходов и небольших газо-пепловых выбросов из них, 10 декабря перешло в активную эксплозивную стадию: практически непрерывно отмечались пепловые шлейфы разной длины и насыщенности, даже при слабых выбросах пирокластики – формирование пирокластических потоков преимущественно в юго-восточном секторе вулкана. Их отложения вызвали прохождение мощного лахара по долине руч. Поперечный 13 декабря 2010 г. В конце февраля 2011 г. на восточном склоне вулкана был замечен лавовый поток длиной около 200–300 м, интенсивность эксплозивной деятельности несколько снизилась, а в декабре 2011 г. прекратилась. В апреле–мае 2012 г. излияние лавы сократилось, а на кромке кратера начали выжиматься жесткие блоки. Эта экструзивная стадия извержения, сопровождалась раскаленными лавинами и иногда более крупными обрушениями, изредка дополнялась кратковременными эксплозиями [Малик и др., 2012]. С октября 2013 г. активность вулкана снизилась: при работе в районе вулкана 12–15 октября и по видео наблюдениям (северный склон) с 1 октября отмечалась только парогазовая активность, хотя, по данным КФ ГС, до конца октября регистрировались сейсмические события, интерпретируемые как «возможные слабые газо-пепловые выбросы и сход лавин», а до конца ноября – свечение и термальная аномалия над вершиной вулкана.

Продукты извержения

Основной материал для данной работы составили пеплы, которые были выброшены во время активной эксплозивной стадии (декабрь 2010 – март 2011 гг.), а также в декабре 2011 г., и отобраны в течение соответствующего зимнего периода, т. е. не были подвержены промыванию талыми водами. Это позволило оценить не только

общую массу тефры, но и количество водорастворимых веществ, поступивших на земную поверхность в результате эксплозивного извержения. Также были отобраны: материал ПП, лавового потока, отложений раскаленных лавин под растущей экструзией, что позволило получить полное представление об изверженном материале.

Состав поверхностных водотоков изучался на примере р. Левая Щапина и её притоков, в первую очередь, ручья Поперечного, берущего начало из оз. Теплякова на восточном склоне вулкана и дренирующего практически на всем течении толщу пирокластических отложений. Также были отобраны пробы из озера Теплякова и 2-х подпрудных озер, образованных отложением толщ пирокластики в долине ручья чуть ниже [Мельников и др., 2011, рис. 10]. Кроме того, было приготовлено несколько водных вытяжек из лавы.

Характеристика пеплов

С декабря 2010 г. по март 2011 г. пеплопадами была охвачена территория полуострова Камчатка от п. Тигиль до г. Петропавловск-Камчатский общей площадью 100 тыс. км². Во время полевых работ было проведено шурфование снежной толщи примерно в 100 точках и отобраны около 200 образцов пепла. Также было отобрано несколько проб пепла со снегом в декабре 2011 г., когда эксплозивная деятельность уже почти прекратилась (Приложение 5).

Для подсчета массы тефры, изверженной вулканом к концу февраля, на карту был нанесен суммарный вес пепла в каждой точке (рис. 3.7), территория вокруг вулкана разделена на сектора, в каждом из которых была посчитана общая масса по формулам [Широков, 1985], затем суммирована. В результате масса изверженного за 3 месяца пепла составила ~10 млн т.

Кроме этого исследовались отдельно отложения крупных выбросов на основе послойного отбора пепла из снежных шурфов и их временной привязки. Так были выделены и закартированы отложения эксплозий 13 и 28 декабря 2010 г., 1, 7 и 13 января 2011 г. (время местное).

Первые мощные эксплозии произошли 13 декабря 2010 г.; пепловый шлейф распространился в северо-северо-западном направлении, пепел выпадал в поселках Козыревск, Атласово, Лазо, Анавгай, Тигиль (310 км от вулкана). В это время, вероятно, произошла основная проработка эруптивного жерла. Пеплы этих событий имеет

наиболее крупнозернистый состав. Минимальная масса пепла, выброшенного в ходе данного события, оцененная по формуле [Legros, 2000] составила 0.6 млн т.

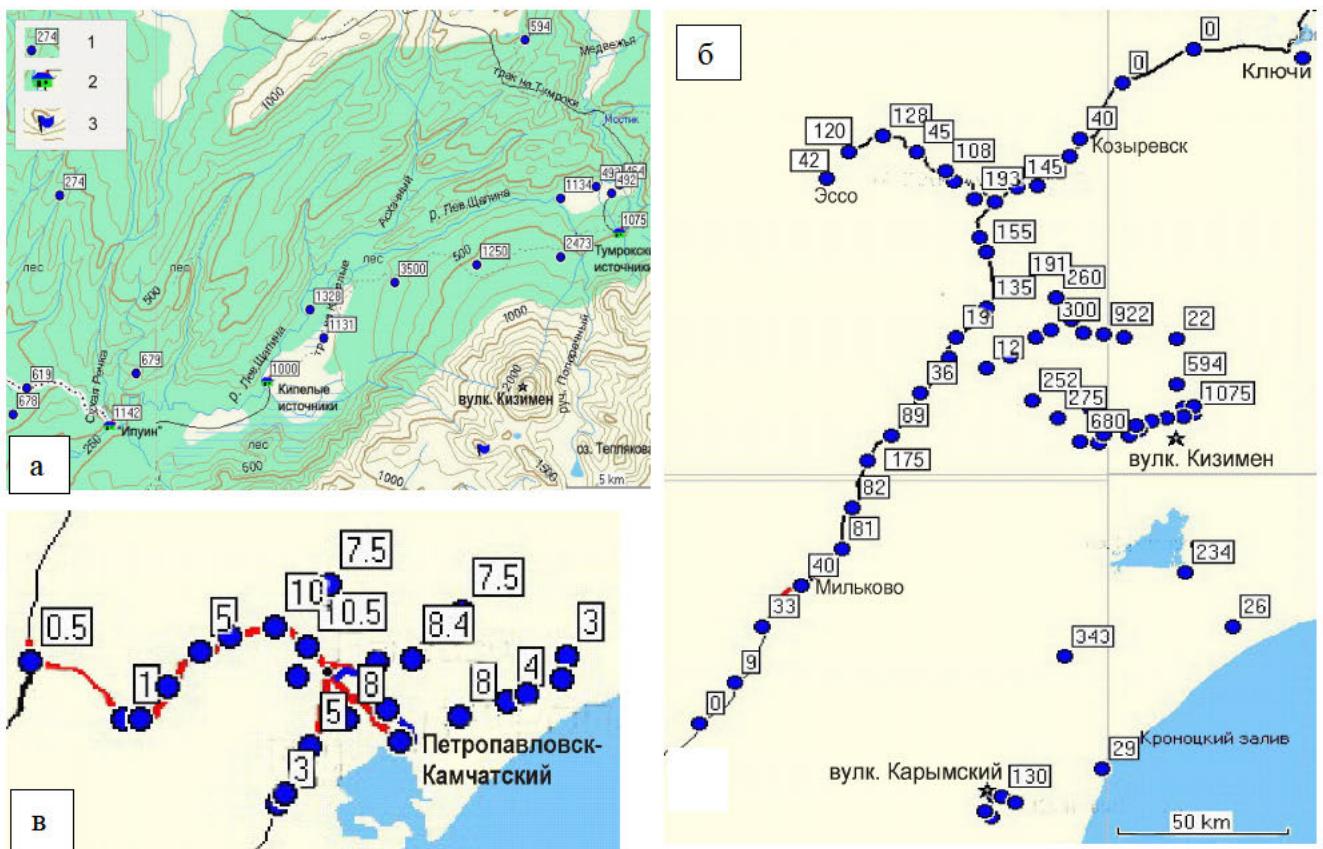


Рис. 3.7. Схемы точек отбора проб пепла вулкана Кизимен: а – вблизи вулкана Кизимен, б – общая, в – в районе г. Петропавловск-Камчатский. 1 – точки отбора проб пепла и масса пепла ($\text{г}/\text{м}^2$), 2 – базы отдыха и кордоны, 3 – место отбора пемзовых лапилли.

28 декабря пепловый шлейф распространился на запад от вулкана, отложения которого образовали в этом секторе нижний и наиболее мощный горизонт пепла в снежном разрезе. В 23 км от вулкана выпало более 0.5 кг пепла на м^2 (рис. 2.1а). Интересно также, что вытяжки из материала этого пеплопада имеют наибольшую минерализацию, около 1.5 г на 100 г пепла, несмотря на более крупнозернистый состав (Приложение 5, рис. 4.7). Масса пепла, оцененная по формулам [Legros, 2000; Fierstein, Nathenson, 1992] составила 0.3-0.34 млн т.

Утром 1 января 2011 г. (по данным КФ ГС) произошла серия сейсмических событий, сопровождавших сильные эксплозии. Пеплопад достиг г. Петропавловск-Камчатский и Елизово (250 км от вулкана), где выпало до 10 г пепла на м^2 (рис. 3.7в). Масса пепла, подсчитанная на основе 4-х изолиний (10, 25, 130 и 345 $\text{г}/\text{м}^2$) составила около 2.1 млн т. С помощью инфразвукового сигнала, сопровождавшего это эксплозивное событие, была получена оценка – $4 \times 10^6 \text{ м}^3 \times 1.4 \text{ т}/\text{м}^3 = 5.6 \times 10^6 \text{ т}$ тонкого пепла [Гордеев и др., 2013б].

7 января пепловый шлейф накрыл кордон Кроноцкого заповедника на источниках Кипелые (14 км к западу от вулкана). Стало темно как ночью, выпало около $300 \text{ г}/\text{м}^2$, примерно столько же и на кордоне «Ипуйн».

Наиболее детально были изучены отложения эксплозивного события 13.01.2011 г. [Моисеенко, Малик, 2015а] для которого было отобрано 15 площадных проб пепла (рис. 3.8). Масса выброшенного пепла была рассчитана по формуле [Legros, 2000] для оценки минимального объема – 0.65 млн т, по трем построенным изолиниям массы: 120, 160 и $200 \text{ г}/\text{м}^2$ по методу [Fierstein, Nathenson, 1992] – 1.2 млн т и с использованием модели переноса [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015б] – 1.2 млн т (соответствующий 95% доверительный интервал значений составляет 0.7–1.7 млн т).

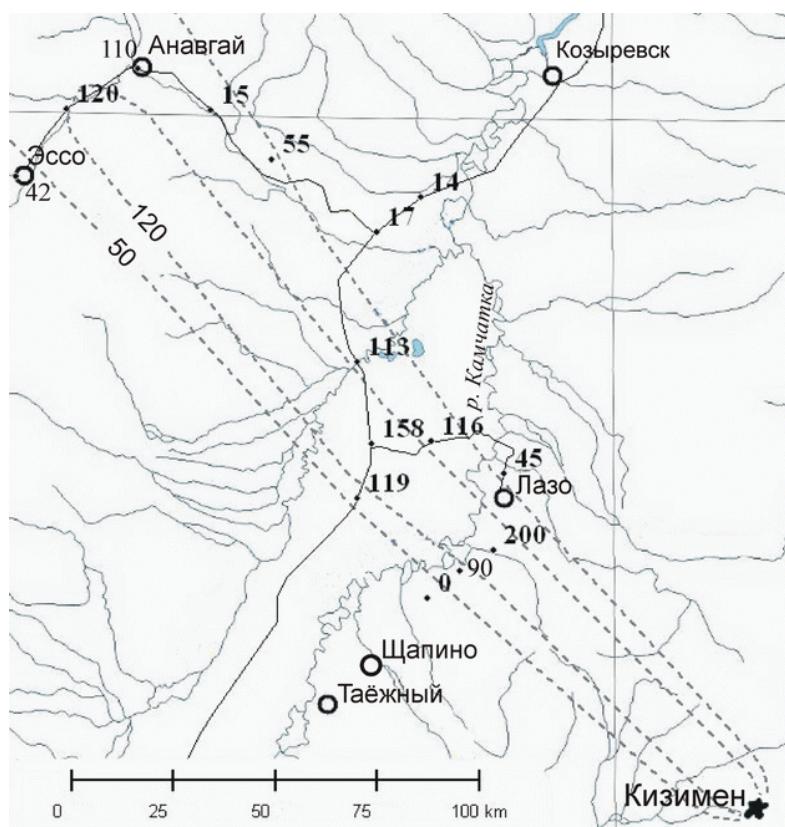


Рис. 3.8. Схема распределения точек отбора и отложений пепла извержения вулкана Кизимен 13 января 2011 г. Условные обозначения как на рис. 3.1.

Кроме этих описанных пеплопадов, мощные эксплозии, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, отмечались 23 и 25 января, периодически с 12 по 25 марта и 2 мая.

Необычной особенностью этого извержения является то, что ПП формировались даже при слабых выбросах пирокластики. Временами наблюдалось практически непрерывное их формирование преимущественно в юго-восточном секторе вулкана, и очень редко на западных склонах. Данная особенность отразилась в гранулометрическом составе пеплов.

3.3. Активность вулкана Шивелуч

С 1980 г. наблюдается постоянная активность вулкана Шивелуч, которая связана с ростом экструзивного купола в кратере извержения 1964 г., сопровождающимся обрушениями, раскаленными лавинами и связанными с ними небольшими пепловыми шлейфами. Периодические усиления эксплозивной деятельности выражаются в пепловых выбросах и формировании пирокластических потоков.

В отличие от кратковременных эксплозивных извержений вулкана Безымянного, протекающих чаще всего в неменяющейся метеорологической обстановке, распределение отложений пеплопадов извержений вулкана Шивелуч сложное, подобно извержению вулкана Кизимен.

Активизация вулкана Шивелуч зимой 2006–07 г.

После более чем годового периода покоя 4 декабря 2006 г. вулкан Шивелуч возобновил свою эксплозивную деятельность. Повышенная активность сохранялась в течение 2007 г. Практически постоянно здесь наблюдались раскаленные лавины, с которыми связано формирование небольших пепловых шлейфов. Реже (21 за 2007 г.) отмечались эксплозии разной силы, пепел которых достигал высоты 10 км и распространялся более чем на 400 км в разных направлениях от вулкана [Жаринов, Демянчук, 2013]. Эксплозии обычно также сопровождались раскаленными лавинами и ПП. Такой характер активности позволил объяснить разделение шивелучских пеплов по ряду признаков на две группы (рис. 3.9):

I – эксплозивные пеплы – крупнозернистые темные пеплы, образовавшиеся в результате сильных эксплозий; на расстоянии 25–50 км от вулкана преобладает фракция 0.125–0.5 мм, пылеватая фракция составляет здесь менее 20 % (см. п. 4.1.3);

II – тонкие рыжие пеплы, отложившиеся из облаков, поднимающихся над движущимися лавинами и ПП; пылеватая фракция преобладает (~70 %) даже на расстояниях 5–20 км (см. раздел 4.1.3).

Зачастую встречаются пеплы смешанного состава, подобно рассмотренным выше пеплам вулканов Безымянный и Кизимен.

К середине марта, т.е. за первые 3.5 месяца извержения, пеплопадами была охвачена практически вся территория вокруг вулкана в радиусе более 100 км, т.е. более 30 тыс. км². На основании изучения 70 площадных проб пепла (Приложение 6) и распространения шлейфов по спутниковым снимкам территории вокруг вулкана была

разделена на пять секторов (рис. 3.10), для которых были проведены средние изолинии массы тефры и подсчитана общая масса по формулам из работы [Широков, 1985]. За это время было вынесено около 2.5 млн т пепла.



Рис. 3.9. Отложения крупнозернистых (тип 1, нижний горизонт) и пылеватых (тип 2, верхний горизонт) пеплов в 4 км на запад от купола вулкана Шивелуч

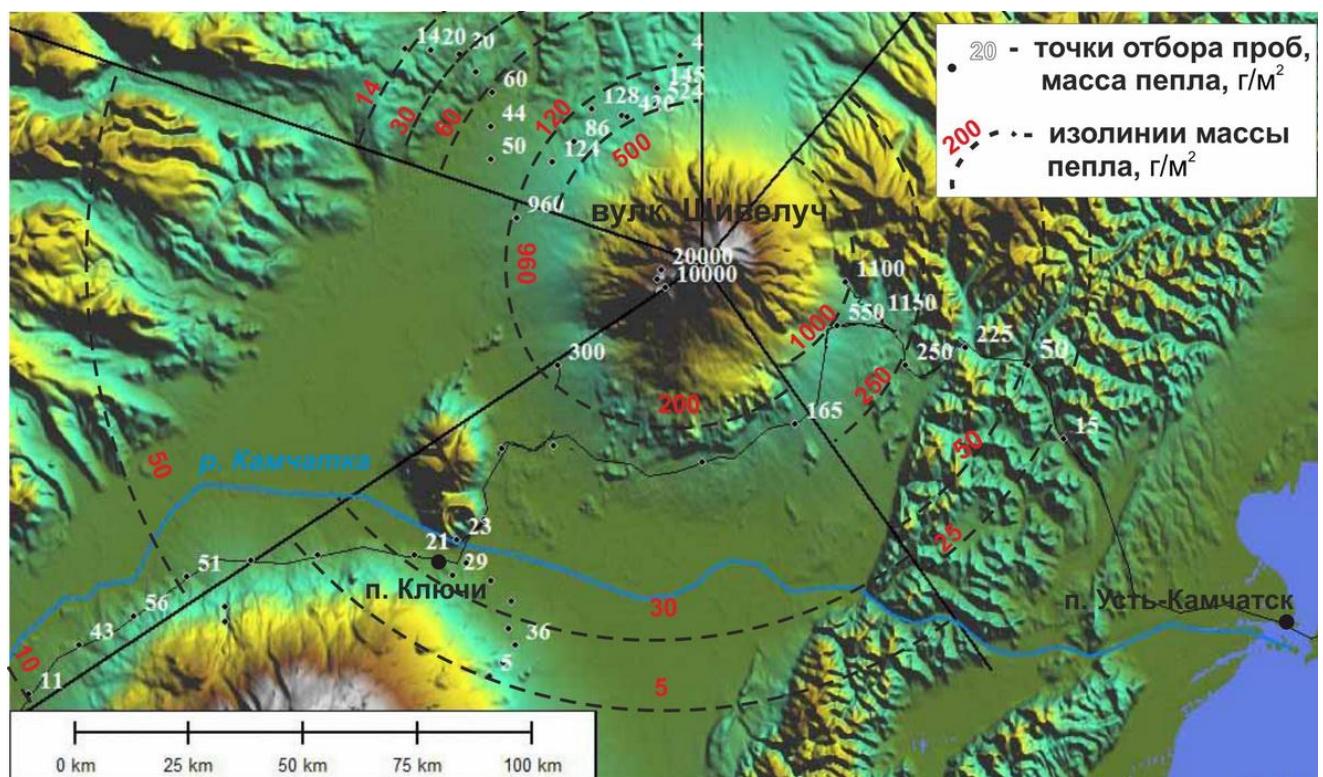


Рис. 3.10. Распределение отложений пепла вулкана Шивелуч зимой 2006–07 гг.

Предполагая на основании сейсмических и спутниковых данных примерно одинаковую активность в течение 2007 г., общая масса выброшенных за год пеплов составила около 8–9 млн т.

Активизации 27–29 октября 2010 г.

В 2008 г. эксплозивная активность вулкана была низкая. В начале 2009 г. произошло усиление как экструзивной, так и эксплозивной активности вулкана, за год

было отмечено 22 выброса. Высокая активность сохранилась и в 2010 г., было зарегистрировано 25 пепловых выбросов [Жаринов, Демянчук, 2013]. 28 октября (мест. вр.) произошло одно из крупнейших извержений после 1980 г. Была разрушена значительная часть постройки с ЮВ стороны. Агломератовые и пирокластические отложения распространились на 20 км от купола. На спутниковых снимках 28 октября в 06:01 (через 4 ч после начала кульминационной фазы) пепловое облако над вулканом имело диаметр 20 км и высоту 10 км н.у.м. В 11:31 пепловое облако распространилось уже на 360 км от вулкана в юго-восточном направлении [Овсянников, Маневич, 2010]. По сообщению из поселка Усть-Камчатск, там с 06:00 до 12:00 прошел сильный пеплопад, во время которого наступил полный мрак, и видимость не превышала 5 м. По сейсмическим данным эксплозивная активность продолжалась 29–30 октября. Максимальная протяженность пеплового шлейфа, по спутниковым снимкам, составила 1500–2500 км. Сотрудниками Камчатской вулканологической станции было отобрано 15 проб пепла вдоль дороги Ключи–Усть-Камчатск (рис. 3.11). По расчетам [Жаринов, Демянчук, 2013], отложения пепла покрыли площадь 2000 км², общая масса пепла составила 7.8 млн т. По расчетам автора с использованием формулы [Legros, 2000] минимальный объем тефры составил 15 млн т.

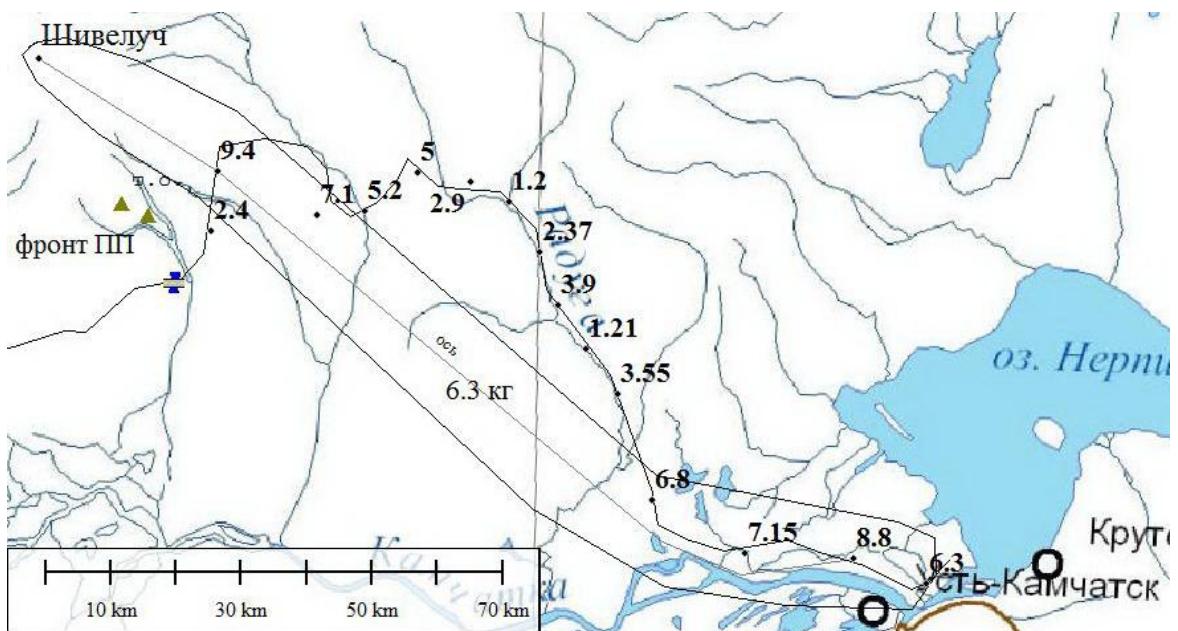


Рис. 3.11. Распределение отложений пепла активизации вулкана Шивелуч в октябре 2010 г.

В последние годы сохранялась типичная для вулкана активность. В работе использованы также результаты обработки проб пепла некоторых эксплозивных событий 2009–12 и 2014–16 гг.

Общий объем изверженных продуктов

По подсчетам [Горбач и др., 2016] суммарный объем отложений пирокластических потоков, сформированных за 2001–13 гг., оценивается $\sim 0.6 \text{ км}^3$ (или 0.46 км^3 в пересчете на плотную породу, в.т.ч. $\sim 0.4 \text{ км}^3$ – материал разрушения купола и $\sim 0.06 \text{ км}^3$ – ювенильный материал). За 8 лет (2006–13 гг.) материал, вынесенный ПП при разрушении купола составил 0.25 км^3 , ювенильный материал ПП – 0.04 км^3 (в пересчете на плотную породу). Количество пеплов (тип 2), вынесенных в облака ПП за этот период, можно оценить, используя результаты [Bonadonna et al., 2002], согласно которым 4–16% от общей массы ПП разного генезиса было вынесено в виде пеплов облаков ПП⁵. При плотности породы $2.6 \text{ т}/\text{м}^3$, минимальная масса пеплов облаков ПП отложенных за 8 лет составила: $M_{\text{попП}} = 290 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \cdot 2.6 \text{ т}/\text{м}^3 \cdot 0.04 = 30 \cdot 10^6 \text{ т}$. Основываясь на полевых наблюдениях в 2007 г. (рис. 3.9) и расчетах для вулкана Безымянnyй (см. раздел 4.1), можно предположить в 2 раза большее количество взрывоизделий пеплов, т.е. суммарная масса пепла, выброшенного в 2006–13 гг., составила ~ 90 млн т. Если учесть отсутствие активности в 2006 г. и массу пепла пароксизма в октябре 2010 г., то получаем ~ 11 млн т в год, что близко к полученным оценкам для 2007 г. (8.5 млн т).

Объем экструзивных лав, изверженных с 2001 по 2012 гг. составил по данным [Shevchenko et al., 2015] 0.82 км^3 , а с учетом ювенильного материала ПП общий объем изверженных продуктов без учета тефры, вынесенной за пределы постройки, $\sim 0.88 \text{ км}^3$ [Горбач и др., 2016]. За 8 лет (2006–13 гг.) общий объем – 0.59 км^3 , в т.ч. объем экструзивных лав – 0.55 км^3 или $1.37 \cdot 10^9 \text{ т}$ (принимая плотность экструзивных андезитов $2.5 \text{ т}/\text{м}^3$), в т.ч. $650 \cdot 10^6 \text{ т}$ – отложения пирокластических потоков, сформированных при разрушении купола.

3.4. Эксплозивная активность вулкана Карымский

Вулкан Карымский – один из активнейших вулканов Камчатки, входящий в Карымский долгоживущий вулканический центр в центральной части Восточного вулканического пояса [Иванов, 1970]. Вулкан Карымский начал формироваться около 6100 ($5300 \text{ }^{14}\text{C}$) лет назад в кальдере, образовавшейся в результате сильного извержения 7700 $\text{ }^{14}\text{C}$ лет назад [Брайцева, Мелекесцев, 1989]. Это типичный стратовулкан центрального типа высотой около 1500 м, сложенный потоками лавы с прослойями

⁵ Для вулкана Шивелуч взято нижнее значение 4%, т.к. судя по приведенным данным [Горбач и др., 2016], формирование большей доли ПП связано с обрушениями на растущем куполе вулкана.

пирокластики [Муравьев и др., 1997]. Для него характерны эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения. Основной тип извержений – вулканский, сменяющийся в некоторые периоды вулкано-стромболианским. Состав изверженного материала – от андезитов до дацитов. С 1771 г. (когда появились первые исторические сведения) наблюдалось более 20 извержений [Действующие вулканы.., 1991].

Очередной эруптивный цикл вулкана после 14 летнего перерыва начался 02.01.1996 г. одновременно с мощным, продолжавшимся не более одних суток, подводным извержением в кальдере Академии Наук, расположенной в 6 км к югу от Карымского вулкана [Муравьев и др., 1997]. Этот эруптивный цикл с небольшими периодами покоя продолжается уже более 20 лет. До 2004 г. на склоны вулкана изливались небольшие лавовые потоки. Последние лавовые образования (в виде лавового купола в кратере) отмечались в декабре 2005 г. [Андреев и др., 2006]. После этого извержение перешло в эксплозивную фазу. В первый год активизации (1996 г.) вулкан выбросил 4.4 млн т [Муравьев и др., 1997].

Автором, участвовавшим в отборе проб весной 2007, 2008 и 2011 гг., составлены схемы отложений пепла и посчитаны их суммарные массы для этих лет.

В 2007 г. во время полевых работ во второй половине апреля в снежных шурфах было обнаружено в среднем 5 (до 7) пепловых горизонтов. Нижние слои пепла, очевидно, сформировались в октябре-декабре 2006 г. По сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН активность вулкана в конце октября начале ноября 2006 г. была довольно высокой, далее, до 22 декабря сейсмических данных не было. С начала 2007 г. до 21 апреля наблюдалась умеренная активность, с усилением в конце марта. После этого в течение 1.5 месяцев отмечался период покоя. С середины июня активность возросла и снизилась только в конце октября 2007 г.

На основе данных шурфования снежной толщи в 24 точках и отбора только верхнего горизонта, приуроченного к активизации в конце марта-апреле, еще в 13 пунктах, была посчитана масса пепла отдельно для верхнего горизонта и для всех остальных вместе (рис. 3.12). Их сумма затем была пересчитана на весь год, предполагая одинаковую активность в течение года, было получено около 2.5 млн т пепла.

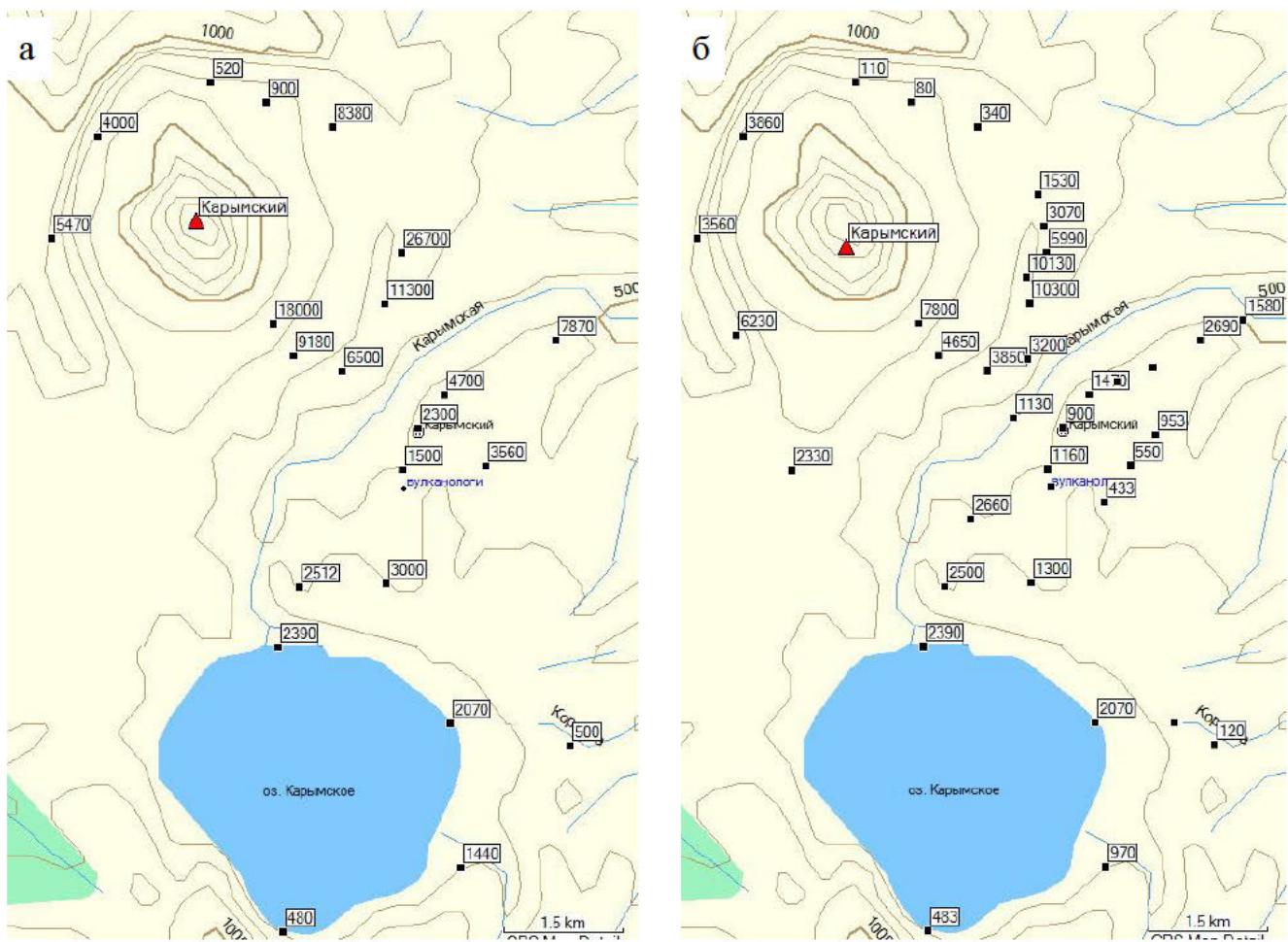


Рис.3.12. Распределение отложений пепла вулкана Карымский весной 2007 г. Показаны точки отбора (шурфования снега) и масса пепла ($\text{г}/\text{м}^2$). а – суммарная масса пепла за холодный период, б – масса пепла верхнего горизонта.

Анализ спутниковых и сейсмических данных (КФ ФИЦ ЕГС РАН) позволяет выделить периоды повышенной активности вулкана в 2008 г., проявляющейся в регулярных мощных пепловых выбросах высотой 3–5 км н.у.м. (март – апрель, август – декабрь), в остальное время года преобладала парогазовая деятельность. На основе ~50 проб, отобранных в конце апреля (рис. 3.13), была оценена масса пепла, выброшенного во время весенней активизации, которая составила 0.21 млн т. С учетом вдвое более длинного периода активности в августе-декабре общую массу пепла в 2008 г. можно оценить в ~0.63 млн т.

В 2011 г. отмечалась умеренная эруптивная активность. При шурфовании снега в конце апреля в 15 точках на удалении 1.4–10 км от Карымского вулкана был выделен «маркирующий» слой пепла вулкана Кизимен, соответствующий пепловому шлейфу 1.01.11., обнаруженный почти во всех шурфах, кроме близко расположенных к вулкану. Если рассматривать активность Карымского относительно этого события, то до него

(т.е. в конце 2010 г.) она была очень слабой, т.к. ниже «маркирующего» горизонта слоев пепла Карымского или нет или отмечаются 1–2 слабых с содержание пепла менее 80–140 г/м² на удалении 4–5 км от вулкана. Выше отмечалось разное количество слоев, их суммарная масса в шурфе использовалась для подсчета общей массы пепла, выброшенной в январе-апреле 2011 г. (рис. 3.14). Шурфованием не был охвачен сектор 310–110° от вулкана. Предполагаемое количество пепла, отложенного в нем, восстанавливалось с учетом розы ветров на метеостанции "Семячик" [Кирьянов, 1992]. По подсчетам с использованием степенной зависимости [Широков, 1985; см. п. 2.2] за январь-апрель было отложено около 0.5 млн т пепла. Принимая в среднем одинаковую активность в течение года, за 2011 г. было выброшено ~1.5 млн т тефры. С использованием экспоненциальной зависимости [Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000] было получено на 30% меньше (1.1 млн т).

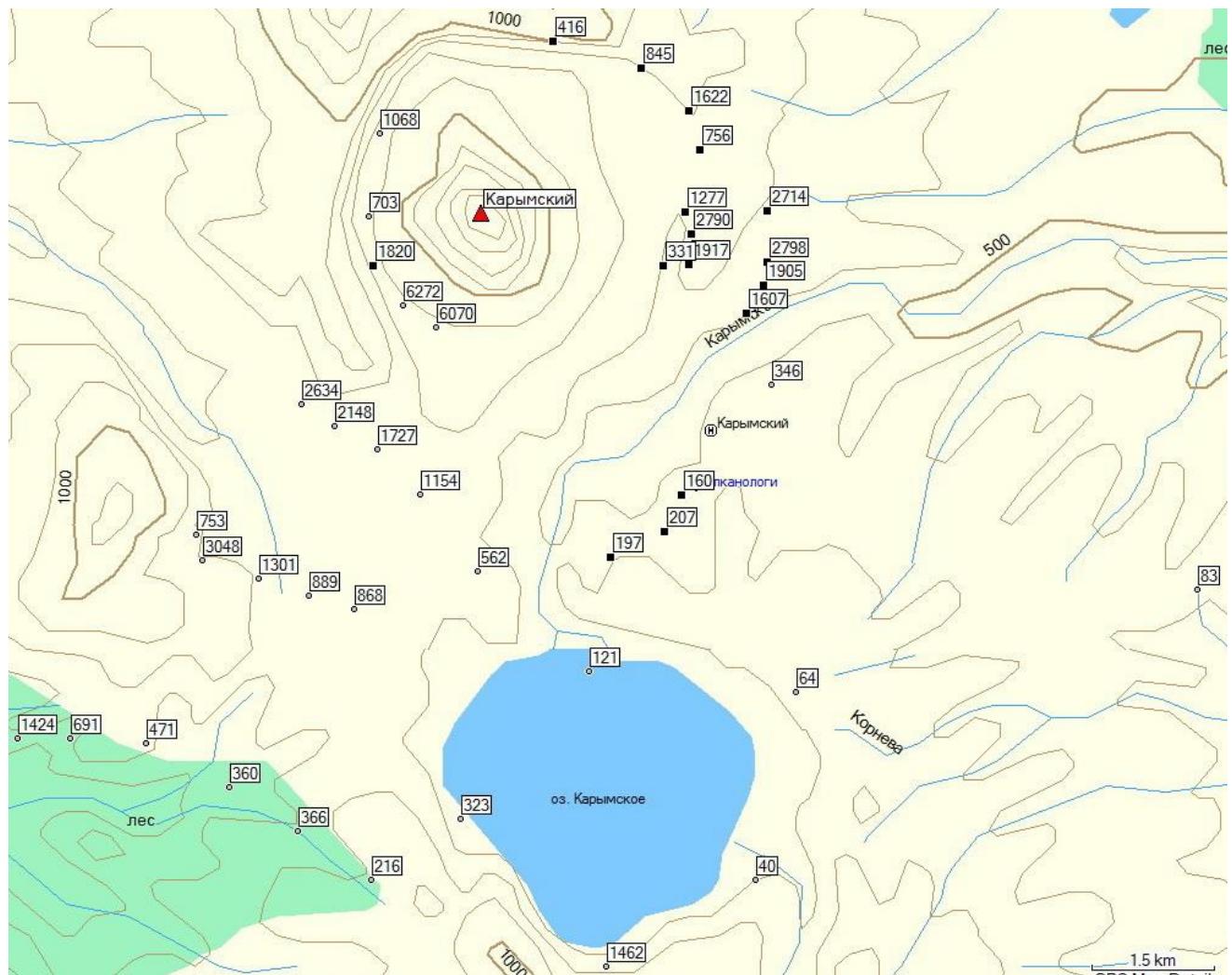


Рис. 3.13. Распределение отложений пепла вулкана Карымский весной 2008 г. Показаны точки отбора (шурфования снега) и масса пепла (г/м²).

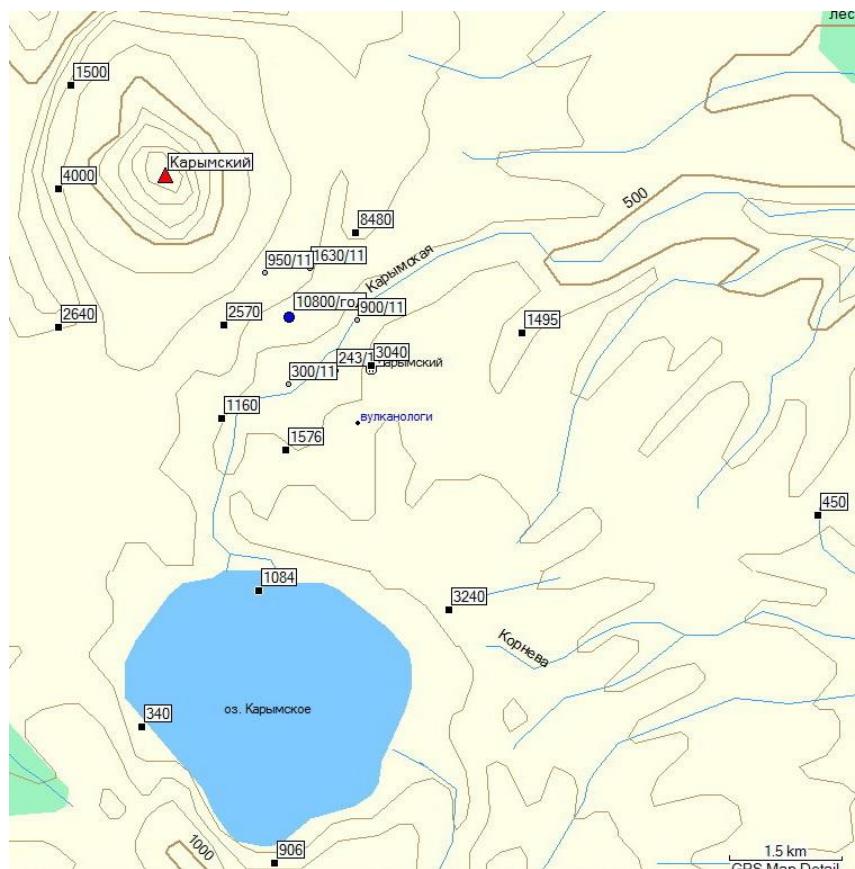


Рис. 3.14. Распределение отложений пепла вулкана Карымский весной 2011 г. Квадратами показаны точки отбора (шурфования снега) и масса пепла ($\text{г}/\text{м}^2$), кружками – точки расположения пеплосборников.

Во время пребывания также производился отбор свежевыпавшего пепла в пеплосборники. Было установлено 9 пеплосборников в секторе 123–168° на период 11 дней. По данным метеостанции "Семячик"⁶ ветер СЗ-С направлений, способствующий отложению пепла в этом секторе, отмечался только ~5 дней. По подсчетам с использованием степенной зависимости [Широков, 1985] за время пребывания (за 5 дней с сопутствующим ветром) в ЮВ-Ю секторе вулкана было отложено ~20 тыс. т пепла, что в пересчете на год дает 1.45 млн т, т.е. близкие оценки с полученными шурфованием снежной толщи.

По данным исследований при участии автора [Маневич и др., 2012], общая масса изверженного пепла за период 2005–2011 гг. составила около 10 млн т, ежегодно на земную поверхность поставлялось 1-2 млн т пепла. По расчетам [устное сообщение Т.М. Жиделевой, 2007]⁷ за 2006 г. вулканом было выброшено ~3.8 млн т тефры, а по данным [Андреев и др., 2007] – 12 млн m^3 (>12 млн т). Вероятно, последняя цифра завышена,

⁶ <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=32509&bday=1&fday=30&amonth=4&ayear=2011>

⁷ Жиделева Т.М., Самойленко С.Б., Тембрел И.И. Эксплозивная деятельность Карымского вулкана в первой половине 2006 года Доклад на ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28–30 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский.

кроме того в работе не приведены расчеты. На основании этих данных, а также полученных автором для 2007, 2008 и 2011 гг., среднегодовое количество пепла, изверженного Карымским вулканом в период 2006-2013 гг., составило 1.8 млн т. Это совпадает со средней интенсивностью выноса вещества за время жизни вулкана, как и за последние 500 лет – 2 млн т/год [Брайцева, Мелекесцев, 1989].

3.5. Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВ в 2012–13 гг. (ТТИ-50)

Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии (ТТИ-50) 2012–13 гг. было преимущественно эфузивным со средним коэффициентом эксплозивности около 15%. Общий объем лав, излившихся с 27 ноября 2012 г. по июнь 2013 г. был оценен в 0.542 км³, в то время как общий объем новообразованной группы конусов им. Меняйлова и Набоко составил приблизительно 0.02 км³, а объем остальной пирокластики, выпавшей на расстоянии до 1.5 км – 0.08 км³ [Двигало и др., 2017].

Мощные эксплозии формирующие протяженные пепловые шлейфы в основном наблюдались в начале извержения 27–28 ноября, когда извержение происходило вдоль всей открывшейся трещины. Когда первые наблюдатели прибыли на место 29–30 ноября, пепловые выбросы происходили преимущественно из верхнего прорыва (центра им. Меняйлова). Его извержение закончилось к 1 декабря. В течение первых 5 дней эруптивной активности пепловые шлейфы распространялись на север, восток-юго-восток от центра извержения. 2 декабря пеплопад наблюдался в пос. Козыревск, расположенным в 42 км к западу-северо-западу. По спутниковым данным [Гирина и др., 2013] и визуальным наблюдениям, в остальное время извержения значительных пеплопадов не было, хотя выпадение пепла и шлака периодически наблюдалось в ближней зоне. На основе анализа отложений пепла в 3-х секторах (северном, западном, юго-восточном), где было отобрано около 25 проб (рис. 3.15), общая масса тефры, изверженная в течение первой недели оценена примерно в 10⁷ т с объемом около 0.01 км³ (принимая плотность тефры 1 г/см³), более половины (5–6·10⁶ т) было отложено пеплопадами первых двух дней в северном секторе.

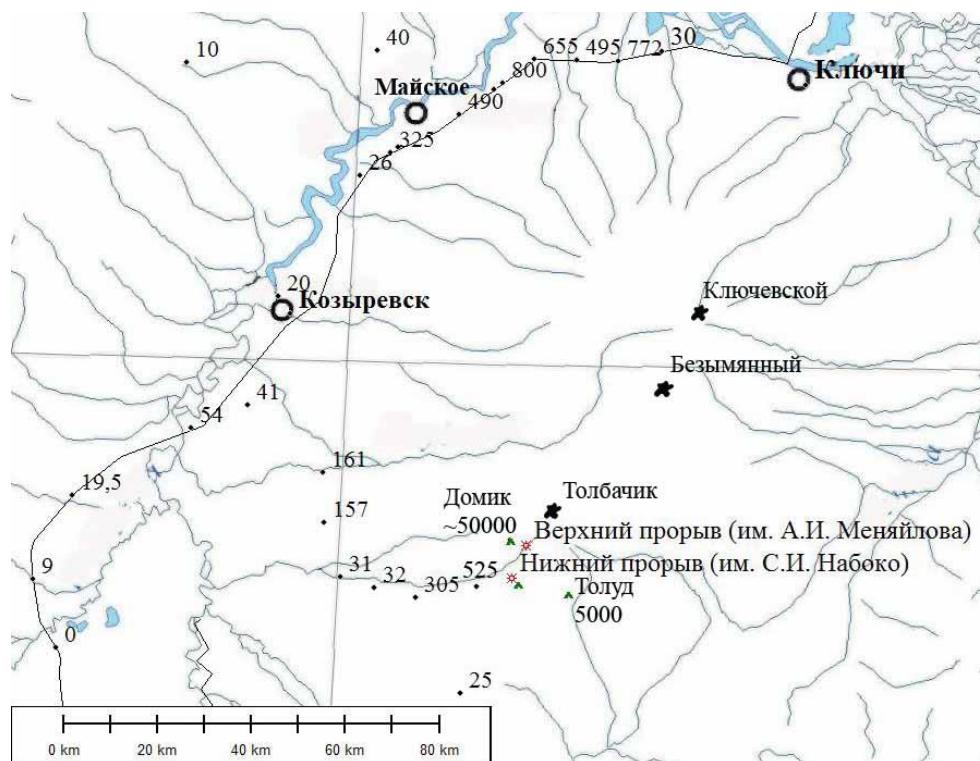


Рис. 3.15. Схема распределения точек отбора и отложений пепла Трещинного Толбачинского извержения 2012–13 гг. Условные обозначения как на рис. 3.1.

3.6. Краткое описание извержений других вулканов (Жупановского, Ключевского, Алаида)

Извержение Жупановского вулкана в 2013–2016 гг.

Вулкан Жупановский представляет собой вулканический хребет северо-западного простирания, образованный четырьмя слившимися конусами стратовулканов. Последнее извержение (1956–57 гг.), как и все исторические, имело характер небольших эксплозий, и в то время не изучалось.

Извержение началось 24–25 октября 2013 г. со слабых фреатических взрывов из новообразованного провала на западном склоне 3-го конуса⁸. Затем после периода затишья вновь возобновилось в июне 2014 г. уже из терминального кратера 3-го конуса и продолжается до настоящего времени виде эксплозий разной силы с перерывами до 8 месяцев. Летом 2015 г. произошло крупное обрушение постройки активного конуса.

Так же как для вулкана Кизимен, эта активизация впервые дала возможность для изучения свежевыпавших пеплов этого вулкана, в т.ч. их водорастворимого комплекса. Характер активности позволил сравнить гранулометрический состав и водорастворимый комплекс пеплов начальной фреатической и последующей фреато-магматической стадии активности вулкана.

⁸ http://www.ivs.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2013/Gupanovsky_261013/Gupanovsky_261013.html

Извержения Ключевского вулкана

Ключевской – высочайший вулкан Евразии, самый активный и продуктивный (средний расход 60 млн т в год) вулкан Курило-Камчатской островной дуги.

За рассматриваемый период (2006–13 гг.) произошло четыре терминальных эфузивно-эксплозивных извержения длительностью от 3 до 14 месяцев [Жаринов, Демянчук, 2016] (Приложение 4). Т.к. извержения были достаточно длительными, включая беснежные сезоны, и многочисленные, в основном слабые, пепловые шлейфы распространялись в разных направлениях, отобрать достаточное количество проб для оценки изверженного объема пепла не было возможным. Масса пепла, отобранного в зимний период в районе п. Ключи (~30 км от вулкана) достигала $85 \text{ г}/\text{м}^2$ в 2013 г. Если предположить равномерное распределение пепла вокруг вулкана в результате длительного извержения, то по формуле [Legros, 2000] масса пепла в 2013 г. составит 0.9 млн т. По оценкам [Жаринов и др., 2017], основанным на расчетах тепловой мощности извержений по высоте эруптивных колонн и пепловых шлейфов, объем вынесенной пирокластики за 2 месяца в 2015 г. составил 0.00007 км^3 , за 7 месяцев 2016 г. – 0.0003 км^3 , или 0.084 и 0.36 млн т, соответственно, при плотности пепла $1.2 \text{ т}/\text{м}^3$ по [Действующие.., 1991]. Основываясь на приведенных данных, можно предположить массу пепла, выброшенного в результате 4-х извержений в 2006–2013 гг., не более 4-х млн т. По данным [там же] в результате 4-х вершинных извержений 1978–86 гг. масса лавы составляла 25–75 млн т, тефры – 2–6 млн т для одного извержения.

Активизация вулкана Алаид в 2012 г.

Вулкан Алаид – самый северный, самый высокий вулкан Курильских островов (абсолютная высота – 2339 м, превышение над дном Охотского моря – 3000 м) расположен на о. Атласова. Представляет собой сложный стратовулкан, на склонах которого располагается 32 побочных шлаковых конуса, 10 из которых имеют лавовые потоки [Федотов и др., 1982]. Это наиболее активный базальтовый вулкан Курил, средняя величина выноса магмы 8 млн т в год. Последнее извержение в 1981 г. было вершинным эксплозивным, до этого в 20 веке отмечены два эфузивно-эксплозивных побочных извержения – Такетоми в 1933–34 гг. и прорыв Олимпийский в 1972 г.

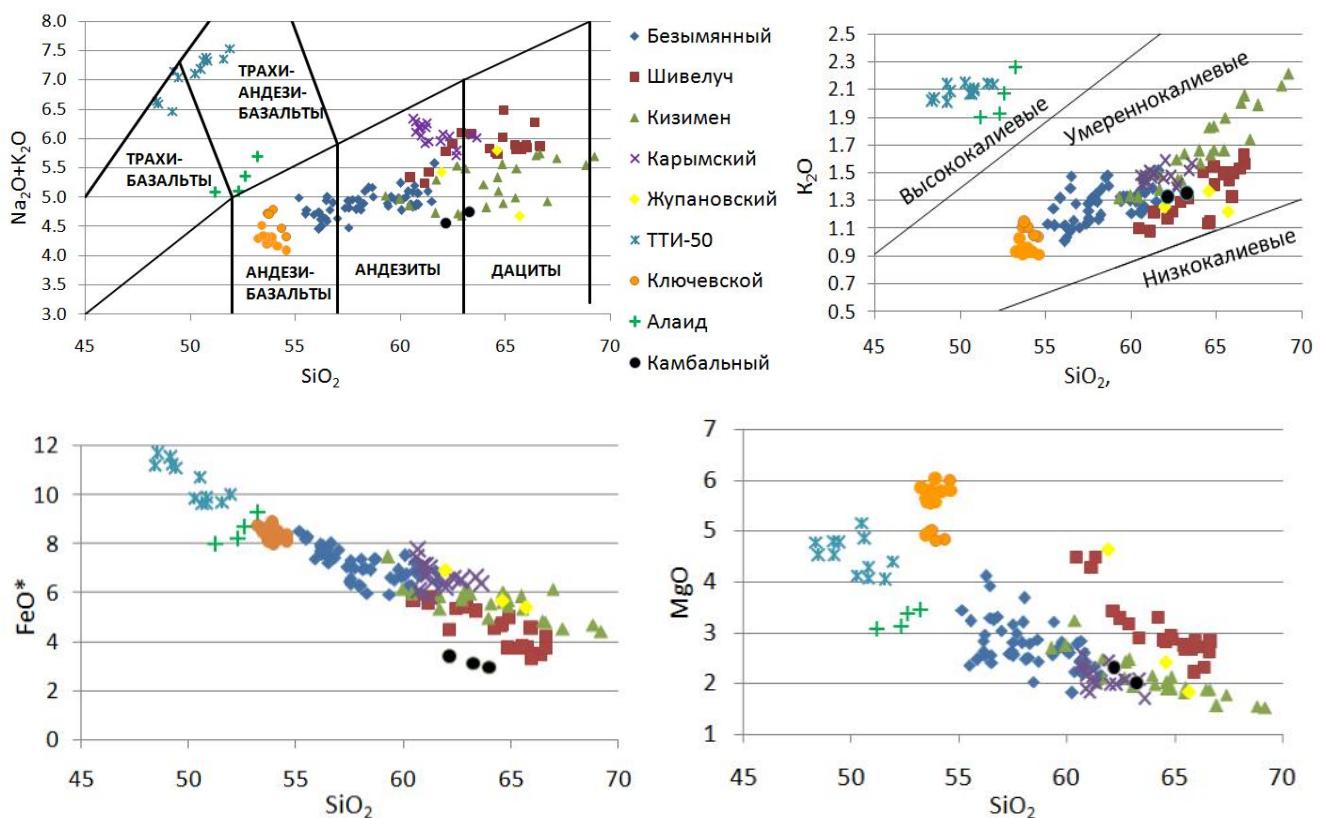
В октябре 2012 г. началась активизация в кратере вулкана Алаид⁹, что было заметно как по визуальным наблюдениям, так и по спутниковым снимкам, на которых

⁹ http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2012/Alaid_271012/Alaid_271012.html,

отмечались пепловый шлейф и термальная аномалия внутри кратера вулкана. При облете вулкана 27 октября отложения пепла на снегу отмечались только в привершинной части конуса вулкана в нескольких направлениях [Рашидов и др., 2012]. У кромки кратера на поверхности снега были разбросаны единичные шлаковые бомбы. В снежных разрезах на С-С3 склоне на высоте 1200–1500 м н.у.м. отмечались только очень слабые пепловые прослои (≤ 10 г/м²). Во время краткосрочной посадки в районе кратера ощущался резкий запах вулканических газов, были отобраны две пробы пепла (у кромки кратера и на расстоянии около 150 м от нее) и шлаковые бомбы. На основе проведенных наблюдений, можно сделать вывод, что активизация вулкана Алайд в 2012 г. была очень слабой, проявлявшейся небольшими эксплозиями, вероятно, фреатомагматическими.

3.7. Петрохимические особенности тефры.

По петрохимическому составу изученные образцы пирокластики относятся к умереннокалиевым породам от андезибазальтов до дацитов и к высококалиевым преимущественно трахиандезибазальтам (рис. 3.16) [Петрографический кодекс, 2008].



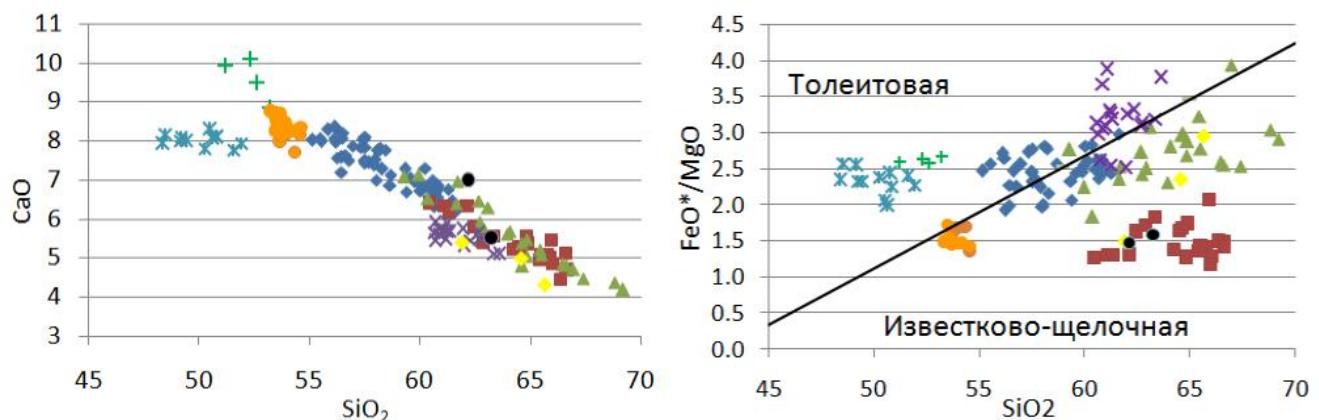


Рис. 3.16. Вариационные диаграммы для продуктов извержений 2006–17 гг. вулканов Камчатки и вулкана Алаид (Курильские острова) (мас. %). Результаты химических анализов тефры вулкана Ключевского 2007–13 гг. предоставлены А.А. Овсянниковым (выполнены в АЦ ИВиС) и О.В. Бергаль-Кувикас (выполнены в Университете Хоккайдо, Япония), Камбального взяты из [Рычагов и др., 2017].

Наиболее полная в петрологическом отношении информация была получена автором для образцов пирокластики вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч, Карымский.

Изученные образцы пирокластики вулкана Безымянный, как и все изверженные вулканом породы с 1955 г., относятся к умереннокалиевым андезитам. Химический состав бомб, пепла извержения 2006 г., пепла 2008 и 2009 гг., пород ПП 2011 г., марта и сентября¹⁰ 2012 г. сопоставлен с составом пород извержений 1956–1991 гг. [Малышев, 2000; Озеров и др., 1997] (рис. 3.17). В целом, изученные образцы укладываются в тренды составов пород извержений 1956–1991 гг. [там же]. Результаты анализов бомб 2006 г. и пород ПП 2011, 2012 г. закономерно продолжают тренды на вариационных диаграммах в сторону уменьшения содержания SiO₂, в то время как составы пеплов обладают большой изменчивостью, зависящей от условий перемещения и отложения.¹¹ В результате эоловой гравитационной дифференциации, пепел извержения 24.12.06, отобранный на расстояниях 23–70 км, имеет более кислый состав (на 2–3% SiO₂), чем бомбы того же извержения (рис. 3.17) [Малик, 2011]. Для пеплов одного извержения, отобранных на разных расстояниях такой дифференциации не наблюдается для всех 3-х извержений 2006, 2009 и 2012 гг. Это, видимо, связано с отложением вблизи вулканов

¹⁰ Извержения в августе 2008, сентябре 2012 г. в работе не описаны, т.к. было отобрано незначительное количество проб. Представлены только результаты валового химического анализа образцов, обработанных автором

¹¹ Для всех анализов проб 2006–12 гг., выполненных в АЦ ИВиС, наблюдается заметные занижения оксида магния, что не соответствует выявленной тенденции роста его содержания со временем в ходе исторического эруптивного цикла [Малышев, 2000]. По-видимому, это связано с особенностями химического анализа. В то же время, результаты анализов пепла и бомб 2006 и 2009 гг., выполненных в лаборатории Института геохимии им. А.П. Вернадского в г. Иркутске, попадают точно в центр группы точек исторических извержений, как для MgO, так и для других окислов.

вместе с тефрой кульмиационных эксплозий пеплов облаков ПП, имеющих более кислый состав, чем другие продукты извержений [Гирина, 1998], что подтверждается на примере химического состава пробы пепла № 83 извержения 9 марта 2012 г., выпавшего вблизи вулкана в стороне от оси пеплопада (раздел 4.3, рис. 4.18).

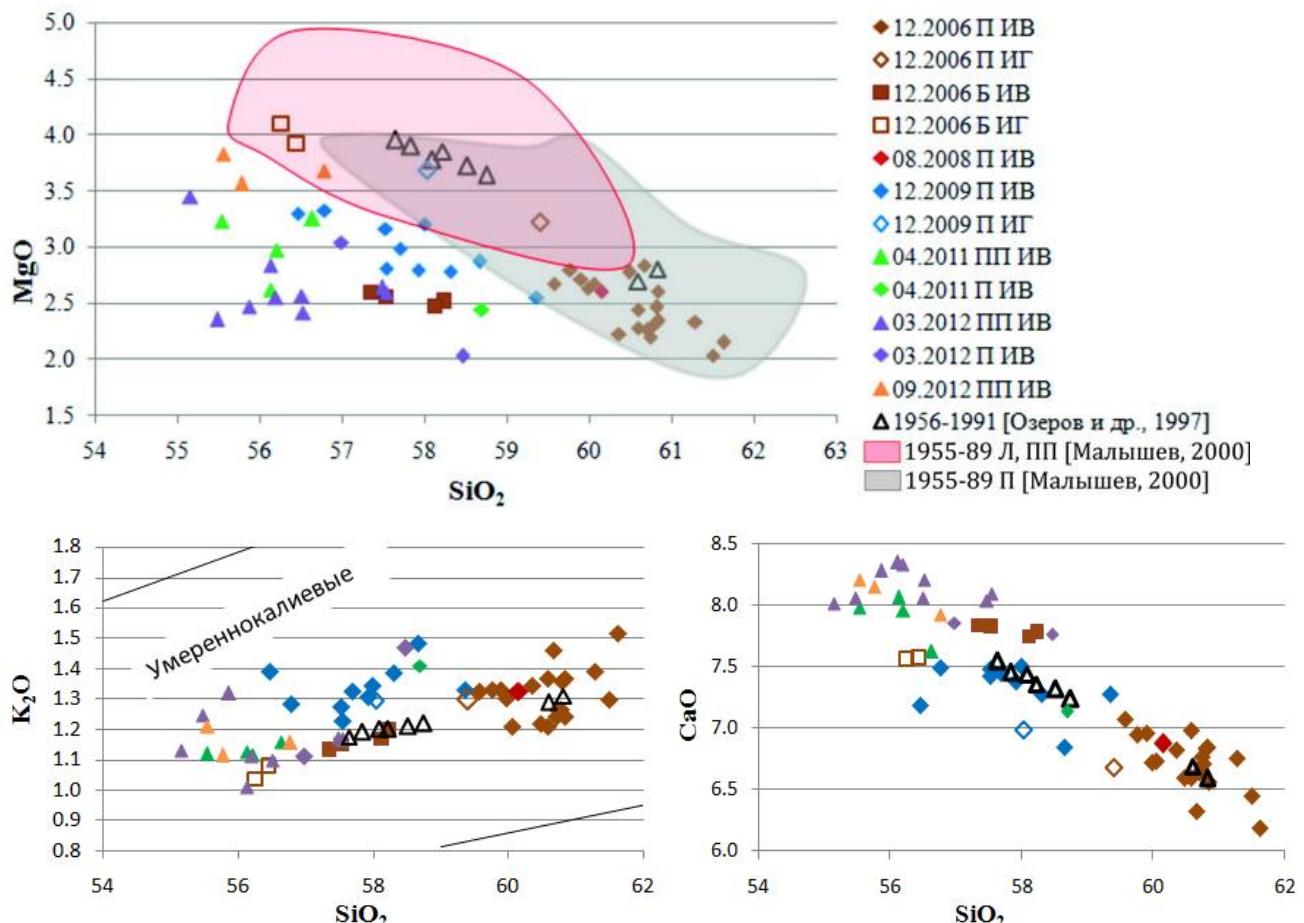


Рис. 3.17. Вариационные диаграммы для андезитов извержений Безымянного вулкана (мас.-%). В условных обозначениях указана дата извержения, продукт извержения: П – пепел, Б – бомба, ПП – материал пирокластического потока, Л – лава; место анализа: ИВ – Аналитический центр ИВиС ДВО РАН, ИГ – Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск.

Минеральный состав изверженных пород.

Породы изученных извержений относятся к двупироксеновым андезитам характерным для извержений вулкана после 1961 г. Частицы пепла представлены кристаллами плагиоклаза (преобладает), орто- и клинопироксена, рудных минералов, обломками пород. Несмотря на то, что в минералогическом отношении были изучены только пеплы, не дающие полного представления о размерах кристаллов, можно выделить несколько генераций плагиоклаза и пироксена.

Анализ минералов и стекол на рентгеноспектральном микроанализаторе “Camebax” был выполнен для 92 частиц размером 0.1–1 мм из проб пеплов извержения

24 декабря 2006 г., отобранных недалеко от оси пеплопада, на расстояниях 31 и 33.5 км от вулкана [Малик, 2011].

Обломки пород представлены основной массой с включением субфенокристаллов плагиоклаза, пироксена, титаномагнетита. Структура основной массы – гиалопилитовая, местами интерсерпельная, представляющая смесь из стекла, микролитов и кристаллитов.

Плагиоклаз. Кристаллы плагиоклаза (An_{42-89}) размером 0.3–0.7 мм по химическому составу соответствуют лабрадору, реже битовниту и андезину (рис. 3.18а), средний состав – An_{65} . В большинстве зерен наблюдается зональность, причем различия в составе достигают 22% An. Характер зональности в большинстве случаев определить сложно, так как частицы пеплов представляют собой обломки кристаллов, в некоторых случаях явно различима ритмическая зональность. Состав микролитов и субфенокристаллов (размером менее 0.3 мм) в основной массе породы варьирует в пределах An_{41-76} (рис. 3.18а), как и фенокристаллы, большая часть представлена лабрадором, реже встречается битовнит и андезин.

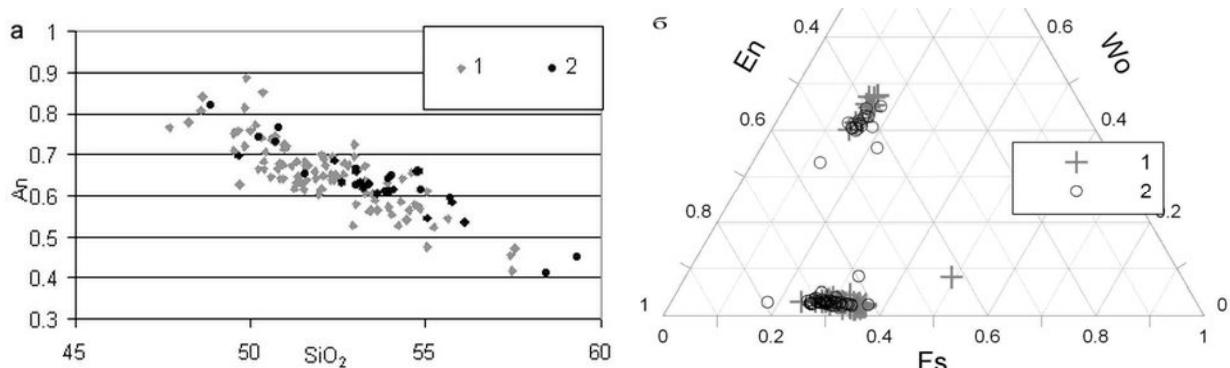


Рис. 3.18. Распределение составов плагиоклазов (а) и пироксенов (б) в пеплах вулкана Безымянный, декабрь 2006 г.: на обеих диаграммах 1 – фенокристаллы; 2 – субфенокристаллы и микролиты.

Пироксен представлен ромбической и моноклинной разновидностями (рис. 3.18б).

Ортопироксен преобладает над клинопироксеном. По химическому составу частицы размером 0.3–0.6 мм, многие, имеющие удлиненную форму, соответствуют гиперстену (En_{61-73}), средний состав – $Wo_3En_{65}Fs_{32}$. Субфенокристаллы и микролиты (50–300 мк) также по химическому составу соответствуют гиперстену (En_{61-72}), в редких случаях – бронзиту (En_{79}), но средний состав их более магнезиальный ($Wo_3En_{68}Fs_{29}$).

Клинопироксен встречается как в виде отдельных кристаллов размером 0.3–0.7 мм, так и в сростках с ортопироксеном, представлен авгитом и салитом состава $Wo_{40-47.5}En_{36.5-46}Fs_{14-16}$, средний – $Wo_{45}En_{40}Fs_{15}$. Химический состав субфенокристаллов и

микролитов клинопироксена по сравнению с фенокристаллами более магнезиальный, соответствует авгиту ($\text{Wo}_{33-45}\text{En}_{37-54}\text{Fs}_{13-22}$). Состав большинства минералов близок к среднему $\text{Wo}_{41}\text{En}_{43}\text{Fs}_{16}$, за исключением двух микровкрапленников, один из которых ($\text{Wo}_{33}\text{En}_{54}\text{Fs}_{13}$) определен рядом с разложившейся роговой обманкой и возможно являлся ее частичным замещением, другой ($\text{Wo}_{36}\text{En}_{42}\text{Fs}_{22}$) расположен на краю частицы пепла.

В двух анализах был определен пижонит: один – в сростке с ортопироксеном ($\text{Wo}_8\text{En}_{43}\text{Fs}_{49}$), другой – микролит ($\text{Wo}_8\text{En}_{60}\text{Fs}_{32}$).

Рудный минерал образует включения размером менее 100 мкм в пироксене или приурочен к его краям, присутствует в основной массе в виде микролитов и субфенокристаллов размером до 300 мкм. По составу отвечает титаномагнетиту и магнетиту с примесью магнезиоферрита MgFe_2O_4 (до 12%) и шпинели MgAl_2O_4 (до 16%).

Большая часть основной массы раскристаллизована и представляет собой смесь микролитов и кристаллитов плагиоклаза, пироксена и рудного минерала, погруженных в стекло, состав которого варьирует от 66 до 78% SiO_2 (среднее содержание – 73%) [Малик, 2011].

Сравнивая состав минералов пеплов извержения 24.12.2006 г. с минеральным составом пород пирокластического потока 1985 г. [Алидибиров и др., 1988], можно отметить некоторое повышение содержания An в плагиоклазах и уменьшение магнезиальности ортопироксенов. При сравнении с результатами анализов минералов андезитов 1956–1990 гг. [Толстых и др., 1999] также заметно увеличение аортитовой составляющей в плагиоклазах.

Плотные породы извержения вулкана Кизимен 2010-2013 гг. (лавы, обломки ПП, экструзий) образуют линейный тренд в поле умереннокалиевый островодужной серии, также как и породы прошлых доисторических циклов активности вулкана (рис. 3.19). Установлено изменение кислотности пород во времени. На самых ранних этапах (январь – июль 2011 г.) концентрации SiO_2 колебались в пределах 59–61%, в сентябре 2011 г. достигали 63.5%, при среднем значении 61.8%, а затем произошло повышение основности до средних значений SiO_2 58–59% (декабрь 2011 г. – май 2013 г.), причем минимальные значения опускались до 55.3%. На диаграмме $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ более основные разности продуктов данного извержения отвечают толеитовому типу островодужных пород, тогда как более кислые лежат в известково-щелочном поле.

Примечательно, что с ростом кислотности пород не наблюдается закономерного увеличения отношения FeO^*/MgO , как должно было бы происходить в ходе кристаллизационной дифференциации [Малик и др., 2012].

Пепел и лапиллы текущего извержения, по химическому составу, относятся к умереннокалиевым андезитам и дацитам (рис. 3.19). Пепел имеет явно более кислый состав, чем другие изверженные породы, содержание SiO_2 достигает 69%. Это связано, в первую очередь, с уже описанным процессом отложения пеплов облаков ПП, которые в результате дифференциации всегда имеют устойчиво более кислый состав (на 2–3% SiO_2) по сравнению со всеми прочими продуктами извержений (см. раздел 4.3). Химический состав двух фракций (<56 и >125 мкм) одной пробы пепла различается по содержанию SiO_2 на 3% (больше для фракции <56 мкм). Пемзovidные же лапиллы отвечают среднему составу андезитов вулкана.

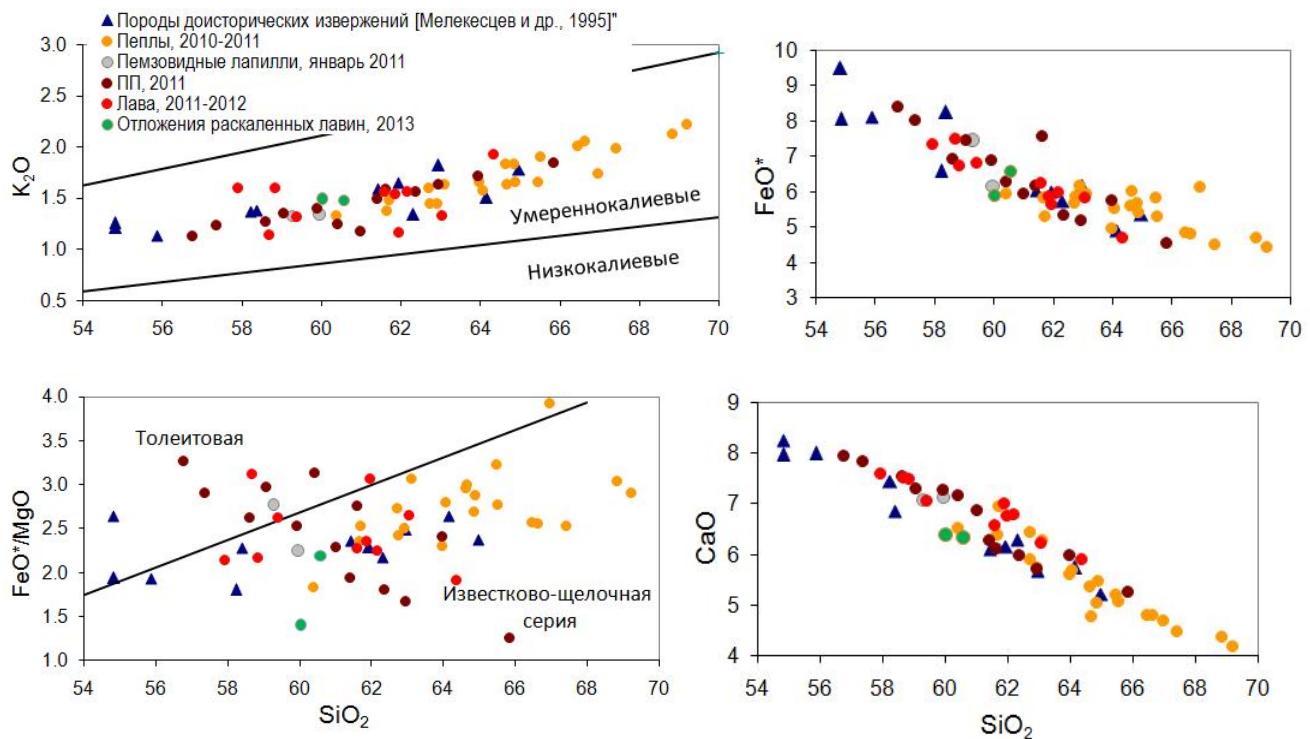


Рис. 3.19. Вариационные диаграммы для пород извержения вулкана Кизимен (мас. %) 2010–2013 гг.

Количественно-минералогический анализ выполнен В.Ю. Кирьяновым в подготовленных автором фракциях 0.063–0.125 мм (11 проб пепла, 2 заполнителя ПП) и 0.125–0.25 мм (2 пробы пепла) под поляризационным микроскопом в иммерсионных жидкостях. Для каждого образца в шлифе подсчитывалось по 300 зерен, что дает 94% точности подсчета. Главными компонентами всех пеплов и заполнителей ПП являются: вулканическое стекло (41–71%), плагиоклазы (30–51%), бурая и зеленая роговая

обманка (1–8%), пироксены (1–4%), рудные минералы (1–3%) и обломки пород (1–6%). По соотношению компонентов пеплы соответствуют андезитам.

В пробах пепла первых двух месяцев извержения (декабрь-январь) присутствуют также кристаллы, зерна, чешуйки, агрегаты пестроокрашенных вторичных минералов. Их количество варьирует в пределах 35%. В пеплах, выпавших в феврале, доля вулканического стекла несколько увеличивается, за счет появления заметного количества полупрозрачных зерен вулканического стекла.

В образцах пепла фракции 0.063–0.125 мм одного извержения, отобранных на разных расстояниях от вулкана (82 и 245 км, 1.01.2011 г. и 52 км и 84 км, 13.01.2011 г.) изменения вещественного состава пеплов и соотношения компонентов в них вследствие гравитационной эоловой дифференциации, в пределах одной фракции, не наблюдается.

В двух случайно выбранных образцах пеплов также изучалась фракция 0.125–0.25 мм. Количественно минеральный состав и внешний облик вулканического стекла в изученных образцах полностью соответствует составу фракции 0.063–0.125 мм.

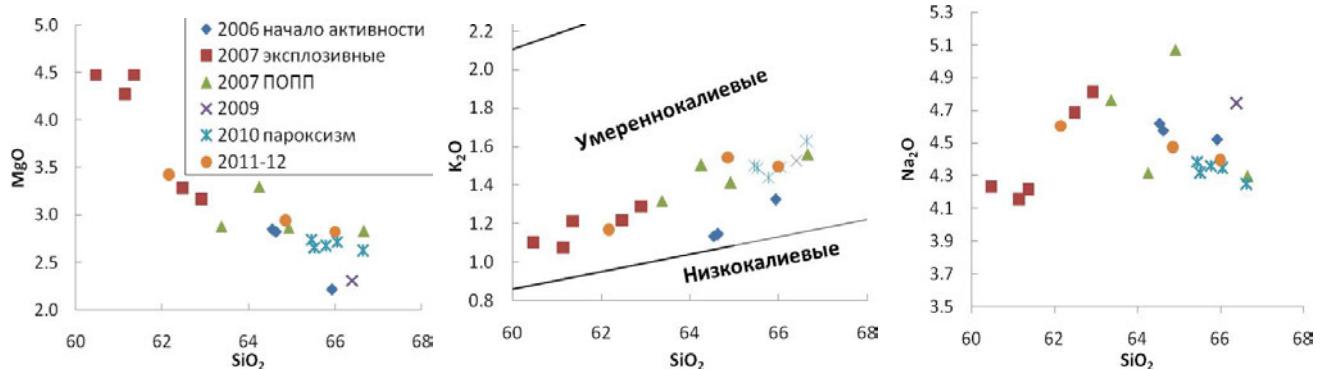
Электронно-зондовый анализ минералов и стекол выполнен для пепла эксплозии 13.01.2011 г. (фракция 0.056–0.063 мм) и пород (лапилли, лав, обломков пород ПП, экструзий) изверженных с января 2011 г. по май 2013 г. Среди вкрапленников в изученных породах присутствуют плагиоклаз, роговая обманка, клино- и ортопироксены, оливин, магнетит, ильменит, апатит и кварц. Плагиоклаз преобладает во всех типах пород, его состав варьирует в широких пределах (An 40–85). Состав амфибola в целом отвечает магнезиальной роговой обманке, встречается чермакит, паргасит и саданагаит. Роговая обманка является преобладающим темноцветным минералом в породах пирокластических потоков. В образцах, отобранных с января по сентябрь 2011 г., она имеет однородный оливковый цвет и свежий облик без следов разложения и реакции с расплавом. В последующих по времени образцах ее доля существенно снижается, происходит образование кайм распада, вплоть до полного замещения. В лаве и пирокластике, взятых после эксплозивной активизации вулкана в декабре 2011 г., роговая обманка практически нацело разложена. Составы остальных темноцветных также широко варьируют: Opx – En50–90, CPx – En34–78.5, Ol – Fo60–95. В основной массе присутствуют микролиты плагиоклаза, пироксенов и магнетита и стекло кислого состава (62–81% SiO₂). В ходе извержения лавового потока в породах

появились мелкозернистые Pl-Px-Mt-гомеогенные включения более основные по составу, чем вмещающие породы.

В целом, ассоциация вкрапленников, их широкие вариации по составу и другие петрографические и петрохимические особенности указывают на взаимодействие магм кислого и основного состава.

Петрохимический состав пеплов вулкана Шивелуч

Проанализированные автором пеплы вулкана Шивелуч извержений в 2006–07, 2010 гг., 2011–12 гг. (рис. 3.20), как и образцы экструзивных лав и ПП, изверженные в 2001–13 гг. [Горбач и др., 2016], относятся к роговообманково-плагиоклазовым известково-щелочным умереннокалиевым андезитам. На диаграммах Харкера (рис. 3.20) образцы пеплов на диаграммах повторяют те же тренды (MgO - SiO_2 , FeO^* - SiO_2 , CaO - SiO_2 , TiO_2 - SiO_2) или обнаруживают практически отсутствие зависимости (Al_2O_3 - SiO_2), что и другие эруптивные продукты вулкана Шивелуч [Горбач и др., 2016]. Химические составы крупнозернистых эксплозивных пеплов (тип 1) 2007 г. и одной из проб 2011–12 г. находятся в пределах составов проб лав и ПП 2001–2013 гг. Пробы пылеватых пеплов (2 тип: облаков ПП 2007 г., пароксизmalного извержения 2010 г. и часть проб 2011–12 гг.) имеют повышенные содержания SiO_2 на 3–4% и K_2O на 0.2%, пониженные содержания MgO , FeO , CaO и TiO , и примерно такие же Na_2O , в результате пеплы не образуют характерного для пород вулкана тренда роста содержания Na_2O с ростом SiO_2 . Такие особенности можно объяснить гравитационной эоловой дифференциацией, в результате которой пылеватые пеплы, "выдуваемые" из тела ПП, обогащены более легкими фракциями, в частности стеклом, и поэтому имеют повышенные содержания оксидов Si и K и пониженные остальных.



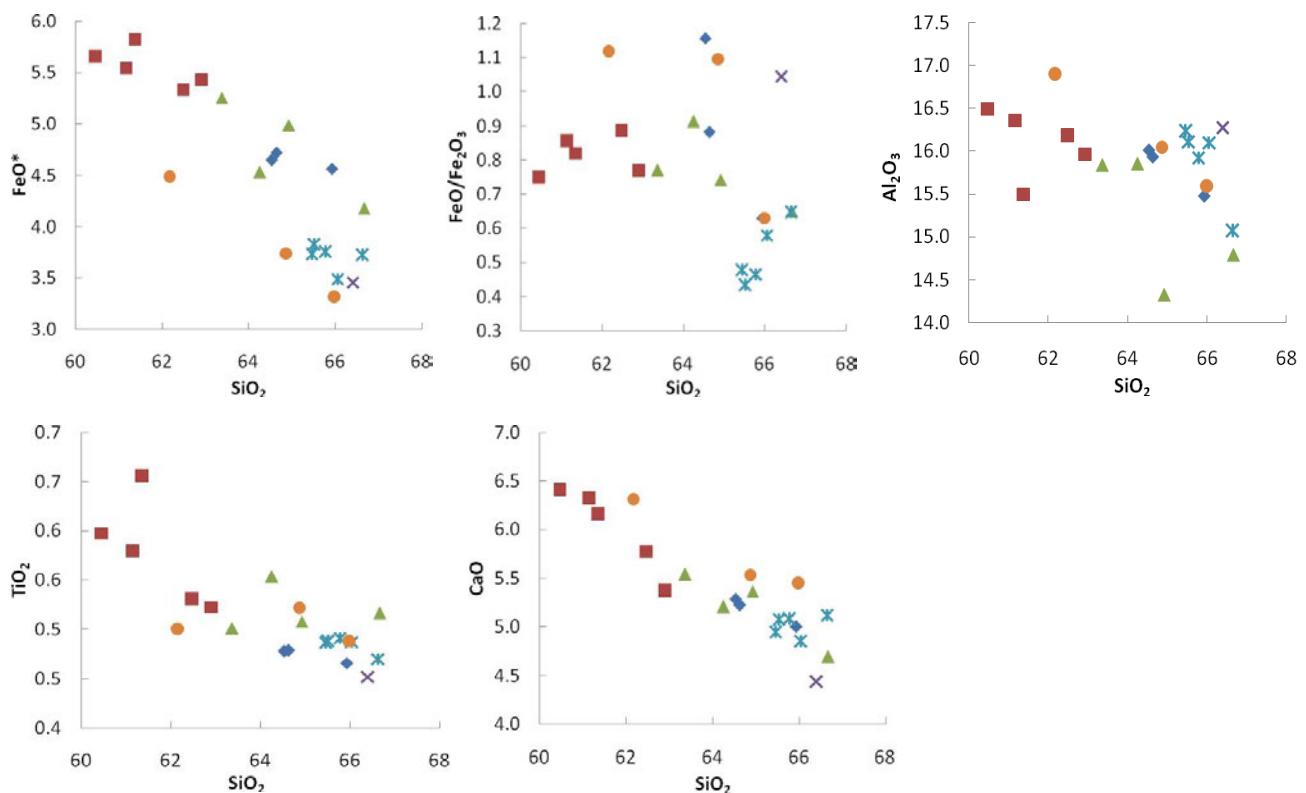
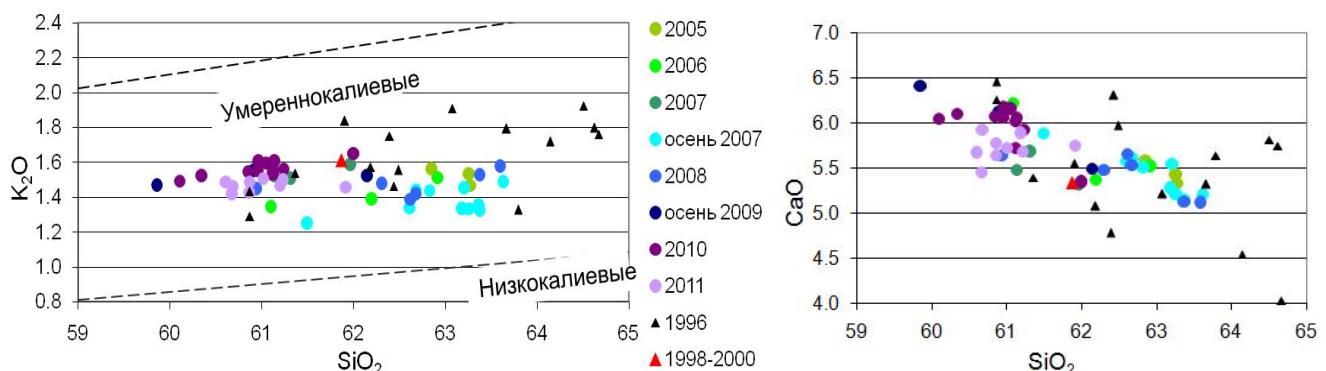


Рис. 3.20. Вариации содержаний главных окислов в зависимости от SiO_2 в пеплах извержений 2007–2012 г. вулкана Шивелуч (мас.%).

По химическому составу изверженные породы вулкана Карымский относятся к умереннокалиевым андезитам, в большей степени – к толеитовой серии. За весь период извержения (с 1996 г.) намечается тенденция к уменьшению содержания кремнекислоты в тефре. По сравнению с пеплами текущего извержения, поступившими на поверхность в 1996–2000 гг., результаты химического анализа тефры за рассматриваемый период выявили увеличение содержания оксида натрия (рис. 3.21).



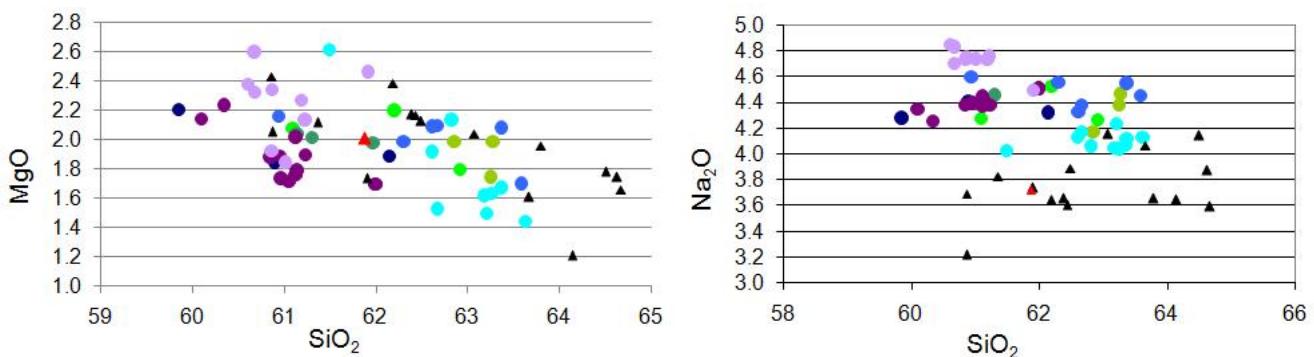


Рис. 3.21. Вариационные диаграммы для продуктов извержений вулкана Карымский (мас. %) 1996–2011 гг. Химический состав пород 2005, 2006, 2010 гг. по [Маневич и др., 2012], 1996 г. по [Муравьев и др., 1997], 1998–2000 гг. по [Федотов и др., 2002].

3.8. Основные выводы к Главе 3

Приведены оценки массы выброшенной тефры ряда извержений вулканов Камчатки 2006–2013 гг., которая является важной (Безымянный, Шивелуч), а иногда и основной (Карымский) составляющей их геологического эффекта за этот период.

В Приложении 4 перечислены все извержения вулканов Камчатки за 2006–2013 гг. с указанием типов их изверженных продуктов. Приведены масса или объем изверженных продуктов отдельно по их типам, подсчитанные автором и взятые из опубликованных источников. Таким образом, показана активность вулканов Камчатки за указанный период, типы их извержений (по эруптивным продуктам) и их изученность. Отмечен вклад автора в изучаемую проблему.

В течение 8 лет (2006–2013 гг.) регулярную активность проявляли вулканы Безымянный, Шивелуч, Карымский, Ключевской, произошло по одному длительному продуктивному ($\geq 0.5 \text{ км}^3$) извержению вулканов Кизимен и Толбачик, а также наблюдались слабые фреатические активизации Жупановского и Корякского вулканов.

За исследуемый период вынос тефры вулканом Безымянный в результате 10 извержений оценивается около 35 млн т или 4.5 млн т в год. Для хорошо изученных извержений видно, что массы отложений тефры и лавы сопоставимы между собой, а масса отложений ПП превышает их в ~3 раза (Приложение 4). Таким образом, масса тефры составляет около 1/5 общей изверженной.

На вулкане Карымский почти исключительным продуктом активности была тефра. Материал описываемых в 2005 г. лавовых куполов в кратере также выносился в результате эксплозий в раздробленном виде. Ежегодный объем тефры варьировал от 0.6 млн т (2008 г.) до 3.8 млн т (2006 г.), а за 8 лет составил 14.4 млн т, в среднем – 1.8 млн

т/год. Это совпадает со средней интенсивностью выноса вещества вулканом за последние 500 лет, так и за время его жизни – 2 млн т/год [Брайцева, Мелекесцев, 1989].

На вулкане Шивелуч, хотя и преобладает экструзивный тип извержения, и наибольший объем материала выносится в виде ассоциированных с ним обвалов, раскаленных лавин и ПП, количество выброшенной тефры за рассматриваемый период почти в 3 раза превышает показатели для вулкана Безымянnyй.

Самые продуктивные не только за рассматриваемый период, но и с начала ХХI века, извержения вулканов Толбачик (ТТИ-50) и Кизимен, однако, характеризовались небольшой долей тефры (6 и 1 мас.%, соответственно) в общей массе изверженных продуктов.

Оценки, сделанные автором для отдельных хорошо изученных извержений, экстраполяция этих оценок на малоизученные события, а также опубликованные данные (Приложение 4) дают возможность оценить примерный вынос пепла вулканами Камчатки за 8 лет (2006–2013 гг.). Пеплов андезитового состава было вынесено 150 ± 50 млн т, базальтового – 80 ± 10 млн т (в т.ч. 65 млн т – грубая пирокластика ТТИ, выпавшая в 1.5-километровой зоне). В среднем за год количество пеплов, извергнутое вулканами Камчатки, составляет 29 ± 7 млн т. По данным Гущенко И.И. [1965], в голоцене вулканы Северной Камчатки извергали ~46 млн т тефры в год, на современном этапе 36–45 млн т. Полученные автором более низкие оценки, вероятно, связаны с отсутствием мощных взрывоизвержений в рассматриваемый период ($VEI \leq 3$).

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕПЛОВ

Представлены результаты детального гранулометрического анализа пеплов изученных автором извержений 2006–17 гг. вулканов Безымянnyй, Кизимен, Шивелуч, Карымский, Жупановский, Толбачик, Ключевской, Алаид и Камбальnyй, выполненного комбинированным методом ситового анализа и лазерной дифракции. Показаны особенности гранулометрического состава пеплов разных извержений и/или стадий активности одного вулкана, вулканов со сходным и разным составом пород и типом извержений.

4.1. Гранулометрический состав пеплов андезитовых вулканов

4.1.1. Пеплы извержений вулкана Безымянnyй в 2006, 2009, 2012 гг.

Гранулометрический анализ 16-ти проб пеплов **извержения 24 декабря 2006 г.** был выполнен ситовым методом (рис. 4.1), в т.ч. более детальный гранулометрический анализ 4-х проб пепла – с использованием лазерного дифракционного анализатора “analysette-22 COMPACT” (Приложение 1, рис. 4.4). Пылеватая фракция (<56 мкм) во всех пробах составляет не менее половины. К ЮВ от оси пеплопада и в районе оси на расстоянии 30–40 км от вулкана её содержание – около 50%, песчаной (250–500 мкм) – 5–25%. В пробах, отобранных в 23–34 км от вулкана, максимальный размер частиц достигал 1 мм. К СЗ и З от оси пеплопада на тех же расстояниях ~40 км значительно возрастает доля фракции <125 мкм, а песчаной уменьшается; при удалении до 50–60 км доля пылеватых пеплов возрастает до 60–65%, с увеличением расстояния до 70–93 км – до 70–80%.

Был подсчитан общий гранулометрический состав выброса (<500 мкм), полученный на основе 16 площадных проб [Моисеенко, Малик, 2015], отобранных на расстоянии 23–99 км от вулкана: <63 мкм – 57.6%, 63–125 мкм – 14.9%, 125–250 мкм – 19.2%, 250–500 мкм – 8.3%. Таким образом, в пеплах вулкана Безымянnyй, выпавших на расстоянии более 23 км значительно преобладают пылеватые и алевритовые фракции.

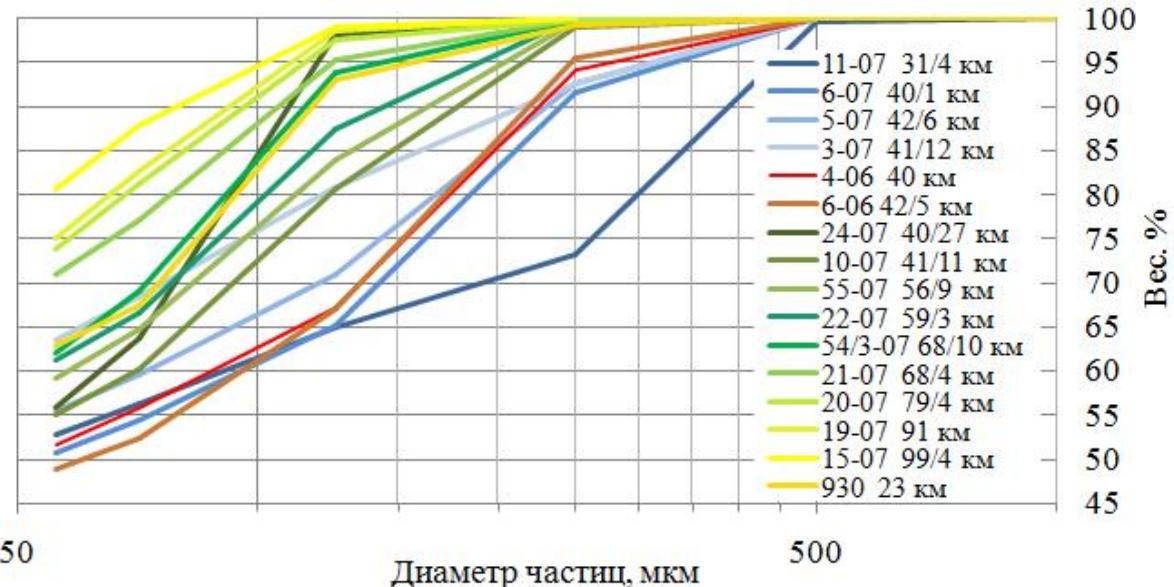


Рис. 4.1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержения вулкана Безымянный 24.12.2006 г. Анализ выполнен ситовым методом. После номера пробы указано расстояние от вулкана/от предполагаемой оси пеплопада. Синими тонами обозначены кривые проб, отобранных к юго-востоку от оси пеплопада, красно-бурыми – возле оси, зелено-желтыми – к северо-западу от оси и в дальней зоне пеплопада, проба 930 – к западу от оси.

Гранулометрический состав пеплов 2009 г. был определен для 9 проб ситовым методом и для 4-х из них – дополнительно методом лазерной дифракции. На расстоянии 25–46 км от центра извержения пылеватая фракция (<56 мкм) составляет около половины 36–49% (Приложение 2, рис. 4.2), что немного меньше чем для извержения 2006 г., также возросла доля крупнозернистой фракции и присутствуют более крупные частицы (до 2000 мкм). Это можно объяснить переносом пепла более сильным ветром.

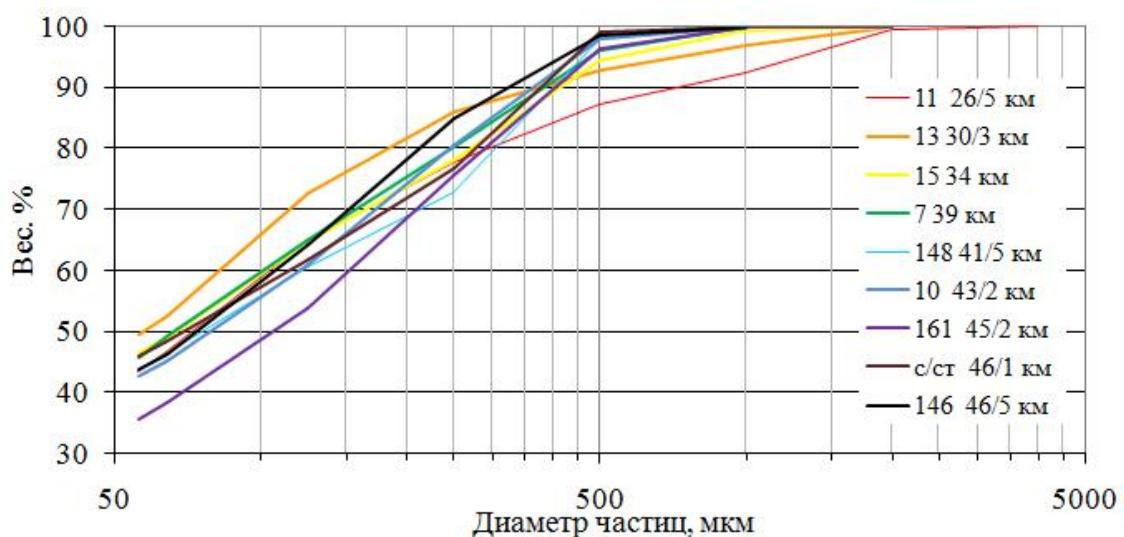


Рис. 4.2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержения вулкана Безымянного 17.12.2009 г. Анализ выполнен ситовым методом. После номера пробы указано расстояние от вулкана/от предполагаемой оси пеплопада.

Пробы пеплов извержения 9 марта 2012 г. все отобраны на небольшом удалении от вулкана – 3–20 км (Приложение 3). Несмотря на это, пылеватая фракция составляет значительную долю (43–51%) пяти проанализированных проб (рис. 4.3, Приложение 3).

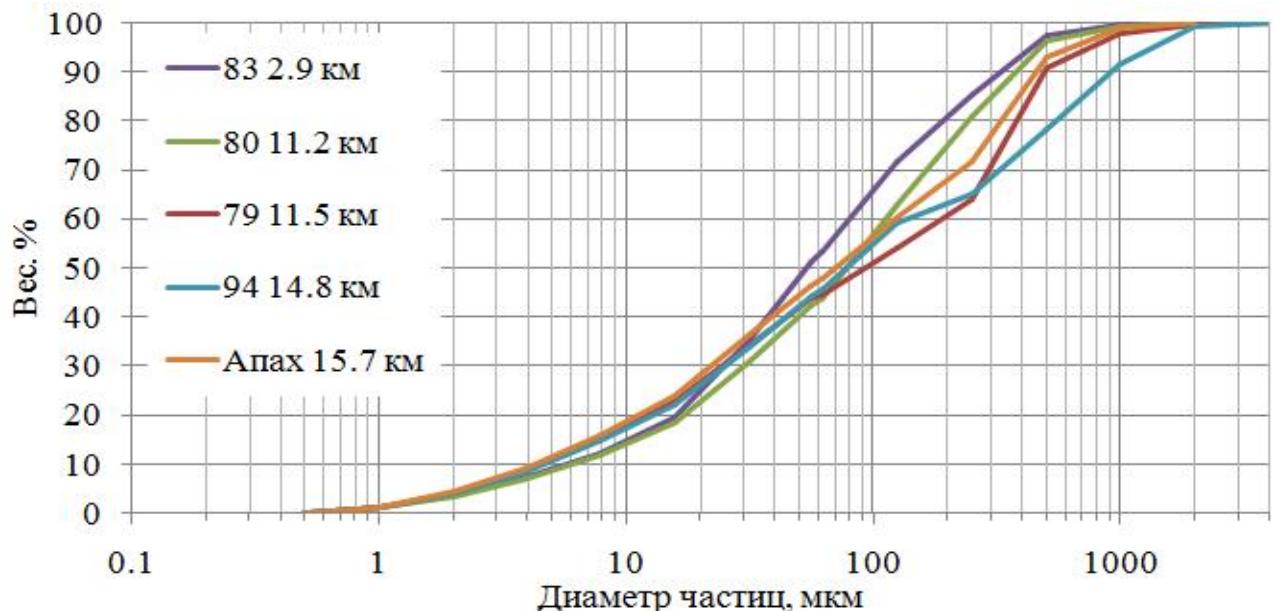


Рис. 4.3. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержения вулкана Безымянный 9.03.2012 г. Анализ выполнен ситовым методом и с использованием лазерного дифракционного анализатора. В легенде после номера пробы указаны расстояния их отбора от вулкана.

Проба № Б-83-12, отобранная на расстоянии 2.9 км к ЮВ от вулкана немного в стороне от оси пеплопада, представляет собой отложения пеплов облаков пирокластических потоков (раскаленных лавин), т.к. несмотря на близость к вулкану преобладает пылеватая фракция, отсутствует крупнозернистая. Химический состав этой пробы также отличается как от состава пепла на удалении 16 км от вулкана, так и от среднего состава обвально-пирокластических отложений, например, по оксиду кремния – больше, соответственно, на 1.5 и на 2.5% (см. разделы 3.1 и 4.3, рис. 4.18).

Для всех извержений вулкана характерно присутствие в пеплах большой доли пылеватой фракции, мало зависящей от расстояния отбора пробы от вулкана (рис. 4.4, Приложения 1, 2, 3). При этом состав самой этой фракции также мало различается в разных пробах.

Рассчитанная с помощью программы "А-22" к лазерному дифракционному анализатору частиц удельная поверхность пепла (УПП) мало зависит от расстояния отбора проб от вулкана, за исключением пеплов извержения 2006 г. (рис. 4.5). Данные особенности можно объяснить отложением одновременно с

пеплами эксплозий пеплов облаков пирокластических потоков, обычно формирующихся одновременно или сразу после взрывной фазы.

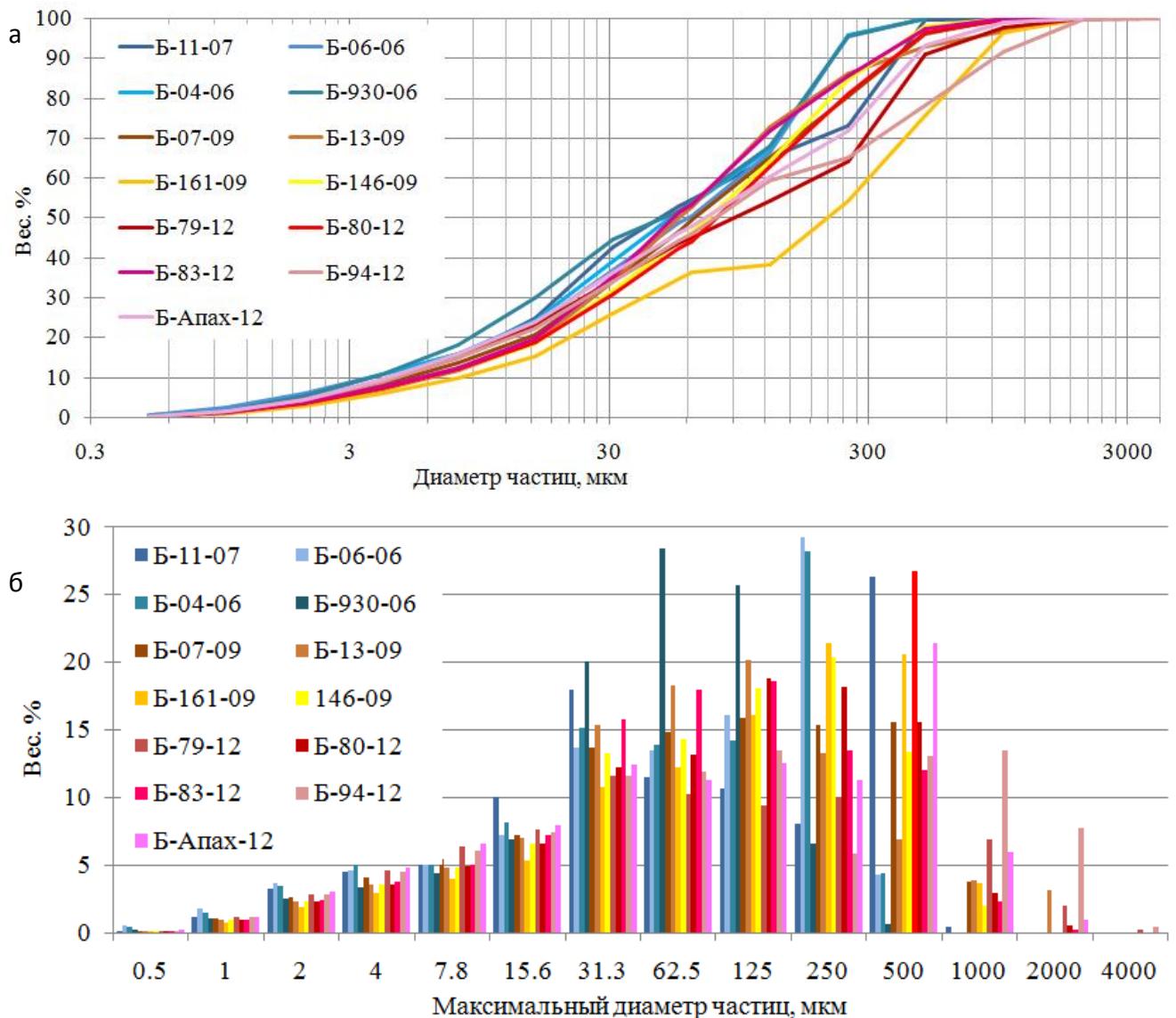


Рис. 4.4. Гранулометрический состав пеплов извержений вулкана Безымянnyй, определенный методами ситового анализа и лазерной дифракции: а – кумулятивные кривые; б – гистограммы.

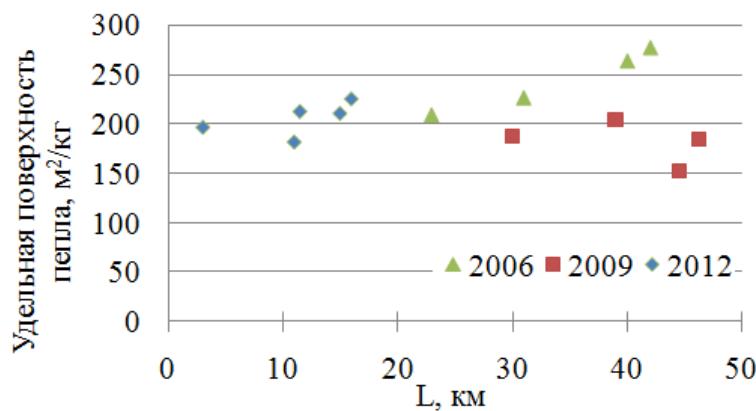


Рис. 4.5. Изменение удельной поверхности пеплов с расстоянием (L) от вулкана Безымянnyй.

Согласно результатам [Bonadonna et al., 2002, см. раздел ‘Elutriated mass’] при извержении 1995–99 гг. вулкана Суфриер (о. Монтсеррат) 4–16% от общей массы ПП было вынесено в виде пеплов в восходящих конвективных течениях, формирующихся над телом ПП в результате вовлечения окружающего воздуха в нагретую пирокластическую массу. Приведенная выше оценка для «коэффициента выноса» 4–16 вес.% является интегральной для всех типов ПП, имевших место в ходе извержения и связанных как с обрушениями купола вулкана, так и с эксплозивной деятельностью. Если предположить, на основании близости состава пород и типа извержения, что она в какой-то мере справедлива и для ПП Безымянного, то будем иметь для события 24.12.06 $M_{\text{попп}}=M_{\text{пп}}(9-13 \cdot 10^6 \text{ т}) \cdot 0.04(0.16)=0.4-2.1 \cdot 10^6 \text{ т}$, что составляет 6–30% от общей оцененной массы пепла. Полученная оценка, наряду с приведенными ниже результатами расчетов, позволяет предполагать заметный вклад пеплов облаков ПП в общую изверженную массу тефры в ходе данного эксплозивного события.

Как показали модельные расчеты для извержения 24.12.06 [Moiseenko, Malik, 2014; Моисеенко, Малик, 2015в], существенная доля выброса, ~30% (1.5 млн т), приходится на высоты 2.5–6.5 км н.у.м. (рис. 4.6), что значительно ниже уровня нейтральной плавучести газовзвеси (9.5 км н.у.м.), что отчасти можно объяснить выносом некоторой доли пеплового материала из краевых частей эруптивной колонны в сносящий ветровой поток, а также эксплозиями умеренной силы, имевшими место в предкульмиационной фазе извержения. Однако, вероятнее всего, основным источником выброса на этих высотах являются облака ПП. В пользу данного предположения свидетельствует повышенное содержание фракции $\leq 63 \text{ мкм}$ (57.7–59.9%) в пробах, для которых абсолютно преобладает вклад переноса из модельных источников на высотах ниже 6 км (рис. 3.1, точки в областях, отмеченных как ПП), по сравнению с пробами, отобранными на тех же расстояниях, но с преобладающим вкладом выбросов с больших высот (~51–53%). Приведенная выше оценка максимальной высоты выноса в облаках ПП согласуется с результатами наблюдений на вулкане [Гирина, 1998], позволившими ранее установить эмпирическую зависимость между высотой подъёма облаков ПП ($H_{\text{опп}}$) от поверхности земли и шириной фронта ПП (h_{Φ}): $H_{\text{опп}} \approx 8-10 h_{\Phi}$. В рассматриваемом событии $h_{\Phi} \approx 425 \text{ м}$, откуда следует $H_{\text{пп}} \approx 4 \text{ км}$ над поверхностью, или 5.5–6 км н.у.м., что соответствует модельному прогнозу. Высокая вероятность такого сценария следует и из общей структуры поля ветра в

окрестности вулкана: ветры на нижних уровнях дули примерно поперёк главной оси пеплопада, что и обусловило снос частиц, выброшенных на высотах менее 6 км, в СЗ и З направлениях от вулкана (рис. 3.1). В пользу данного предположения выступает и хорошее согласование между приведенной выше оценкой суммарного выноса в облаках ПП, 0.4–2.1 млн т, и величиной 1.5 млн т, восстановленной по регрессионной модели.

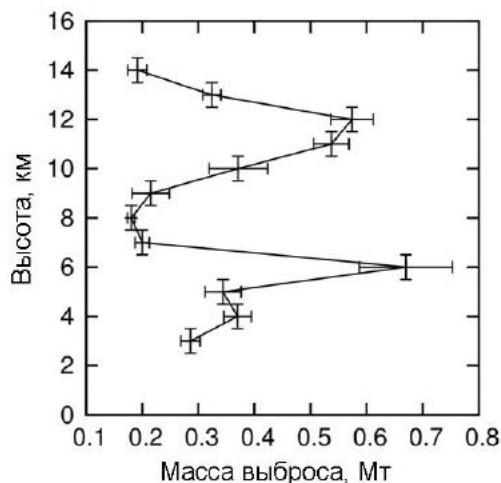
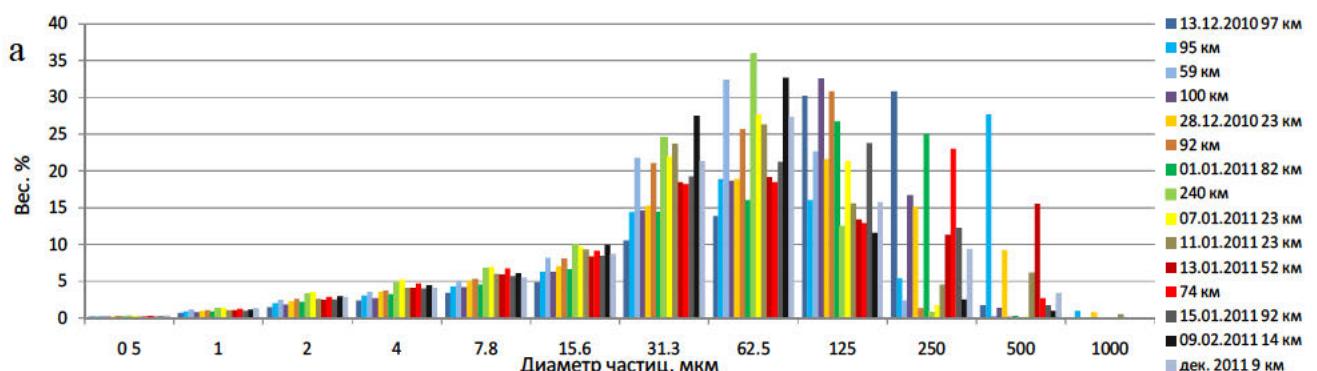


Рис. 4.6. Распределение массы пеплового выброса по высотам в эруптивном облаке при извержении на вулкане Безымянный 24.12.06. Вертикальные линии – интервалы высот выброса (шаг 1 км) для модельного источника, горизонтальные линии – стандартные отклонения для восстановленных величин.

Аналогичная ситуация наблюдалась и во время других извержений этого вулкана. Совместное отложение пеплов "как из пепловых облаков, поднимающихся над ПП во время их распространения, так и из пепловых облаков эксплозий, происходящих на куполе" отмечено для извержения 1993 г. [Белоусов и др., 1998].

4.1.2. Пеплы вулкана Кизимен (2010–11 гг.)

Гранулометрический анализ пеплов вулкана Кизимен был выполнен для 29 проб ситовым методом, из них для 23 проб – методом лазерной дифракции. Во всех пробах пепла вулкана Кизимен независимо от расстояния от вулкана пылеватая фракция (≤ 56 мкм) составляет 44–81% (≤ 63 мкм – 50–85%), за исключением пеплов начала активизации 10–14 декабря 2010 г., имеющих более крупнозернистый состав (≤ 56 мкм – $\leq 33\%$) (Приложение 5, рис. 4.7).



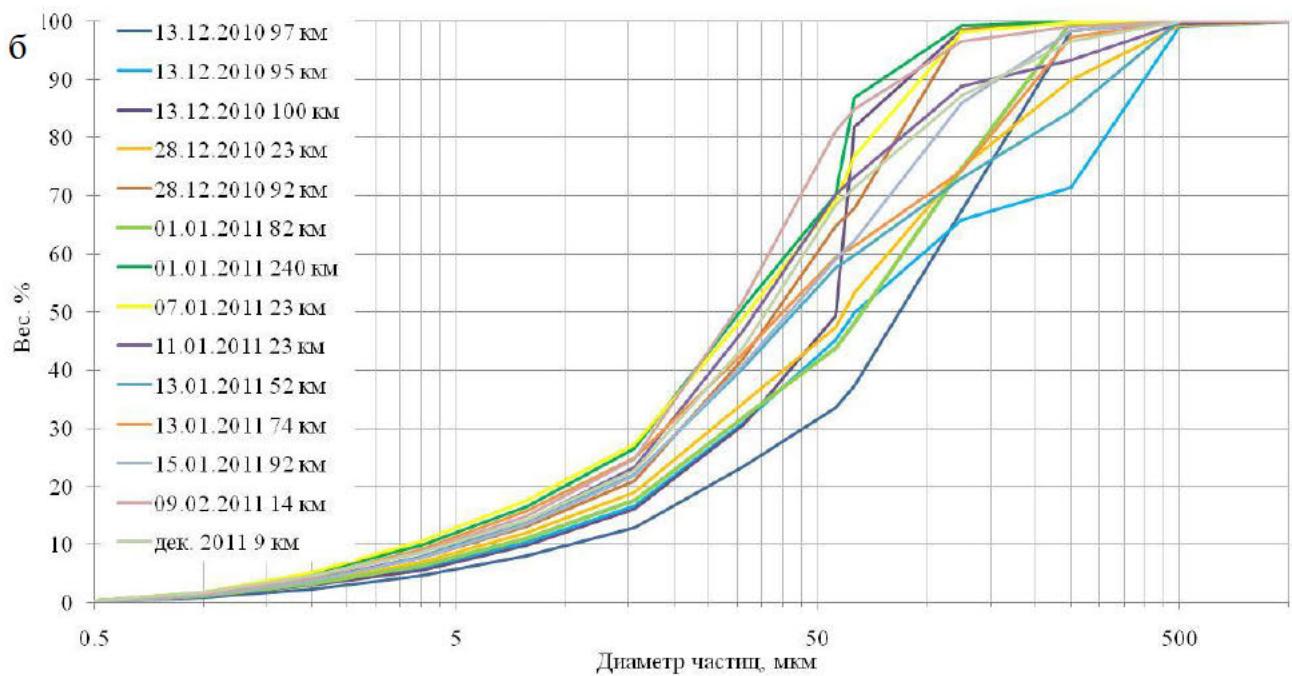


Рис. 4.7. Гранулометрический состав пеплов разных периодов извержения вулкана Кизимен, указана дата выброса и расстояние от вулкана (а – гистограммы, б – кумулятивные кривые).

Для эксплозивного события 13.01.2011 г. выполнен полный гранулометрический анализ 11 проб пепла. Результаты, представленные на гистограмме (рис. 4.8) и расположенные в порядке увеличения расстояния отбора пробы от вулкана, не обнаруживают закономерного увеличения доли мелких фракций и уменьшения доли крупных с удалением от центра извержения.

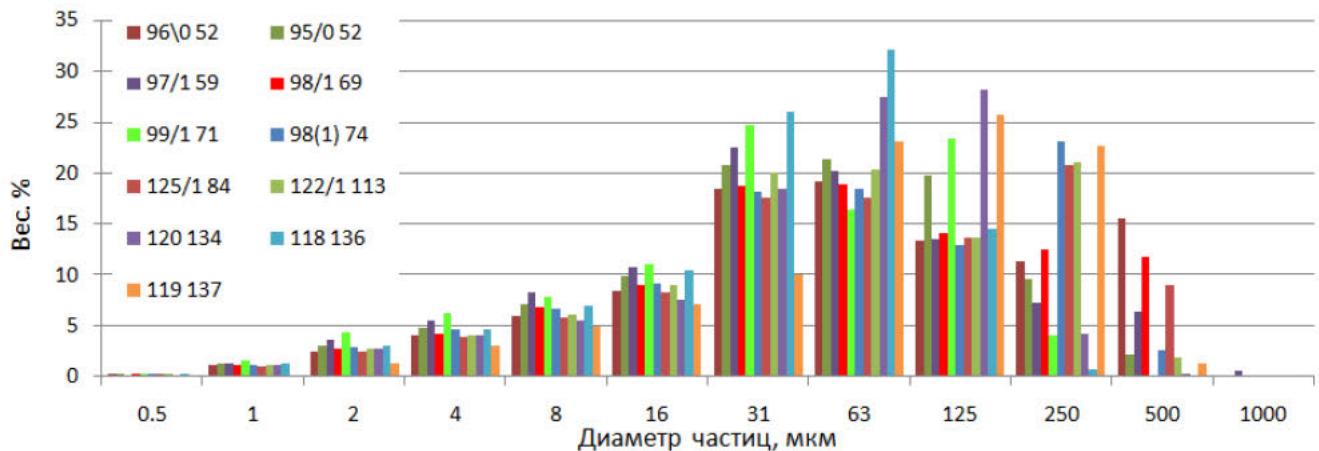


Рис. 4.8. Гранулометрический состав пеплов вулкана Кизимен эксплозивного события 13.01.2011 г., указан номер пробы и расстояние от вулкана (км).

Такое большое содержание пылеватой фракции в тефре извержения вулкана Кизимен и отсутствие зависимости ее содержания от расстояния от вулкана, вероятно, связано с отложением пеплов облаков ПП. Образование ПП при каждой эксплозии было

характерной особенностью этого единственного наблюдавшегося извержения данного вулкана.

4.1.3. Пеплы вулкана Шивелуч

Был выполнен ситовый анализ 13-ти проб пеплов вулкана Шивелуч периода декабрь 2006 – февраль 2007 гг., шести проб активизации в октябре 2010 г. (в т.ч. анализ одной пробы методом лазерной дифракции). Также был произведен полный гранулометрический анализ двух проб пепла, выпавшего в 2016 г.

Согласно разделению на 2 типа, указанному в главе 3, к пеплам эксплозий относятся пеплы проб № 54/4, 4/3, 12, 16/2, 2, 8, 6 (рис. 4.9); залегающих в самом нижнем горизонте снежного разреза зимы 2006–07 гг. Пеплы проб № 4/1, 34/3, 7/1, 93/1, 33/2, 4/2 (рис. 4.9), залегающих в средней и верхней частях разреза, отложились из облаков, сформировавшихся над пирокластическими потоками или лавинами. Вероятно, часть проб (№ 16/2) имеет смешанный генезис.

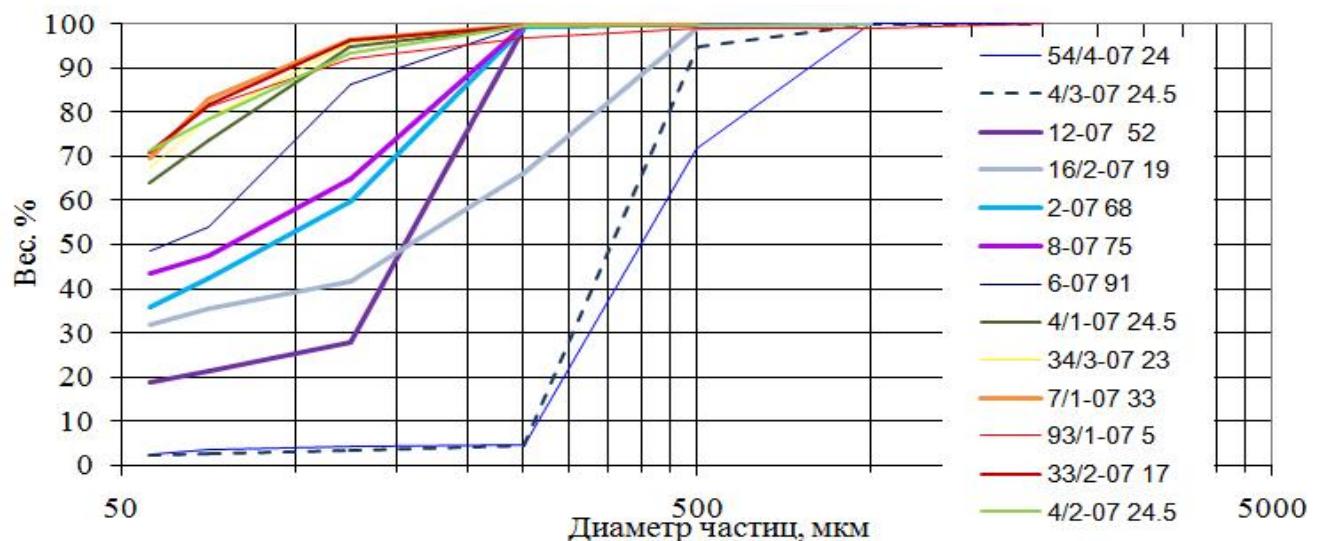


Рис. 4.9. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов вулкана Шивелуч 2006–07 гг. В легенде указан номер пробы и расстояние от вулкана в км (характеристику образцов пеплов см. Приложение 6).

Все пробы, отложившиеся в результате **активизации в октябре 2010 г.**, характеризуются чрезвычайно высоким содержанием пылеватой фракции даже на расстояниях 17–26 км от вулкана (фракция <56 мкм – более 72%). Это говорит об их преимущественном происхождении из пепловых облаков, сформировавшихся над обвальным отложениями и ПП. Примерно такой же состав имеют пеплы, отобранные в 2016 г. (рис. 4.10).

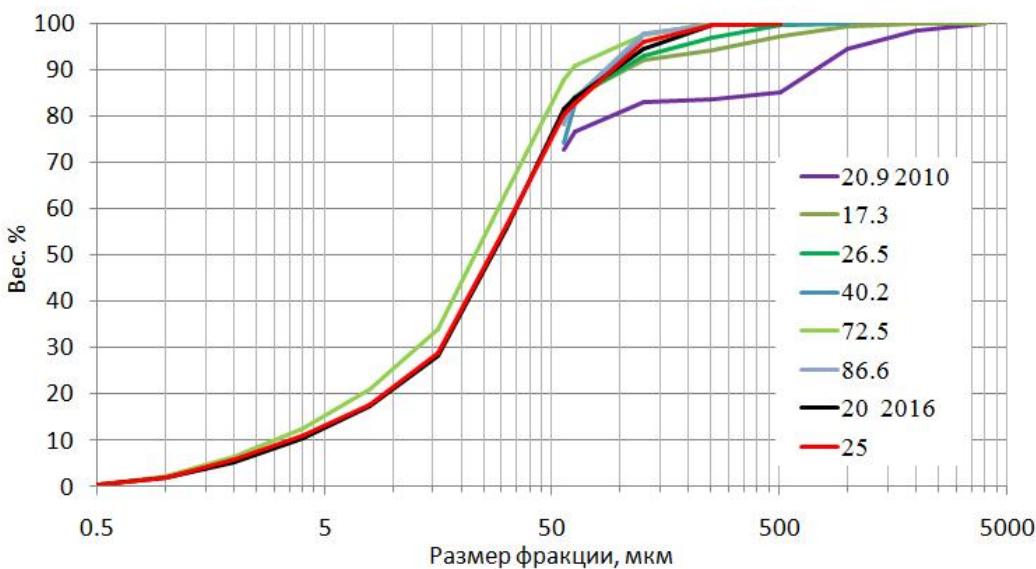


Рис. 4.10. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов вулкана Шивелуч, изверженных в октябре 2010 г. и в 2016 г. В легенде указано расстояние от вулкана в км и год извержения.

4.1.4. Гранулометрический состав пеплов вулкана Карымский

Пеплы вулкана Карымский имеют явно более крупнозернистый гранулометрический состав по сравнению с уже рассмотренными пеплами вулканов Безымянный, Шивелуч (за исключением пеплов сильных взрывов) и Кизимен. Одна из причин – небольшое расстояние от вулкана. Автором был выполнен анализ 3 проб, отобранных в районе стационара ИВиС (3.8 км от вулкана). Их гранулометрический состав существенно различается между собой, вероятно, по причине различного типа и силы взрывов, высоты выброса и близости оси пеплопада (рис. 4.11). Особо выделяется резким преобладанием песчаной и практически отсутствием пылеватой фракции пепел выброса 21 апреля 2007 г., который наблюдался автором. Это была относительно мощная взрывная деятельность высотой 3 км над кратером после периода покоя более недели.

Пеплы, отобранные на более дальних расстояниях (до 9 км от вулкана) в 2006 г., содержали не более 35 вес.% фракции <100 мкм (более тонкие фракции не определялись) [устное сообщение Жиделевой Т.М., 2007].

Вторая причина более крупнозернистого состава пеплов вулкана Карымский – их преимущественно взрывной генезис. За время полевых работ, проводимых автором в районе вулкана (примерно по 2 недели весной, летом и зимой 2005 г., весной 2007, 2008 и 2011 гг., многочисленных коротких посещений) отмечалась активность в виде

эксплозий и пепло-газовой эмиссии, без формирования ПП и существенных лавин.

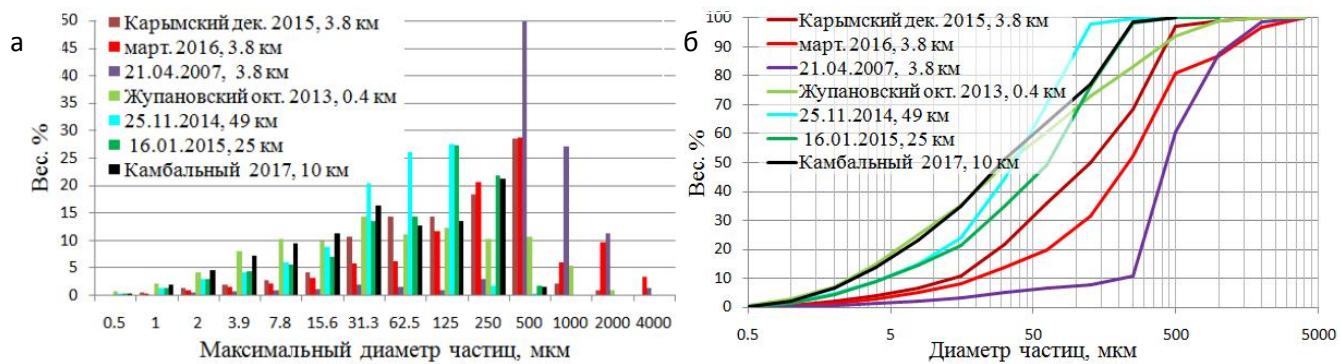


Рис. 4.11. Гранулометрический состав пеплов Карымского, Жупановского и Камбального вулканов: а – гистограммы; б – кумулятивные кривые. В легенде указана дата извержения и расстояние от вулкана.

4.1.5. Гранулометрический состав пеплов вулканов Жупановский и Камбальный

Был определен гранулометрический состав пепла начальных выбросов вулкана Жупановский, происходивших из трещины-провала в октябре 2013 г., и двух пеплов эксплозий в ноябре 2014 г. и январе 2015 г. (рис. 4.11). Особая форма кумулятивной кривой и распределение на столбчатой диаграмме по фракциям для пеплов начала активизации в октябре 2013 г. подтверждает их отличное от других пеплов происхождение, – судя по преобладанию резургентных измененных частиц (отмечено под бинокуляром) и очень высокому содержанию пылеватой фракции на расстоянии менее 0.5 км от взрывной воронки, эти пеплы образовались в результате фреатических взрывов. Кривые и диаграммы для двух остальных проб пеплов (25.11.2014 и 16.01.2015) схожи с таковыми для пеплов эксплозий вулкана Карымского, только смешены в сторону преобладания более мелкой фракции, что можно объяснить большим расстояния от вулкана, а так же, вероятно, фреато-магматическим характером эксплозий [Горбач и др., 2018].

Пепел Камбального вулкана, извержение которого наблюдалось с 25 марта по 9 апреля 2017 г., был отобран в 10 км к югу от вулкана. Пепел является резургентным, что показало его изучение под бинокуляром и СЭМом, а также доказано в работе [Рычагов и др., 2017]. Его гранулометрический состав практически совпадает с составом пепла Жупановского вулкана начальной фреатической стадии извержения, за исключением фракций >125 мкм, что связано с разным расстоянием отбора проб от вулкана (рис. 4.11).

4.2. Гранулометрия пеплов основного состава (Трещинного Толбачинского извержения 2012-13 гг., вулканов Ключевской и Алайд)

Гранулометрический анализ пеплов ТТИ-50, представленный на рис. 4.12, выполнен ситовым методом с промывкой водой и методом лазерной дифракции для четырех проб: трех, отобранных в 52 км к ССЗ (т. 357) послойно (357/1 – нижний, 357/3 – верхний) через 4 дня после начала извержения, и одной – в 7 км к ЮВ (2 слоя вместе) в конце декабря 2012 г. Преобладающие фракции для пеплов, выпавших на удалении 52 км от вулкана, – 63–125 и 125–250 мкм, 7 км – 250–500 и 500–1000 мкм. Из 3-х образцов пеплов, выпавших в 52 км от центра извержения, наиболее крупнозернистый состав имеет пепел среднего горизонта.

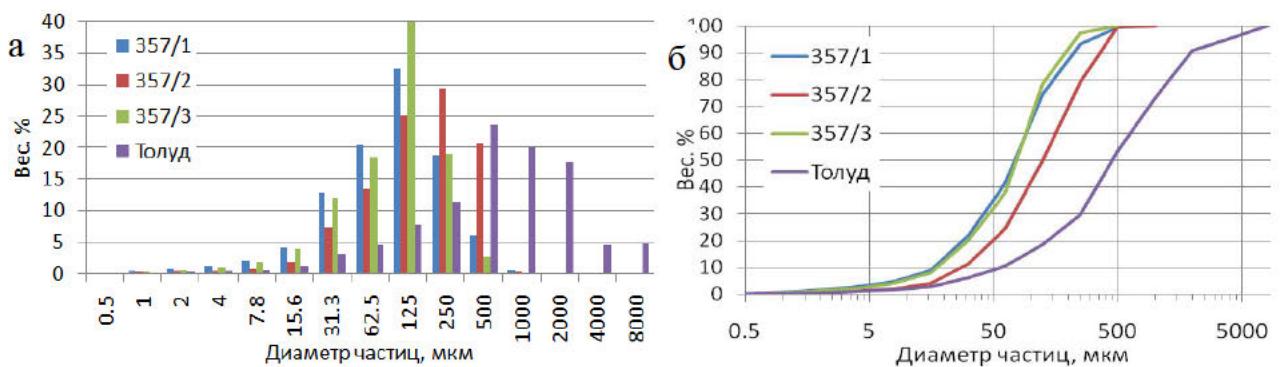


Рис. 4.12. Гранулометрический состав тефры ТТИ-50: а – гистограммы распределения по фракциям, б – кумулятивные кривые.

Гранулометрический анализ двух проб пепла, отобранных на вершине вулкана Алайд ~50 м и в ~150 м от кратера, был выполнен совместно ситовым методом с промывкой водой и методом лазерной дифракции. Заметны значительные различия в гранулометрическом составе этих двух проб (более мелкозернистый дальше от кратера) (рис. 4.13) и в то же время их значительно более крупнозернистый характер по сравнению пеплами других вулканов Камчатки, в особенности, андезитовых [Малик, Моисеенко, 2016]. Однако данные пробы пепла нельзя рассматривать как характеризующие данный вулкан, т.к. пробы были отобраны только на кратере и это извержение было довольно слабым (см. Главу 3).

На графике (рис. 4.13) приведены также результаты гранулометрического анализа двух проб пепла вулкана Ключевской извержений 2013 и 2015 г., отобранных в 33 и 32 км от вулкана. Пеплы извержения 2015 г., отобранные в середине февраля, по гранулометрическому составу соответствуют изученным пеплам других базальтовых вулканов, а пеплы выброса 17 ноября 2013 г. имеют значительно более мелкозернистый

состав, близкий к изученным андезитовым пеплам. Причин такого различия может быть несколько: разная интенсивность фрагментации магмы, условия, способствовавшие образованию пепловых агрегатов (в 2013 г.) и др.

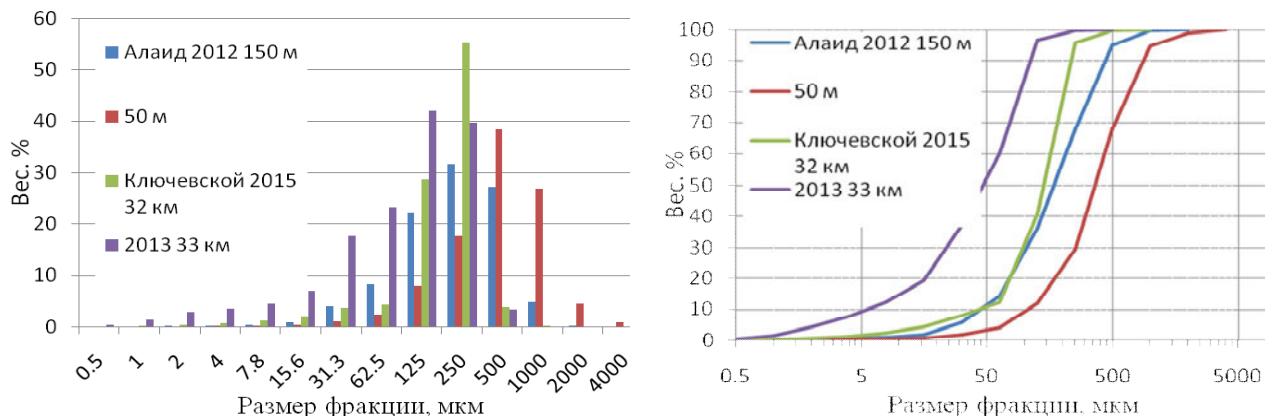


Рис. 4.13. Гранулометрический состав тэфры вулканов Алаид и Ключевской: диаграмма распределения по фракциям и кумулятивные кривые.

На графике (рис. 4.13) приведены также результаты гранулометрического анализа двух проб пепла вулкана Ключевской извержений 2013 и 2015 гг., отобранных в 33 и 32 км от вулкана. Пеплы извержения 2015 г., отобранные в середине февраля, по гранулометрическому составу соответствуют изученным пеплам других базальтовых вулканов, а пеплы выброса 17 ноября 2013 г. имеют значительно более мелкозернистый состав, близкий к изученным андезитовым пеплам. Причин такого различия может быть несколько: разная интенсивность фрагментации магмы, условия, способствовавшие образованию пепловых агрегатов (в 2013 г.) и др.

4.3. Сравнительная характеристика гранулометрического состава пеплов

Во всех пробах пеплов андезитовых вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч и Жупановский очень высоко содержание пылеватых фракций, независимо от расстояния отбора пробы от вулкана (рис. 4.14). В пеплах базальтовых вулканов Ключевской, Толбачик и Алаид, доля пылеватых фракций значительно меньше даже на значительном удалении от вулкана (30–50 км). Данные результаты соответствуют полученным ранее для других вулканов, согласно которым доля пылеватых пеплов больше для кислых эксплозивных извержений, вероятно, по причине большего содержания газов и вязкости магмы по сравнению с базальтовыми извержениями, кроме того, ПП продуцируют большое количество мелкой фракции за счет измельчения (истирания) [Rose, Durant, 2009]. В то же время, изученные пробы пеплов андезитового вулкана Карымский характеризуются относительно небольшим содержанием пылеватой фракции.

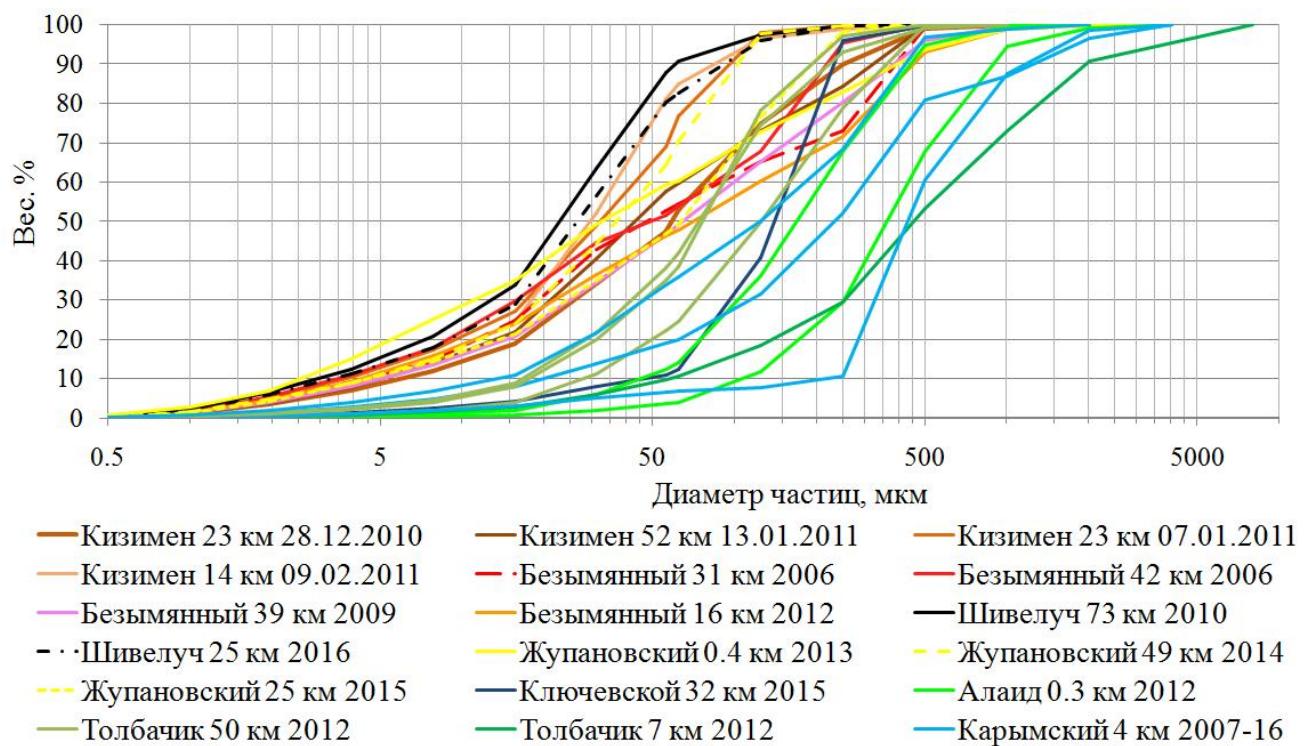


Рис. 4.14. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержений вулканов Камчатки и Алаид. В легенде после названия вулкана указано расстояние отбора пробы и дата извержения.

Для сравнения пеплов вулканов по гранулометрическому составу использовался суммарный показатель – удельная поверхность пеплов (УПП) (рис. 4.15). УПП для всех проб пеплов андезитового и дацитового состава имеет высокие значения (поле 2 на рис. 4.15), за исключением пеплов вулкана Карымский. Причем для отдельных событий отмечается очень слабая корреляция УПП пеплов с расстоянием от вулкана (Безымянный 2006 и 2012 гг.) или её полное отсутствие (Безымянный 2009 г., Кизимен 13.01.2011 г. – наиболее детально изученное событие), вместо ожидаемого увеличения УПП с расстоянием. Такое увеличение можно отметить для пеплов дальнего разноса вулкана Кизимен, которое является продолжением тренда для пеплов основного состава (поле 1 на рис. 4.15). Максимальную УПП при минимальном расстоянии от вулкана имеет резургентный пепел вулканов Жупановский начальной, фреатической стадии извержения, и Камбальный (поле 3 на рис. 4.15).

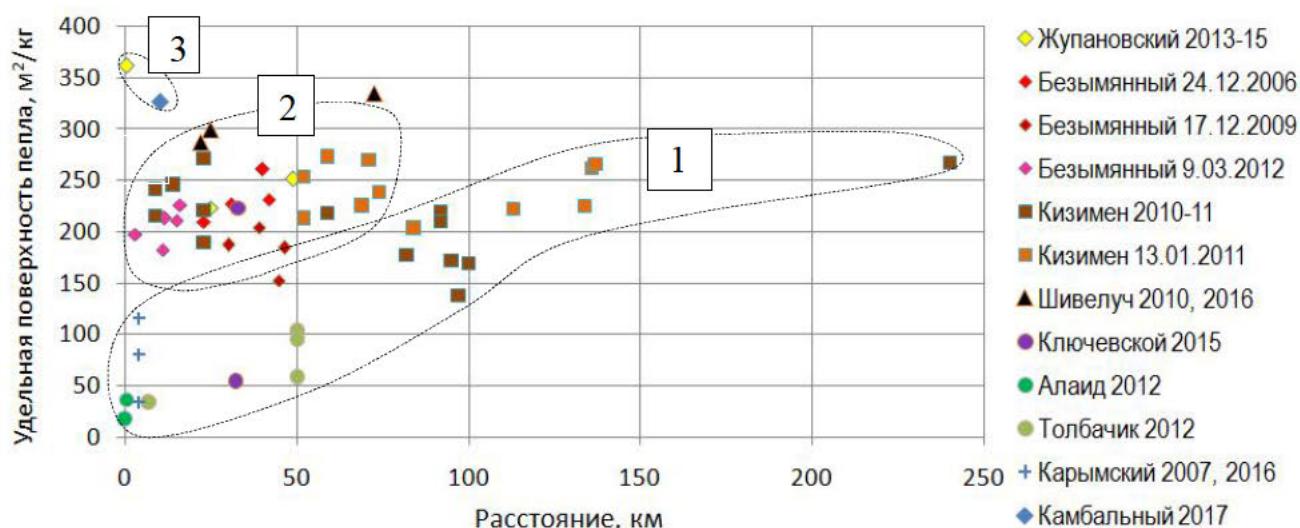


Рис. 4.15. Зависимость УПП от расстояния от вулкана.

Основные различия в гранулометрическом составе пеплов объясняются существованием двух его источников – эруптивной колонны и облаков ПП (коингнимбритовых облаков), на основании статистически обоснованного разделения отложений на два указанных типа по двум новым гранулометрическим параметрам, предложенным [Dartevelle et al., 2002]. Новые параметры это: (1) УПП/средний размер (м^{-2}) и (2) средний размер/сортировка (безразмерный). Первое отношение разделяет грубозернистые от мелкозернистых отложений (отложений ПП от облаков ПП, пеплопада в ближней от дальней зоны). Второе отношение разделяет отложения, связанные с формированием ПП, от отложений плинианских выбросов. Согласно представленной на рис. 4.16 диаграмме пробы пепла разделяются на две группы: верхняя левая часть – отложения пеплов облаков ПП (ПОПП) и правая нижняя – эксплозивные пеплы. Как уже было рассмотрено, пеплы извержений вулканов Безымянnyй, Кизимен, Шивелуч часто имеют смешанный генезис, т.е. эксплозии обычно сопровождаются пирокластическими потоками или раскаленными лавинами, над которыми формируются облака пыли. Таким образом, пепловые отложения этих вулканов формируются за счет обоих источников – эруптивной колонны и облаков ПП. Выделенные отдельно пеплы дальнего разноса (59–240 км) вулкана Кизимен закономерно попадают правее линии раздела, т.к. ПОПП, поднимающиеся на относительно небольшую высоту, не могут переноситься на такие большие расстояния. Пеплы андезитового вулкана Карымский, для которых характерен эксплозивный генезис, занимают промежуточное положение между точками для пеплов андезитовых и базальтовых вулканов.

Извержение вулкана Жупановский, начавшееся в 2013 г., пока изучено недостаточно; расположение точек на диаграмме можно объяснить фреатомагматическим типом эксплозивной активности. Отдельно (слева) располагается точка для фреатических выбросов Жупановского вулкана начального периода активности. Там же расположена точка для резургентных пеплов извержения Камбального вулкана.

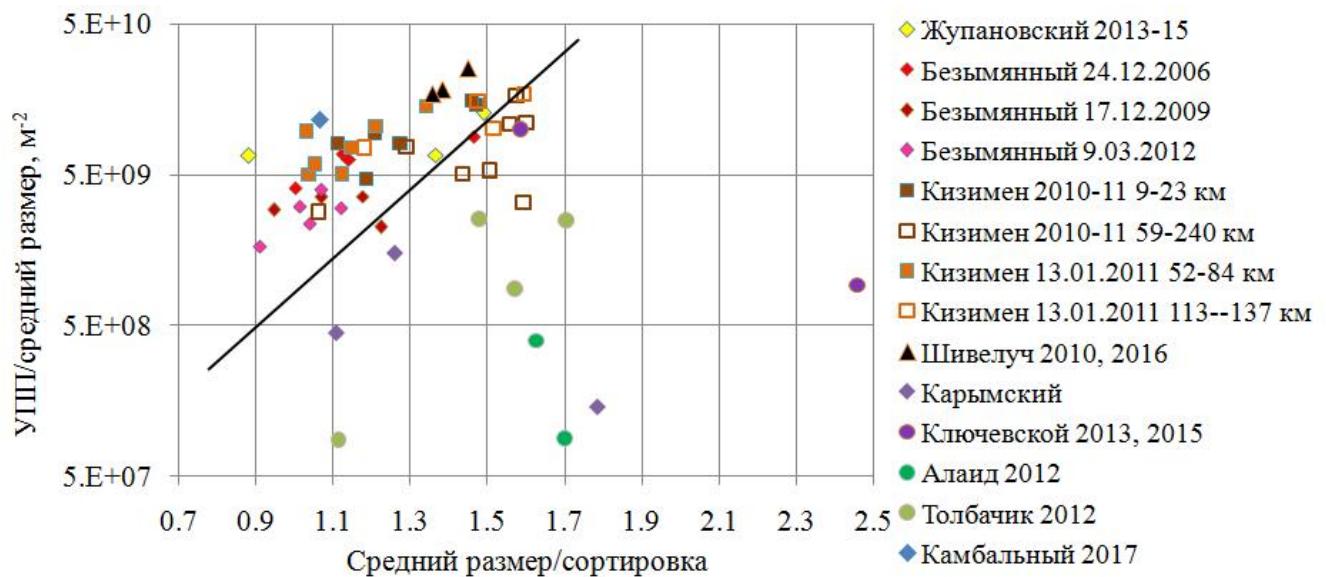


Рис. 4.16. Гранулометрические отношения для образцов тефры по [Dartevelle et al., 2002]. Линия обозначает границу между пеплами эксплозий (субклинианских, вулканских, стромболианских выбросов) и отложениями, ассоциированными с ПП.

Полученные на основе изучения гранулометрического состава выводы, объясняют особенности валового химического состава тефры. Так, благодаря вкладу пеплов облаков ПП, имеющих более кислый химический состав (на 2–3% SiO₂) по сравнению с другими типами пирокластики [Гирина, 1998], в ближней и средней зоне не удается проследить эоловую гравитационную дифференциацию пеплов для извержений вулканов Кизимен и Безымянnyй, проявляющуюся в закономерном изменении их химического состава с расстоянием. Напротив, в пепле вулкана Кизимен, отобранном в ближнее зоне, явно повышено содержание SiO₂ – до 69%, по сравнению с другими пеплами (рис. 4.17). Аналогичная ситуация наблюдается и для продуктов извержений Безымянного вулкана [Малик, 2011] (рис. 4.18). Эоловую дифференциацию можно проследить для пеплов дальнего разноса (>40 км от вулкана).

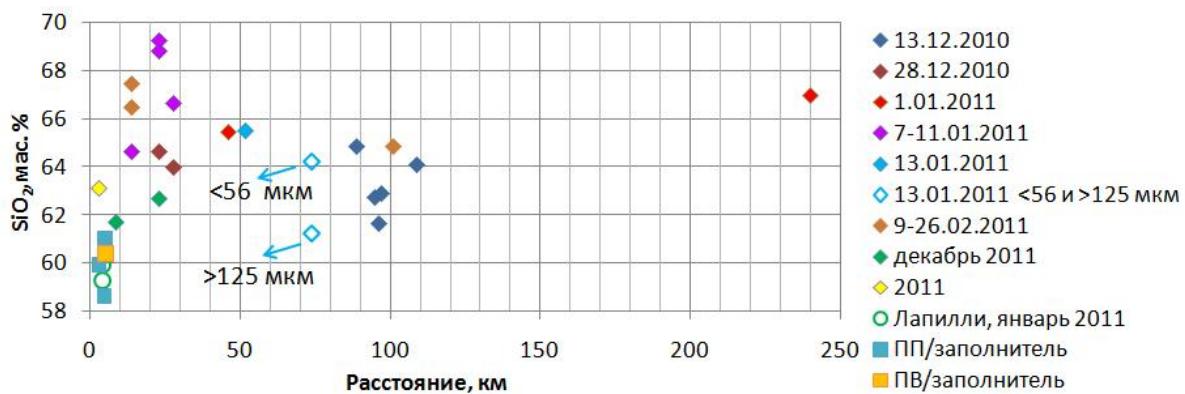


Рис. 4.17. Содержание SiO_2 в пирокластике вулкана Кизимен в зависимости от расстояния от вулкана. В легенде указаны даты пеплопадов, ПП – отложения пирокластического потока, ПВ – отложения пирокластической волны.

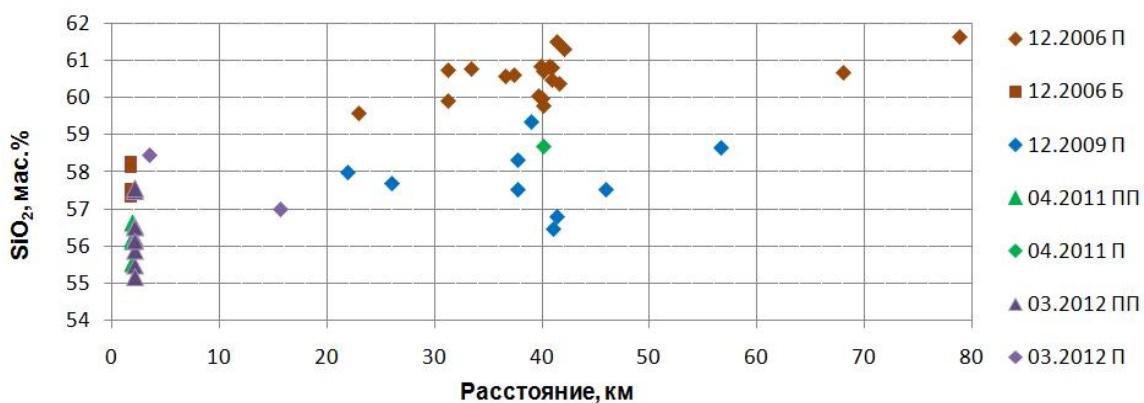


Рис. 4.18. Содержание SiO_2 в пирокластике вулкана Безымянный в зависимости от расстояния от вулкана. В легенде указаны даты извержений, П – пепел, Б – бомба, ПП – пирокластический поток.

Гранулометрический состав пепла и опасность для здоровья человека.

Использование лазерного дифракционного анализатора частиц позволило выделить кроме "ингалируемой" фракции (<100 мкм), способной проникать только в верхние отделы дыхательных путей, вызывая раздражение, также и "грудную – торакальную" фракцию (<10 мкм), осаждающуюся в верхних отделах легких, вызывая приступы астмы и бронхита, и "респирабельную – вдыхаемую" фракцию (<4 мкм), частицы которой осаждаются в альвеолярном, газообменном отделе, вызывая рак легких, силикоз, и поэтому представляющие наибольший интерес для задач экологии [Hillman et al., 2002]. В пеплах вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч содержание опасных для здоровья фракций велико – <10 мкм – 16–24% и <4 мкм – 8–13% на расстоянии 10–100 км от вулкана, достигая максимума во фреатических пеплах Жупановского (15 и 28%) и Камбального (рис. 4.19). Для вулканов Алайд, Ключевской, Толбачик оно не превышает

6% (<10 мкм) и 2.7% (<4 мкм). Пеплы вулкана Карымский имеют промежуточное положение.

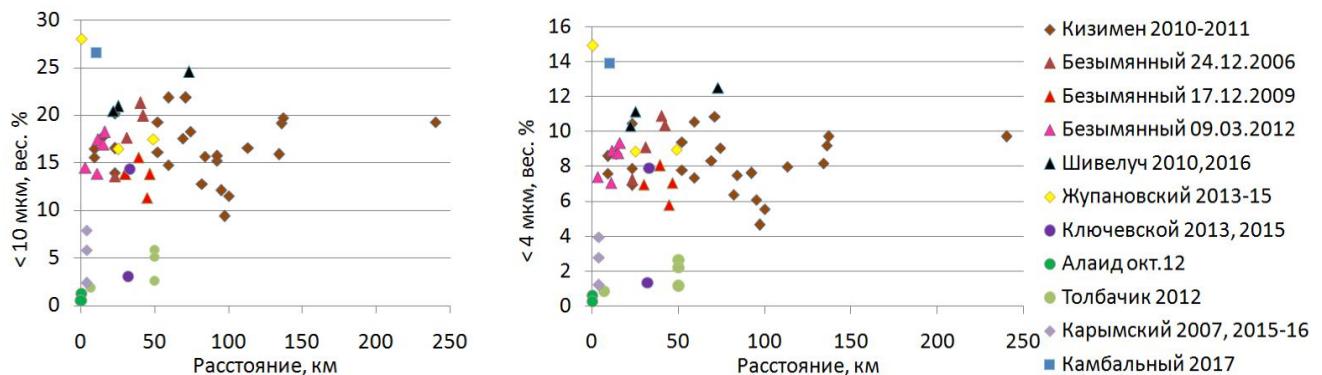


Рис. 4.19. Содержание «опасных» для здоровья фракций в пеплах вулканов Камчатки и Алаид на разных расстояниях от вулкана.

Используемая методика гранулометрического анализа позволяет также определить долю тонкой фракции (<30 мкм, осаждающейся в ламинарном режиме по закону Стокса, "very fine ash" [Rose, Durant, 2009]), представляющей особую опасность для авиации, т.к. она не может быть заранее выявлена радарами. В исследуемых базальтовых пеплах и пеплах вулкана Карымский ее содержание не превышает 20%; в андезитовых пеплах – от 33 до 62% (рис. 4.14).

Основные выводы к Главе 4

Впервые для представительного количества проб пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид выполнен гранулометрический анализ с использованием метода лазерной дифракции, позволяющего проводить разделение на фракции размером до 0.3 мкм.

Детальный гранулометрический анализ показал наличие значительной доли пылеватой фракции и отсутствие выраженной зависимости ее от расстояния в пеплах извержений андезитовых вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч, что объясняется двумя источниками пепловых отложений – эруптивная колонна и облака пирокластических потоков. Это подтверждается результатами математического моделирования, а также распределением точек на диаграмме, предложенной в [Darteville et al., 2002]. Пеплы базальтовых вулканов Алаид, Ключевской, Толбачик, а также андезитового вулкана Карымский, для эксплозивных извержений которых не свойственно формирование пирокластических потоков, имеют более крупнозернистый состав. Пеплы вулкана Жупановский по гранулометрическому составу близки к пеплам вулканов Безымянный и Кизимен. Значительная доля пылеватых частиц в них

объясняется фреато-магматическим характером эксплозий. Максимальное содержание пылеватых фракций отмечено в резургентных пеплах начальных эксплозий Жупановского и извержения Камбального вулканов.

Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение, например, связанное с уточнением аэродинамических параметров пепловых частиц в моделях атмосферного переноса вулканического пепла и численного прогноза пепловых облаков. Данные гранулометрического анализа для вулканов Безымянный и Кизимен использовались при численном решении обратной задачи восстановления массовых параметров пеплового выброса и валидации атмосферной модели переноса вулканического пепла для района Камчатки [Моисеенко, Малик, 2015а,б; Moiseenko, Malik, 2014]. Полученные данные о гранулометрическом составе, свойственного пеплам, и источников пепlopадов определенных вулканов важны для оценки воздействия на окружающую среду, здоровье человека и его хозяйственную деятельность, опасности для авиации, объяснения сорбционных и других свойств пеплов (см. Главу 5), особенностей вариации петрохимического состава и др.

ГЛАВА 5.

ВОДОРАСТВОРИМЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЕПЛОВ И ИХ ВЫНОС В РЕЗУЛЬТАТЕ
ИЗВЕРЖЕНИЙ

Глава посвящена водорастворимым компонентам пеплов извержений вулканов Камчатки и вулкана Алайд (Северные Курильские острова), происходивших в 2006–2017 гг., изученных посредством приготовления водных вытяжек из пеплов (см. раздел 2.1). Дополнительно, при проведении сравнительного анализа, были добавлены данные для извержений ближайших к городу вулканов Авачинский в 1991 г. [Дроздин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995] и Горелый в 1980–81 гг. [Кирсанов, Озеров, 1983]. На основе полученных результатов о геологическом эффекте эксплозивных извержений (см. главу 3, Приложение 4) и средних значений концентраций водорастворимых компонентов был оценен вынос летучих и выщелоченных из породы веществ пеплами в окружающую среду для отдельных извержений и в целом по Камчатке за рассматриваемый период и в среднем за год.

5.1. Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Безымянnyй**Извержение 24.12.2006 г.**

Были проанализированы суглеватые вытяжки из пеплов 16 проб, отобранных на расстоянии 30–70 км от вулкана. Результаты анализа вытяжек 9 наиболее представительных проб приведены в таблице 5.1 (данные по всем пробам – в Приложении 1). Используя среднее значение из результатов анализов 16-ти водных вытяжек и массу изверженного пепла (7 млн т, см. раздел 3.1), был подсчитан вынос водорастворимых веществ пеплами этого извержения. Таким образом, на территории пеплопада площадью более 8000 км², в окружающую среду вместе с 7 млн т пепла было выброшено ~29 тыс. т водорастворимых веществ, состав которых приведен в табл. 5.1.

Извержение 17.12.2009 г.

Были получены и изучены суглеватые вытяжки из пеплов 16 проб, отобранных с декабря 2009 г. по апрель 2010 г. на расстоянии 26–46 км от вулкана. Но вытяжки, полученные из проб, отобранных в апреле, имели относительно низкую концентрацию растворенных веществ, т.е., предположительно, были частично промыты начавшимся снеготаянием. Поэтому для оценок брались 9 результатов анализа вытяжек из пеплов, отобранных в декабре-марте. С использованием среднего арифметического из них был

подсчитан экологический эффект пеплопада 17 декабря 2009 г. – всего вместе с 4.5 млн т пеплов было вынесено около 7 тыс. т водорастворимых веществ (табл. 5.2).

Таблица 5.1. Состав водорастворимого комплекса пеплов извержения 24.12.2006 г., в мг на 100 г пепла

Компо-ненты	Номера проб									Ср.	Всего заизвержение, тыс.т
	Б-11	Б-13	Б-6-07	Б-22	Б-23	Б-5-07	Б-3-07	Б-10	Б-55		
pH	4.75	4.9	4.4	4.6	4.7	5.75	5.25	4.8	4.9	4.8	
F ⁻	5.6	9.2	5.1	11	16	10	10	12	16	10	0.7
Cl ⁻	45	57	62	78	76	58	75	78	70	66	4.6
SO ₄ ²⁻	164	200	185	218	231	192	231	223	225	211	15
Na ⁺	28	28	29	32	28	26	32	34	39	31	2.2
K ⁺	6.5	6.8	6	8	4.8	5	12	10	12	9.1	0.64
Ca ²⁺	55	70	67	87	84	69	76	77	80	74	5.2
Mg ²⁺	7	8.1	8	8	7.8	7	8	10	10	9	0.63
Сумма	312	380	362	442	447	368	444	445	452	410	29

Примечание. Характеристики проб пепла см. Приложение 1. Ср. – среднее арифметическое из результатов 16 анализов.

Таблица 5.2. Состав водорастворимого комплекса пеплов извержения 17.12.2009 г., в мг на 100 г пепла

Компо-ненты	Номера проб							Ср.	Всего заизвержение, тыс. т
	146	160	161	162	7	9	10		
pH	4.96	5.65	5.3	5.03	5.08	5.23	5.22	5.2	
F ⁻	9.9	11.9	7.6	7.0	4.3	4.0	3.7	6.6	0.25
Cl ⁻	52.9	64.1	41.6	45.0	35.7	29.8	31.0	42	1.69
SO ₄ ²⁻	96.5	102.2	80.8	67.1	59.9	50.7	55.1	68.7	2.68
Na ⁺	14.6	19.1	13.8	12.9	10.8	10.5	10.9	12.9	0.55
K ⁺	4.2	9.2	6.8	2.4	2.3	2.8	3.7	4.1	0.17
Ca ²⁺	49.0	55.2	37.6	35.7	35.4	29.9	30.8	36.7	1.47
Mg ²⁺	3.3	4.4	3.0	2.5	2.7	2.2	2.4	2.8	0.11
H ₄ SiO ₄	18.3	9.3	2.5		2.0	1.8	1.2	7.5	0.19
Сумма	249	275	194	173	153	132	140	180	7.25

Примечание. Характеристику проб пепла см. Приложение 2. Ср. – среднее арифметическое из результатов 9 анализов.

Извержение 9.03.2012 г.

Были проанализированы сугениевые вытяжки из пеплов 11 проб, часть из которых, особенно отобранных в апреле, имела относительно низкую концентрацию растворенных веществ, т.е., предположительно, были частично промыты начавшимся снеготаянием. Так как степень промытости пеплов оценить сложно, для расчета

количества вынесенных с 0.5 млн т тефры водорастворимых веществ были взяты их максимальные значения содержаний в пробах (табл. 5.3).

Таблица 5.3. Состав водорастворимого комплекса пеплов извержения 9.03.2012 г., в мг на 100 г пепла

Компоненты	Номера проб					Всего за извержение, т	
	77/2	80	81	94	ср.		
L, км	15	11	10	15			
l, км	0.5	2	3.7	2			
m, кг/м ²	710	290	84	182			
pH	5.4	5.5	5.3	5.4			
Cl ⁻	28.6	40.9	17.9	39.2	24.7	40.9	200
SO ₄ ²⁻	124	192	329	138	155	329	1650
Na ⁺	12.6	22.2	36.3	16.1	17.0	36.3	180
K ⁺	4.5	8.9	16.5	7.0	7.7	16.5	83
Ca ²⁺	42.7	57.7	83.8	48.7	47.1	83.8	420
Mg ²⁺	4.0	8.3	10.4	4.4	5.1	10.4	52
Fe ³⁺	0.2	2.9		2.7	2.9	2.9	15
H ₄ SiO ₄ _р	3.8	3.5			3.3	3.8	19
Сумма	221	336	494	256	263	524	2620

Примечание. Ср. – среднее арифметическое из результатов 4 анализов. F⁻ не определялся по техническим причинам. Полный список проб с характеристиками см. Приложение 3.

Общая характеристика водорастворимого комплекса пеплов вулкана Безымянnyй

Количество выносимых водорастворимых веществ на единицу массы пепла зависит от его гранулометрического состава, характеризующегося его удельной поверхностью: относительно более крупнозернистые пеплы, выносят меньше сорбированных веществ на единицу веса, чем более тонкие, пылеватые, обычно выпадающие на удалении от вулкана. Однако, как показано выше (раздел 4.1), удельная поверхность пеплов вулкана Безымянного мало зависит от расстояния их выпадения от вулкана, поэтому и значительный разброс точек на графике (рис. 5.1), позволяет выявить тенденцию роста минерализации вытяжек с удалением от вулкана только на расстоянии более 35-40 км, а для проб 2012 г. она однозначно отсутствует.

В работах [Башарина, 1958; Дубик и др., 1969] также показана зависимость концентраций компонентов в вытяжках из пеплов от его гранулометрического состава и расстояния, на котором выпал пепел. Полученные в нашей работе результаты уточняют и дополняют эти данные (для более дальних расстояний).

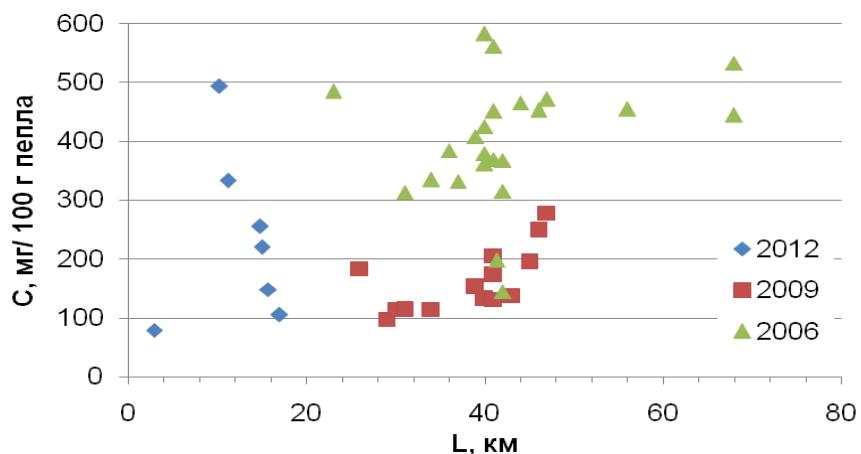


Рис. 5.1. Изменение содержания водорастворимых компонентов пеплов (С) извержений с увеличением расстояния (L) от вулкана Безымянnyй.

Значение pH проб снега, загрязненного пеплом извержения 24.12.2006 г., варьирует от 4.3 до 5.4, что ниже фоновых величин, и понижается с ростом минерализации в соответствии с логарифмическими ($pH=5.6-0.15\cdot\ln(M)$; $pH=6.2-0.6\cdot\lg(M)$) и степенной ($pH=5.7\cdot M^{-0.03}$) функциями. Показатель pH проб снега с пеплом извержений 2009 г. выше (4.9–5.5) и зависимость его от минерализации проб проявляется слабее, а пробы 2012 г. имеют фоновые значения показателя pH, независящие от минерализации.

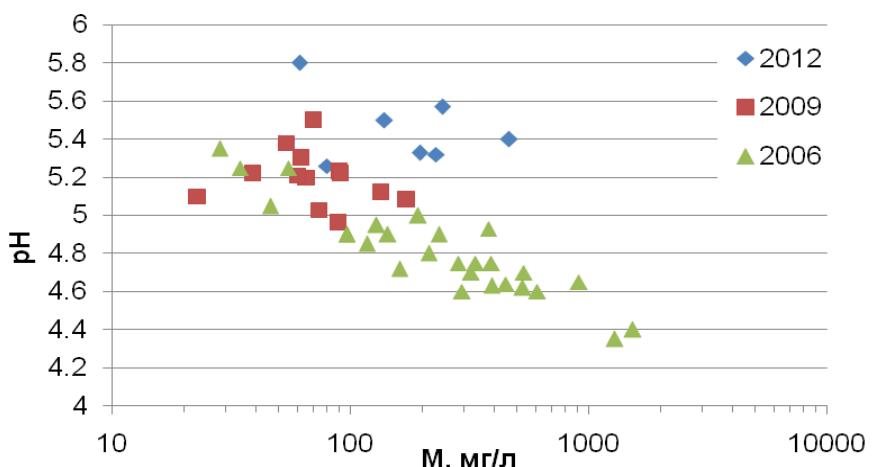


Рис. 5.2. Соотношение pH и минерализации (M) вытяжек из пеплов извержений вулкана Безымянnyй.

Были подсчитаны коэффициенты корреляции (в программе Excel) между концентрацией основных анионов и катионов в вытяжках из пеплов за каждый исследуемый год (табл. 5.4). Отмечены достаточно высокие значения для всех исследованных пар, особенно для пары сульфат-ион-кальций и для показателей 2012 г. Данные результаты, вероятно, подтверждают происхождение катионов в вытяжках за

счет реакции кислот, образующихся при конденсации кислых газов, с поверхностью частиц.

Таблица 5.4. Коэффициенты корреляции (r^2) между концентрацией (моль/100 г пепла) анализируемых анионов и катионов в вытяжках из пеплов

	SO_4^{2-}			Cl^-			F ⁻	
	2006	2009	2012	2006	2009	2012	2006	2009
Ca^{2+}	0.93	0.94	0.97	0.70	0.78	0.86	0.81	0.71
Na^+	0.56	0.76	0.98	0.60	0.45	0.78	0.46	0.86
Mg^{2+}	0.60	0.90	0.96	0.82	0.73	0.75	0.50	0.75
K^+	0.57	0.53	0.86	0.62	0.45	0.48	0.49	0.55

Количество водорастворимых веществ пеплов исследуемых извержений сопоставлено с результатами анализов пеплов извержений 1955 г., 30 марта 1956 г. [Башарина, 1958] и 26 марта 1961 г. [Мархинин и др., 1963] (табл. 5.5). Для извержения 26 марта 1961 г. приведены данные для времени 14:00 и 18:00, в 18:00 отмечалось увеличение интенсивности пеплопада и высоты пепловых выбросов. Площадь поверхности 1 г пепла ($\text{m}^2/\text{г}$) всех сравниваемых извержений вычислена по единой методике с использованием программы “A_22” к дифракционному анализатору размера частиц “analysette-22 COMPACT”. Результаты анализов водных вытяжек из пеплов, пересчитаны на 1 m^2 поверхности каждого образца.

Таблица 5.5. Водорастворимые компоненты пеплов вулкана Безымянный, в $\text{мг}/\text{м}^2$ УПП

Компоненты	Дата и время пеплопада						
	17.11. 1955	30.03. 1956	26.03.1961 14:00	26.03.1961 18:00	24.12. 2006	17.12. 2009	8.03. 2012
L, км	42	42	42	42	42	39	15
УПП, $\text{м}^2/\text{кг}$	270	190	220	160	250	200	230
F ⁻	0.15	0.32	н/о	н/о	0.44	0.21	н/о
Cl^-	6.99	3.99	4.19	6.80	2.30	1.75	1.86
SO_4^{2-}	10.61	15.01	1.09	1.32	7.68	2.94	6.53
Na^+	0.62	1.84	0.92	0.51	1.04	0.527	0.77
K^+	0.25	0.68	0.19	0.37	0.21	0.112	0.33
Ca^{2+}	6.31	5.35	1.51	2.06	2.76	1.73	2.31
Mg^{2+}	0.95	1.26	0.63	0.89	0.28	0.13	0.21
Сумма	25.88	28.45	8.53	11.95	14.82	7.4	12
S/Cl	0.5	1.24	0.09	0.06	1.1	0.55	1.19
Cl/F	47	12			5.2	8.3	

Примечание. Н/о – не определялись.

Содержание ионов фтора и хлора, а также отношения S/Cl в вытяжках из пеплов извержения 2006 г. наиболее близко составу вытяжек из пеплов, выпавших во время взрыва 30 марта 1956 г., а содержание сульфат-иона – вытяжкам из пеплов начала активизации вулкана в 1955 г. (табл. 5.5, рис. 5.3). Анионный состав водных вытяжек из

пеплов отражает качественный состав и количественные соотношения эруптивных газов. Вероятно, газы, адсорбированные пеплами в 1955 г., содержали хлора значительно больше, чем последующие. Отношение серы к хлору стало максимальным во время и непосредственно после пароксизмального извержения, а в последующие годы (первое десятилетие постпароксизмальной активности) стало снижаться за счет роста содержания галогенных и уменьшения серосодержащих газов [Малышев, 2000]. При извержениях в декабре 2006, 2009 и марте 2012 гг. отмечается обратная тенденция – отношение S/Cl возросло.

Различия в концентрации сульфат-иона в вытяжках из пеплов 1956, 1961 (14:00 и 18:00 26 марта), 2006 и 2009 гг. (табл. 5.5, рис. 5.3) можно объяснить отмеченной прямой связью между силой извержения и содержанием SO_4^{2-} [Гущенко, 1965]. Так, извержение 30 марта 1956 г. было наиболее мощным, а 1961 г. [Мархинин и др., 1963] – самым слабым из рассматриваемых; извержение в декабре 2009 г. по объему изверженного материала и высоте эруптивной колонны было слабее извержения в декабре 2006 г. Данные для извержения 2012 г. не подтверждают эту гипотезу; возможное объяснение высокого содержания сульфат-иона и отношения S/Cl – присутствие в пеплах вторичных минералов (гипс), вынесенных при разрушении измененных пород фумарольных площадок и жерла вулкана [Bagnato et al., 2011].

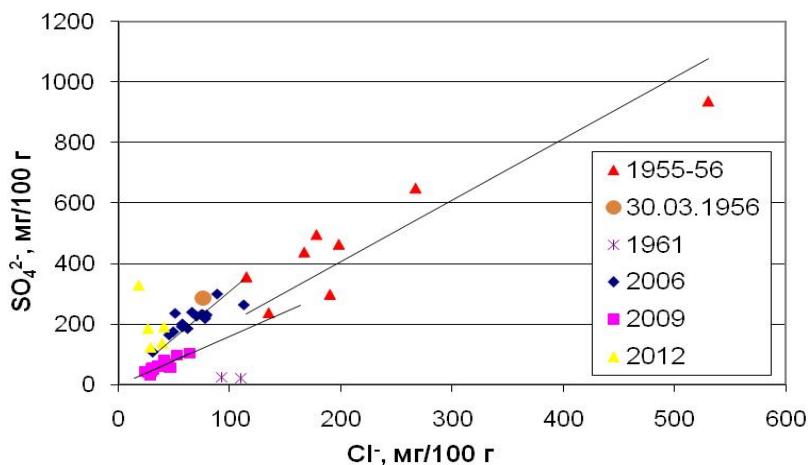


Рис. 5.3. Содержание сульфат- и хлорид-иона в водных вытяжках из пеплов Безымянного вулкана.

Количество катионов, которые в основном являются выщелоченными из породы, в вытяжках 2006–12 гг. сходно с результатами для 1961 г., за исключением ионов магния, содержание которых в 2006–12 гг. в 3–4 раза меньше что, вероятно, связано с изменением методов химического анализа.

5.2. Водорастворимые компоненты пирокластики и постэруптивные газы извержения 2010–13 гг. вулкана Кизимен

Вытяжки из пеплов

Вытяжки из пеплов, выпавших в период с конца декабря 2010 г. по начало марта 2011 г., отобранных на расстоянии 7–137 км от вулкана, имеют сравнительно большую минерализацию – 0.5–2 г на 100 г пепла, в среднем из 30 проб – 1 г на 100 г пепла. Большая часть вытяжек из пеплов начальных эксплозий (10–14 декабря 2010 г.) имеют низкую минерализацию, что возможно связано с оттепелью в этот период, т.е. пепловые горизонты были частично промыты метеорной или талой водой; другая причина – относительно крупнозернистый состав пеплов этой стадии (см. раздел 4.2). Также отличаются малой минерализацией вытяжки из последних отобранных проб пеплов, выпавших в декабре 2011 г. (табл. 5.6).

Таблица 5.6. Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Кизимен извержения 2010–2011 гг., в мг на 100 г пепла

Компоненты	10.12.10 – 14.12.10	28.12.10 – 15.01.11*	09.02.10 – 09.03.11 **	Декабрь 2011***	Всего вынесено, тыс. т
F ⁻	н/о	4.5	4.6	н/о	0.43
Cl ⁻	20	59	242	48	6.0
SO ₄ ²⁻	186	711	312	92	61
Na ⁺	10	26	25	20	2.6
K ⁺	9	10	8.7	6	1
Ca ²⁺	41	261	158	31	23
Mg ²⁺	9	12	9.3	4.6	1.2
H ₄ SiO ₄ р.	20	9.7	42	8	0.9
Сумма	297	1100	801	210	100
S/Cl	3.5	4.4	0.53	0.65	

Примечание. S/Cl дано как среднее (ср.) отношение, * – ср. из 25 вытяжек из пеплов, отобранных на расстоянии 10–90 км; в пеплах дальнего разноса (~250 км) сумма водорастворимых веществ значительно больше (3–4 г на 100 г пепла); ** – ср. из 4 вытяжек из пеплов, отобранных на расстоянии 14 км; *** – ср. из 2-х вытяжек из пеплов, отобранных на расстоянии 10–13 км от вулкана Кизимен.

Среди анионов активной эксплозивной стадии (конец декабря 2010 г. – январь 2011 г.) преобладает сульфат-ион (около 700 мг на 100 г пепла), затем хлорид- (60) и фторид-ионы (~ 4.5); среди катионов – кальций (260), затем натрий (26), магний (12) и калий (10). Так же присутствуют ионы железа (до 10 мг/100 г) и кремнекислота (до 20 мг/100 г).

Всего с декабря по март 2011 г. вместе с пеплами в окружающую среду было вынесено около 100 тыс. т водорастворимых веществ, в т.ч.: SO_4^{2-} – 61, Cl^- – 6, F^- – 0.44, Ca^{2+} – 23, Na^+ – 2.6, Mg^{2+} – 1.2, K^+ – 1, Fe^{2+} – 0.4, H_4SiO_4 р. – 0.9 тыс. т (табл. 5.6).

В специально подготовленных пробах вытяжек из пеплов в АЦ ИВиС были определены микроэлементы: Al (0.5–3 мг на 100 г пепла), Mn (0.08–0.4), Cu (0.3–0.6), Co (0.01–0.04), Ni (0.004–0.023), т.е. всего за извержение: Al ~ 175 т, Mn ~ 24 т, Cu~ 45 т, Co ~ 2.5 т, Ni ~ 1.4 т.

Рассмотренная ранее зависимость содержания водорастворимых компонентов в пеплах от их удельной поверхности наблюдается для отдельных выбросов и для пеплопадов небольшого периода активности 7–15.01.11 (рис. 5.4), но не в целом для пеплов извержения. Это, вероятно, говорит о разном содержании газов в извергаемом материале в разные периоды эксплозивной активности.

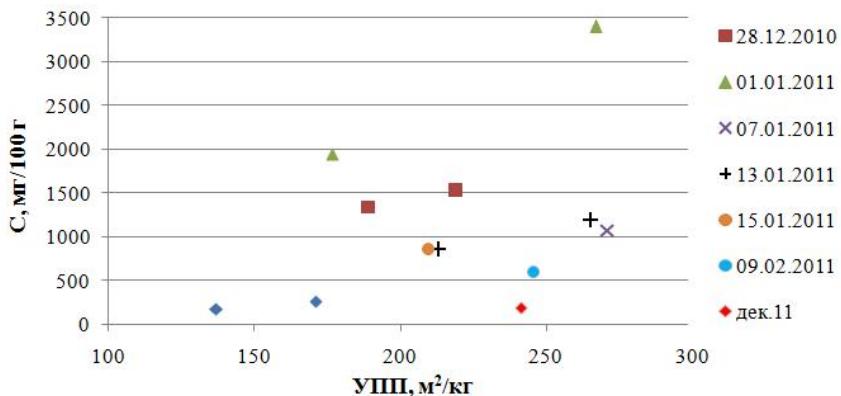


Рис. 5.4. Зависимость содержания водорастворимых компонентов пеплов (С) отдельных эксплозий от удельной поверхности пеплов (УПП) вулкана Кизимен 2010–11 гг.

Для равноценного сравнения, результаты анализов водных вытяжек из пеплов, выпавших в разное время извержения, пересчитаны на 1 m^2 поверхности каждого образца (табл. 5.7). С начала извержения к 1 января 2011 г. концентрация сорбированных компонентов возросла почти в 10 раз, в первую очередь, за счет сульфат-иона; отношение S/Cl в этот период (28.12.10–1.01.11) так же было максимальным 5.7–7.6 (табл. 5.7, рис. 5.5). В январе концентрация водорастворимых компонентов, в особенности сульфат-иона, отношения S/Cl постепенно снижаются, возрастая во время сильных эксплозий (13.01.11). В вытяжках из пеплов, отобранных в феврале-марте 2011 г., происходит увеличение содержания хлорид-иона, уменьшение сульфат-иона и, соответственно, уменьшение отношения S/Cl до 0.6 и затем до 0.3. В вытяжках из пеплов, отобранных в декабре 2011 г., данное отношение сохраняется (0.6–0.7), но общая минерализация падает. Содержание фтора в течение извержения

постепенно возрастало. Т.к. анионный состав вытяжек служит показателем качественного состава и соотношений компонентов газовой фазы, данные изменения, вероятно, отражают изменения в газовом составе извергаемых продуктов и являются типичными для извержений с участием ювенильного вещества (газы серы, как менее растворимые в магме, выделяются из неё в первую очередь, затем следуют HCl и HF; газонасыщенность извергаемого материала сначала резко возрастает, а затем постепенно снижается).

Таблица 5.7. Состав водорастворимого комплекса пеплов вулкана Кизимен в 2010–11 гг., в мг/м² УПП

№ пробы	94	87/5	Дол	87/4	96/0	122	пр 3
Дата пеплопада	10–13.12.10	28–29.12.10	01.01.11	07.01.11	13.01.11	09.02.11	дек. 11
L, км	95	23	82	23	52	14	9
УПП, м ² /кг	171	189	177	271	213	245	241
pH	5.1	4.37	4.66	4.44	4.53	3.86	5
F ⁻	н.п.о.	0.10	0.07	0.09	0.12	0.15	н/о
Cl ⁻	0.6	2.8	3.2	3.3	2.2	5.4	1.7
SO ₄ ²⁻	6.9	47.5	73.6	24.9	26.9	10.6	3.5
Na ⁺	0.5	1.5	2.1	0.8	0.9	0.8	0.7
K ⁺	0.5	0.6	0.8	0.3	0.3	0.2	0.2
NH ₄ ⁺	0.061	0.074	0.463	0.043	0.072	0.099	н.п.о.
Ca ²⁺	1.66	16.84	27.84	9.31	9.17	5.28	1.08
Mg ²⁺	0.33	0.74	1.02	0.51	0.37	0.27	0.16
Fe ²⁺	0.08	н.п.о.	0.25	0.40	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Al ³⁺	н/о	н/о	0.13	н/о	н/о	0.73	н/о
H ₄ SiO ₄	0.91	0.44	0.61	0.13	0.29	0.71	0.46
Сумма	11.5	70.6	109.9	39.8	40.2	24.3	7.8
S/Cl	4.0	5.7	7.6	2.5	4.0	0.66	0.68
Cl/F		27	45	36	18	37	

Примечание. Н.п.о. – ниже порога определения, н/о – компонент не определялся.

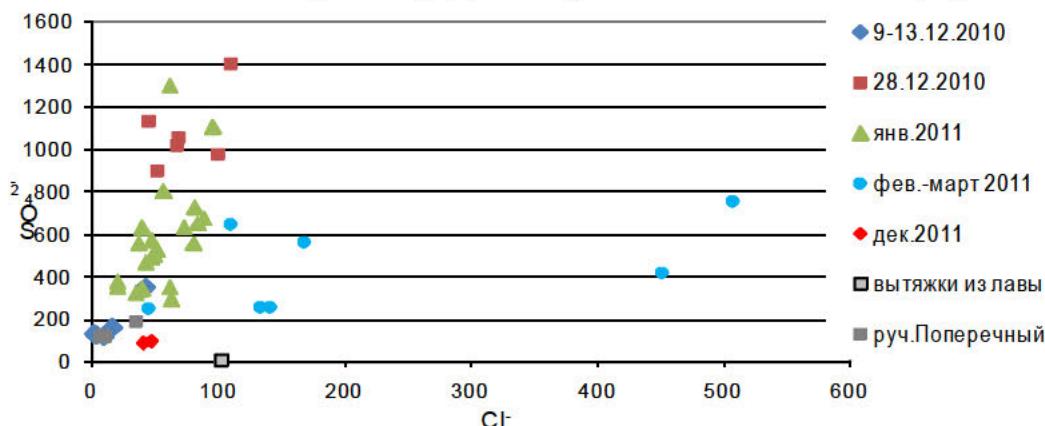


Рис. 5.5. Содержание сульфат- и хлорид-ионов в водных вытяжках из пеплов разных периодов извержения вулкана Кизимен, в мг/100 г. Содержание в водах руч. Поперечный в мг/л.

Вероятное объяснение большого содержания водорастворимых веществ в пеплах вулкана Кизимен – их мелкозернистый состав и высокая газонасыщенность ювенильного извергаемого материала.

В целом, в зимний период извержение вулкана было умеренно слабым, оказав, тем не менее, серьезное воздействие на площади, охваченные отложениями пирокластических потоков и лахара. Выброшенные за декабрь-февраль 10 млн т пепла были рассеяны на большой территории, поэтому только вблизи вулкана (в радиусе 7–8 км от него), где масса пепла превышает 2–3 кг на м^2 , вымываемые из пеплов водорастворимые вещества могли оказать значимое влияние на растительность. По наблюдениям сотрудников Кроноцкого заповедника во время извержения, окрестности вулкана покинули крупные млекопитающие (олени, лоси).

Состав поверхностных вод

Минерализация вод ручья Поперечного, по долине которого в начале извержения сошел лахар, а с мая по декабрь 2011 г. – пирокластические потоки, варьирует в пределах 325–695 мг/л в зависимости от места и времени отбора (Приложение 7). Химический анализ воды из ручья Поперечный, отобранный в начале и конце декабря 2011 г. в районе пересечения ручья с тропой на Тумрокские источники, показал увеличение содержания в ней хлорид-иона в 1.5 раза, сульфат-иона в 2.5 раза, вероятно, после активизации вулкана 14 декабря. Соотношение сульфат- и хлорид-иона в воде руч. Поперечный примерно соответствует таковому в вытяжках из пеплов (рис. 5.5). В целом, содержание сульфат-иона в воде ручья в период извержения превышал показатели для рек Камчатки (по данным автора), что указывает на его вынос из газонасыщенных пирокластических отложений, хотя имеет место и привнос компонентов с термальными водами, выходы которых обнаружены в долине ручья. В химическом составе озер (Подпрудных 1 и 2, и Теплякова) и других поверхностных вод в верховьях руч. Поперечного на восточном склоне вулкана также заметны повышенные содержания вулканогенных макрокомпонентов (Cl^- , SO_4^{2-} и др.), уменьшающиеся к концу извержения (Приложение 8) [Малик, 2016].

Также были приготовлены и проанализированы три водные вытяжки из образцов лавы, отобранных 23 марта на фронте и 30 апреля 2012 г. в центральной части русла лавового потока. В их составе среди анионов значительно преобладает хлор, в меньшем количестве присутствует сульфат-ион (рис. 5.5); среди катионов (в порядке убывания) –

кальций, магний, железо, натрий. Водорастворимый комплекс лав, вероятно, формирующийся за счет отложения солей на стенках пор, дает представление об источниках вещества фумарольных минералов, образующихся на лавовых потоках при газовом метасоматозе лав [Серафимова и др., 1983].

Постэруптивные фумарольные газы

12 октября 2014 г. были проведены работы на привершинном фумарольном поле, образовавшемся во время извержения, предположительно, в конце 2011 г. на западном склоне вулкана (на высотах начиная с 2250 м н.у.м. до вершины). Был отобран газ и его конденсат из фумаролы на высоте 2280 м н.у.м. с напорным выходом газа и температурой 270°C [Малик, 2015]. Содержания ($H_2O=94.2$, $CO_2=3.4$, $H_2S=1.14$, $SO_2=0.87$, $HCl=0.33$ мол.%) и отношения конденсируемых газов типичны для вулканических газов зон субдукции. Содержание HF как в газе (0.002 мол.%), так и в конденсате (4 мг/л) отличается очень низкими значениями – более чем в 40 раз меньше среднего для газов вулканов зон субдукции. Низкое содержание HF характерно и для водорастворимого комплекса пеплов.

Содержание микрокомпонентов в конденсате газа (33 ppm) оказалось сравнительно небольшим, что можно объяснить низкой температурой выхода, а также большим содержанием коллоидной серы, затрудняющей анализ.

Сравнение отношений S/Cl и Cl/F в вытяжках из пеплов разных периодов извержения и фумарольных газах постэруптивного периода показало сходство отношения S/Cl в газах и вытяжках из пеплов активной эксплозивной стадии (табл. 5.8).

Таблица 5.8. Отношения S/Cl и Cl/F в вытяжках из пеплов и фумарольных газах постэруптивного периода

Мас. отношения	Газ (270°C)	снег	Вытяжки	
	октябрь 2014 г.		декабрь 2010 – январь 2011	февраль-март, дек. 2011
S/Cl	3.1–5.5 / 3.9		2.5–7.6 / 4.4	0.6
Cl/F	300–460 / 380	490	5–60 / 12	30–81

Примечание. Показаны пределы значений и среднее.

5.3. Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Шивелуч (2006–07, 2010, 2014–16 гг.)

Эруптивная активность в декабре 2006–2007 гг.

Из проанализированных 33 вытяжек из пеплов вулкана Шивелуч рассматривались только 12, т.к. содержание пепла в снеговой воде остальных было менее 8–10 г/л, а

учесть фоновые концентрации элементов в снегу сложно (см. раздел 2.1) и при пересчете содержаний растворимых веществ на 100 г пепла можно получить завышенные концентрации. Эти наиболее достоверные результаты химического анализа вытяжек из пеплов вулкана Шивелуч, выпавших за период с декабря 2006 г. по март 2007 г. на разном расстоянии от вулкана, разделены на 3 группы: пеплы начальных выбросов, отобранные к северу от вулкана; преимущественно взрывные пеплы и преимущественно пеплы облаков ПП, также подсчитаны средние значения для разных групп пеплов (табл. 5.9).

Вытяжки из пеплов вулкана Шивелуч имеют широкий разброс значений по содержанию сульфат-, хлорид- и фторид-ионов и других компонентов (табл. 5.9). Для пеплов начала активизации (декабрь 2006 г.) характерно низкое содержание водорастворимых компонентов. Для крупнозернистых пеплов взрывов Шивелуча (тип I) характерно высокое содержание SO_4^{2-} , среднее – Cl^- и F^- и, соответственно высокое отношение S/Cl . Для пылеватых пеплов облаков ПП и лавин (тип II), характерно высокие содержания SO_4^{2-} и особенно Cl^- и F^- при низком значении отношения S/Cl и Cl/F . Эти различия можно объяснить тем, что пеплы начала активизации образовались в результате дробления дегазированного материала; пеплы взрывов представлены более свежим материалом, чем пеплы лавин, последние содержат больше хлора и фтора, которые более растворимы в магме по сравнению с серой и поэтому выделяются на более поздних этапах дегазации.

Вместе с 2.5 млн т пепла, вынесенных за декабрь 2006 г. – март 2007 г. в окружающую среду поступило (тыс. т): SO_4^{2-} 6.4, Cl^- 1.3, F^- 0.11, Ca^{2+} 2.3, Na^{2+} 0.69, K^+ 0.13, Mg^{2+} 0.34, всего 11 тыс. т водорастворимых веществ, а также около 1400 т растворенной и коллоидной H_4SiO_4 . Предполагая примерно одинаковую активность в течение всего года [Сенюков и др., 2008], за 2007 г. было вынесено до 40 тыс. т сорбированных компонентов, в т.ч. SO_4^{2-} 22, Cl^- 4.3, F^- 0.36 тыс. т (табл. 5.21).

Активизация деятельности вулкана в октябре 2010 г.

Результаты вытяжек из пеплов четырех проб, выпавших в результате активизации 27–29 октября 2010 г., показывают, во-первых, зависимость концентрации сульфат-иона от расстояния отбора от вулкана, во-вторых, зависимость концентрации хлорид-иона от содержания пылеватой фракции. Для проб (№ 39, 47), отобранных к северу (СВ) от оси пеплопада (см.схему на рис. 3.14, раздел 3.3), содержащих меньшую долю пылеватой

фракции и относительно меньшее количество водорастворимого хлора, характерно высокое отношение $S/Cl=3-3.9$ (табл. 5.10); а для проб (№ 42, 45), отобранный к ЮЗ от оси, содержащих наибольшую долю пылеватой фракции, характерны относительно высокое содержание хлора и низкое отношение $S/Cl=1-1.6$. Данные различия можно объяснить разным содержанием в пробах взрывных пеплов и пеплов облаков ПП (в данном случае, также пеплов, поднимавшихся над обвальными отложениями). Благодарю различному пространственному и высотному положению этих двух источников пеплов и различному направлению ветра на разных высотах, в пробах пеплов, выпавших к северу от оси пеплопада большее содержание взрывных пеплов, а к югу – пылеватых пеплов облаков ПП (обвала).

Таблица 5.10. Водорастворимые компоненты пеплов активизации вулкана Шивелуч в октябре 2010 г., мг/100 г пепла

№	39–10	42–10	45–10	47–10	Среднее	Всего за извержение, т
pH	5.6	5.3	4.8	4.8	5.1	
L, км	40	52	73	87		
Cl ⁻	11.4	31.9	61.3	19.8	31.1	4664
SO ₄ ²⁻	103	158	207	232	175	26257
F ⁻	0.21	0.64	1.40	1.25	0.88	131
Na ⁺	11.0	18.7	30.0	24.4	21.0	3152
K ⁺	1.54	2.49	4.25	3.51	2.95	442
Ca ²⁺	36.2	51.0	75.0	60.8	55.8	8363
Mg ²⁺	4.16	10.89	21.18	18.01	13.56	2034
Сумма	172	280	409	413	301	45045
S/Cl	3.0	1.6	1.1	3.9	2.4	
Cl/F	54	50	44	16	41	
<56 мкм*	74		88	78		
<63 мкм*	83		91	84		

Примечание. * – содержание фракции в вес. %

Всего вместе с пеплами, минимальное количество которых было оценено в 15 млн т (см. раздел 3.3), в окружающую среду было вынесено более 45 тыс. т легкорастворимых соединений (табл. 5.10).

Вытяжки из пеплов вулкана Шивелуч взрывных событий 2014–16 гг.

Состав водорастворимых компонентов пеплов (как количественно, так и по их соотношениям), выпавших в результате эруптивной активности вулкана Шивелуч в 2014–16 гг. существенно различается как для отдельных событий, так и для проб пеплов, относящихся к одному эруптивному событию (табл. 5.11). Это, вероятно можно

Таблица 5.9. Водорастворимые компоненты пеплов вулкана Шивелуч, изверженных в 2006-07 гг., мг/100 г пепла

Тип	Начало извержения			1 тип			2 тип						среднее			
	№	11/3	14/3	16/2	4/3	П-1-07	54/4	15/2	1-06	52/1	54/2	33/2	09/1	начало	1 тип	2 тип
L, км	20	19	19	25	17	24	21	49	16	24	17	22				
pH	5.8	5.6	5.6	5.91	5.2	5.05	5.1	5.45	5.3	4.9	5.15	5.01	5.7	5.4	5.2	
Cl ⁻	13.7	13.4	14.6	14.5	52.7	11.0	49.6	78.3	40.3	124.7	48.9	36.6	13.9	26.1	63.1	
SO ₄ ²⁻	56	51	76	126	349	142	221	475	231	338	256	151	61	206	279	
F ⁻	0.58	0.42	1.06	0.31	5.00	0.73	2.63	3.68	5.19	8.31	7.61	4.82	0.69	2.01	5.37	
Na ⁺	8.5	7.9	7.8	11.1	30.6	17.8	19.7	51.7	25.2	42.5	29.9	18.3	8.1	19.8	31.2	
K ⁺	3.23	1.69	1.58	2.66	10.01	3.47	6.43	1.89	4.64	8.88	4.42	5.15	2.17	5.38	5.23	
Ca ²⁺	24.6	20.8	34.2	55.1	103	41.0	121	134	77.7	140	87.9	70.5	26.6	66.5	105	
Mg ²⁺	2.2	1.0	2.6	7.9	23.3	8.9	7.8	26.1	11.5	17.0	11.4	9.2	1.9	13.4	13.8	
Сумма	109	97	138	218	574	225	436	778	396	681	446	296	115	339	506	
S/Cl	1.37	1.27	1.75	2.89	2.21	4.29	1.49	2.02	1.91	0.90	1.75	1.38	1.46	3.13	1.57	
Cl/F	24	32	14	47	11	15	19	21	8	15	6	8	23	24	13	

Таблица 5.11. Водорастворимые компоненты пеплов вулкана Шивелуч, изверженных в 2014-16 гг., мг/100 г пепла

Дата	янв..2014				16.11.2014					фев.15	дек.15	янв.16			дек.16	ср.	
	№	7	8	9	10	3М	4М	203	208	209		макс. из 4		235	236	м/1	
pH	6.1	5.4	5.9	5.8	4.8	6	5.7	5.6	5.9	5.3	5.40	4.70	4.5	5.3	5.3	5.4	
Cl ⁻	25.5	27.1	30.2	68	12.3	6.4	8.6	14.8	14.1	8.4	21.3	67.5	45.5	108	15.9	31.6	
SO ₄ ²⁻	338	338	216	145	47.0	79.5	83.6	103	125	131	110	353	311	317	14.1	181	
Na ⁺	16.2	16.6	17.4	23.6	10.4	9.2	8.7	12.3	17.4	11.9	15.8	37.8	31.1	46.3	4.9	18.6	
K ⁺	5.6	6.3	5.4	6.5	5.9	2.4	2.5	3.3	3.3	4.1	4.9	8.8	3.8	9.6	1.7	4.9	
Ca ²⁺	123	116	113	74.2	21.7	26.4	29.6	32.9	31.6	60.2	35.0	105	94.7	140	8.3	67	
Mg ²⁺	9.3	7.8	6.4	7.1	5.45	3.92	3.41	5.14	5.54	5.1	0.5	21.3	21.3	19.4	0.9	8.2	
H ₄ SiO ₂ р.						0.51	2.24	1.44				3.36				1.92	
Минер.	517	512	389	324	113	138	143	177	201	221	188	594	510	658	50	316	
S/Cl	4.37	4.11	2.36	0.70	1.3	4.1	3.3	2.3	2.9	5.23	1.72	1.74	2.28	0.98	0.29	2.5	

объяснить рассмотренным выше причинами: различиями в гранулометрическом составе пеплов, газовой фазе шлейфа, происхождением пеплов.

Средние содержания водорастворимых компонентов пеплов, выпавших в период 2014–16 гг. (табл. 5.11) и в результате пароксизмальной активизации в октябре 2010 г. (табл. 5.10), очень близки между собой. Кроме того, они также схожи со средними содержаниями для пеплов, отобранных в 2006–07 гг. (табл. 5.9). Используя эти данные и среднегодовое количество пепла, выбрасываемое вулканом Шивелуч (см. раздел 3.3), получаем количество водорастворимых компонентов, вымываемых из пеплов в год: 15 тыс. т SO_4^{2-} , 2.5 тыс. т Cl^- , 83–350 т F^- , 5.3 тыс. т Ca^{2+} , 650 т Mg^{2+} , 1.5 тыс. т Na^+ , 400 т K^+ (табл. 5.21).

5.4. Вытяжки из пеплов вулкана Карымский в 2007–2016 гг.

Минерализация вытяжек из пеплов, отобранных на расстояниях 1.5–10 км от вулкана изменяется в пределах 34–880 мг на 100 г (табл. 5.12) и зависит, по-видимому, от гранулометрического состава пепла, а также от характера активности, что взаимосвязано между собой. Среди анионов, которые отражают состав вулканических газов преобладает сульфат-ион, далее – хлорид – и в меньшей степени – фторид-ионы. Соотношение сульфат- и хлорид-ионов в пересчете на S/Cl изменяется от 0.6 до 5.4, но большинство вытяжек имеют значения близкие к среднему – 1.2 (табл. 5.12).

Таблица 5.12. Состав водорастворимого комплекса пеплов вулкана Карымский, мг/100 г пепла

Комп-т	2007		21.04	2008		2010*		2011		2013	2015	2016	Ср.
F^-	3.2	1.1	1.0	0.7	0.9	2.8	0.6	7.0	5.3	Н.п.о.	7.4	Н.о.	3.8
Cl^-	13.0	10.5	40.0	12.0	6.9	25.7	20.7	20.5	24.4	33.7	107	133	32
SO_4^{2-}	33.1	27.2	267.4	21.8	111.0	70.2	120.5	50.3	72.9	93.7	380	449	105
Na^+	11.1	3.8	51.8	3.2	14.0	18.3	14.3	14.6	13.3	11.4	22.9	99	18.1
K^+	-	0.2	0.3	1.6	4.5	2.1	2.4	1.5	1.4	3.35	5.1	20	2.74
Ca^{2+}	10.0	8.2	65.3	7.5	35.5	36.2	44.2	17.0	20.7	41.3	180.5	156	40.2
Mg^{2+}	0.9	1.1	12.7	0.6	2.8	2.4	3.9	1.7	1.8	1.97	5.6	27	3.7
H_4SiO_4						1.6	2.5	3.2	2.4	9	-	6	3.7
Минер.		52.0	438.3	47.4	175.6	159	209	116	142	194	709	890	209
S/Cl	0.9	0.9	2.2	0.6	5.4	0.9	2.0	0.8	1.0	0.93	1.2	1.1	1.2
Cl/F	2.8	9.8	42	17	7.4	9.3	35	2.9	4.6	-	14.5	-	11

Примечание. Представлены по 2–3 наиболее показательных результата в год анализа вытяжек из пеплов. Жирным шрифтом показаны вытяжки из свежевыпавшего пепла. Ср. – среднее из 26 анализов. *Данные для 2010 г из [Маневич и др., 2012], остальные – данные автора.

В работах [Иванов, 1970; Самойленко, Карпов, 2007] приведена минерализация вытяжек, которая составляла всего 50–62 мг/100 г пепла, даже для проб, отобранных в

100 км (1963 г.). По данным автора, за исключением проб 21.04.07, 2015 и 2016 гг., минерализация вытяжек (47–207 мг/100 г пепла) действительно меньше чем на других андезитовых вулканах, что, вероятно, связано с преобладанием более крупной фракции в пеплах. Повышенные содержание легкорастворимых веществ и отношение S/Cl в пепле выброса 21.04.2007 г. при достаточно грубозернистом гранулометрическом составе (см. раздел 4.1.4), обусловлены, вероятно, выносом вторичных минералов (гипс), при разрушении измененных газовой деятельностью пород после ~ недельного периода покоя.

Из сухого пепла, отобранного в августе 2013 г., была приготовлена водная вытяжка, в которой кроме макрокомпонентов были определены микроэлементы методами ICP-MS и атомной абсорбции (см. раздел 5.8).

Ежегодно на территории, прилегающей к вулкану, в окружающую среду вместе с ~1.8 млн т пепла выносится около 3.7 тыс. т. водорастворимых веществ, в т.ч.: SO_4^{2-} – 1900, Cl^- – 580, F^- – 70, Ca^{2+} – 720, Na^+ – 330, Mg^{2+} – 66, K^+ – 49, H_4SiO_4 – 70 т.

5.5. Водорастворимые компоненты пеплов вулкана Жупановский

Из обработанных автором проб пепла со снегом только две были явно не промыты талыми водами: отобранная сразу после начала активизации 26 октября 2013 г. недалеко от места выброса и отобранная возле Налычевских источников в январе 2015 г. (табл. 5.13).

Таблица 5.13. Состав водорастворимого комплекса пеплов вулкана Жупановский, мг/100 г пепла

№	Дата	L, км	pH	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Fe}_{\text{об.}}$	Al^{3+}	Σ	S/Cl	F/Cl
1-13	окт. 13	0.4	3.7	2.90	400	938	74.2	44.0	322	27.1	0.66	33.0	1841	0.77	0.007
нал-15	янв. 15	25	4.2	1.14	114	1232	84.0	42.6	290	23.0	0.60	74.7	1868	3.61	0.01

5.6. Трещинное Толбачинское извержение: сорбированные компоненты тефры и эруптивные газы

На основании 20 результатов анализа водных вытяжек из пеплов и шлаков начальной стадии извержения (табл. 5.14) было подсчитано, что в окружающую среду вместе с 10^7 т пепла было вынесено приблизительно 70 тыс. т растворимых веществ, включая: SO_4^{2-} – 8.3, Cl^- – 23.3, F^- – 4.4, Na^+ – 4.4, K^+ – 1.8, Ca^{2+} – 10.6, Mg^{2+} – 2.5, $\text{Fe}_{\text{об.}}$ – 2.5, Al^{3+} – 2.6, H_4SiO_4 – 10×10^3 т, Cu – 70, Sr – 28, Mn – 25, Zn – 17, As – 9 т. Если учитывать пирокластический материал на удалении до 1.5 км, объем которого по

данным [Двигало и др., 2014] составил до 0.1 км^3 , при плотности шлака (по данным измерений) 0.65 г/см^3 , и состав водорастворимого комплекса для шлака (табл. 5.15, проба 362/1), то к этим цифрам прибавится почти столько же – 57 тыс. т: SO_4^{2-} – 8.4, Cl^- – 17.2, F^- – 11.6, Na^+ – 7, K^+ – 2.6, Ca^{2+} – 8.1, Mg^{2+} – 1.7×10^3 т, т.е. всего около 130 тыс. т, а без учета кремниевой кислоты – 120 тыс. т (табл. 5.15).

Таблица 5.14. Состав водорастворимого комплекса тефры ТТИ-50, мг/100 г пепла

№	105	357/2	116	Толуд	362/1 шлак	Кам 13	Т-Наб	Т-1	Т-лаг	Т-377	Ср.	СП	ЮП
Дата	27- 28.11. 2012	28.11. 2012	02.12. 2012	28- 29.11.12	14.12. 2012	12. 2012	13.01. 2013	25.01. 2013	04.04. 2013	05.05. 2013	2012- 13	1975	1975–76
L, км	60	52	27	7	0.9	4.5	0.3	2	0.9	0.2		1–12	0.5–2.7
pH	3.8	3.9	5	6.5	6.5	4.3	6	4.7	3.2	2.5		6.4	6.2
F ⁻	–	–	–	30.3	17.9	36.7	34.6	14.5	128	172	50	2.6	10.5
Cl ⁻	353	199	85.8	50.8	26.4	191	69.6	64.7	719	1573	238	30.4	44.8
SO ₄ ²⁻	87.4	80.9	47.3	28.3	12.7	140	237	84	175	433	83.5	27.7 16.5– 55.8	73.1 13.2– 68.4
Na ⁺	28.9	23.6	25.8	29.8	6.7	56.6	51.9	24.2	120	74.9	39	15.1	9.2
K ⁺	17.6	10.8	8.8	7.3	2.8	15.7	8.8	4.8	93.7	44.4	17	2.9	2.9
Ca ²⁺	117	88.1	22	26.6	12.5	102	114	36.5	104	45.5	78.5	10	17
Mg ²⁺	41.9	12.8	6.6	5.2	2.7	16.6	2.4	1	24.9	27.6	15.8	2.9	3
Fe ³⁺	4.2	2.8	2.2			6.1	0.5	0.4	35	38	9		
Fe ²⁺	17.3	5.6	9.3			3.6	2	0.1	10	53.6	10.6		
Al ³⁺							9.9	13.3	56	91.9	26.4		
H ₄ SiO ₄	195	34.4				11.3	7.9	4.8	98.4	490	85.4	2.4	3
Σ	864	459	208	183	81.7	545	497	221	1436	2889	626	66.5	175
S/Cl*	0.08	0.13	0.18	0.18	0.16	0.24	1.12	0.43	0.08	0.09	0.23	0.24– 0.3	0.43
Cl/F*	–	–	–	1.7	1.5	5.2	2.0	4.5	5.6	9.1	3.4	14–18	5.1

Примечание. Данные для СП и ЮП БТТИ – среднее из результатов, приведенных в [Будников, 1996; Меняйлов и др., 1979; Меняйлов и др., 1980]; приведенные в этих работах средние значения близки за исключением SO_4^{2-} , пределы значений которого у разных авторов указаны в скобках. * – средние величины отношений.

Пеплы дальнего разноса было возможно отбирать в начале извержения (ноябрь–декабрь 2012 г.), в то время как первые пробы газа были отобраны 25 февраля 2013 г., когда стромболианская активность продуцировала лишь редкие пеплопады в ближней зоне. На химический состав тефры со снегом, отобранных недалеко от эруптивного центра, вероятно, повлияло более высокая эффективность поглощения снегом HCl из газового шлейфа по сравнению с SO_2 и осаждение аэрозолей. По этой причине отношение S/Cl в вытяжках из пепла и пробах газа, отобранных в феврале – мае 2013 г. сильно различаются (рис. 5.6). Недостаток проб (газа в начале извержения и пеплов в феврале-мае) не позволяют сделать явные выводы о корреляции S/Cl, Cl/F в вытяжках и

эруптивных газах, которая была отмечена во время БТТИ [Меняйлов и др., 1980]. Тем не менее, отношения S/Cl, Cl/F и общий средний состав водных вытяжек из пепла и шлака может быть использован для приближенных оценок.

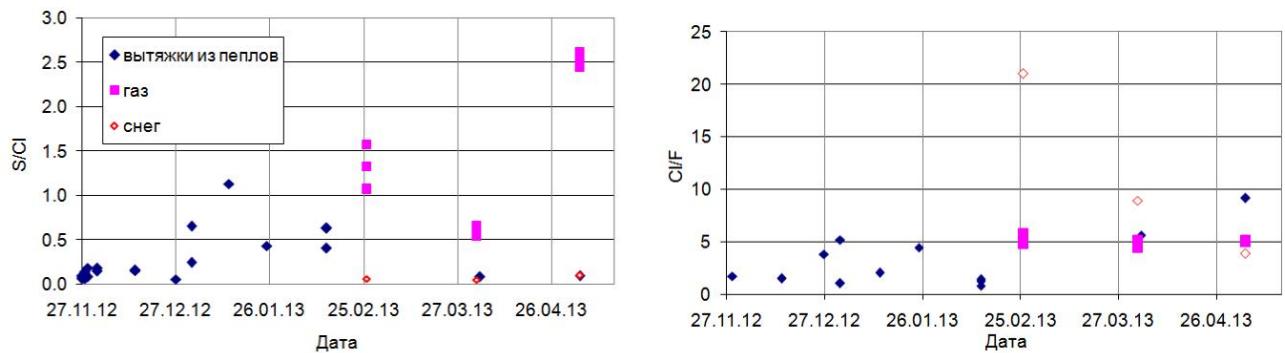


Рис. 5.6. Вариации во времени мас. отношений S/Cl и Cl/F в вытяжках из пеплов, газах и снеге. Данные для газов по [Zelenski et al., 2014].

Согласно спутниковым данным, эмиссия SO_2 в атмосферу 27–28 ноября 2012 г. составила 50000 т [Гордеев и др., 2013а]. Используя состав вытяжек из пеплов (средние отношения S/Cl, S/F), отобранных в течение первых дней извержения, может быть посчитан одновременный вынос HCl и HF в атмосферу, составляющий 190000 и 29000 т, соответственно. Близкие соотношения S/Cl, Cl/F в вытяжках и эруптивных газах отмечались во время извержения БТТИ 1975–76 гг. [Меняйлов и др., 1980]. Однако, если взять эти же средние отношения в газах, отобранных в феврале-апреле 2013 г. [Zelenski et al., 2014], то получим 25000 т HCl и 5000 т HF.

Вместе с $5\text{--}6 \cdot 10^6$ т пепла, отложенного в первые дни в северном и юго-восточном секторе, было вынесено около 2800 т HF, 20800 т HCl и 3300 т SO_2 в виде водорастворимых веществ и, примерно, в два раза больше, если учесть материал шлаковых конусов и другой пирокластики в ближней зоне. Таким образом, около 7–13% выбросов SO_2 было адсорбировано тефрай.

Динамику состава вытяжек из тефры на протяжении извержения трудно проследить, т.к. пеплы отбирались в разное время на разных расстояниях от вулкана: в начале извержения – в дальней зоне, затем – преимущественно в ближней (шлаки). Тем не менее, можно проследить сначала повышение значений отношения S/Cl к январю, а затем понижение (рис. 5.6).

По сравнению с БТТИ 1975–76 гг. пеплы ТТИ-50 содержат больше растворимых компонентов и особенно F^- и Cl^- , и по этим показателям, а также отношению Cl/F более схожи с пеплами извержения ЮП, чем СП БТТИ (рис. 5.7, 5.8, табл. 5.14). Это вполне

закономерно, т.к. петрохимический состав пород ТТИ-50 также ближе к составу пород ЮП, чем СП БТТИ [Волынец и др., 2017]. Более высокие содержания HCl, HF, CO₂ и SO₂ по сравнению с БТТИ были также отмечены в эруптивных газах [Zelenski et al., 2014].

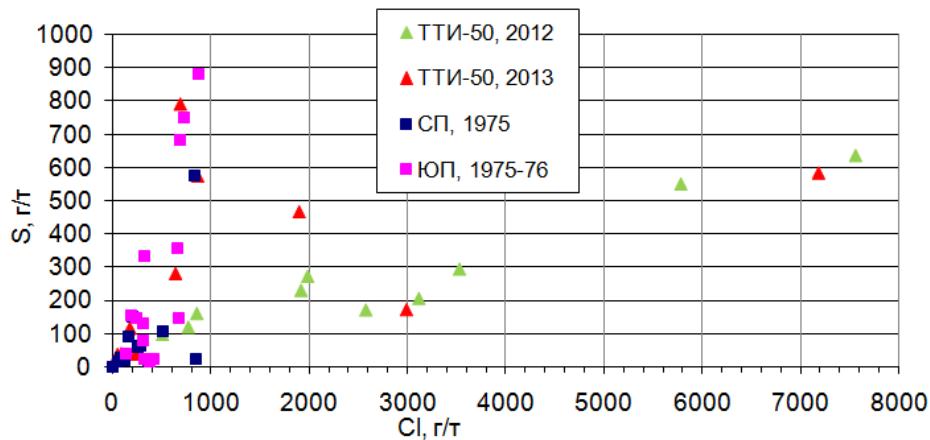


Рис. 5.7. Содержание S и Cl в вытяжках из пеплов ТТИ-50 и БТТИ (СП и ЮП).

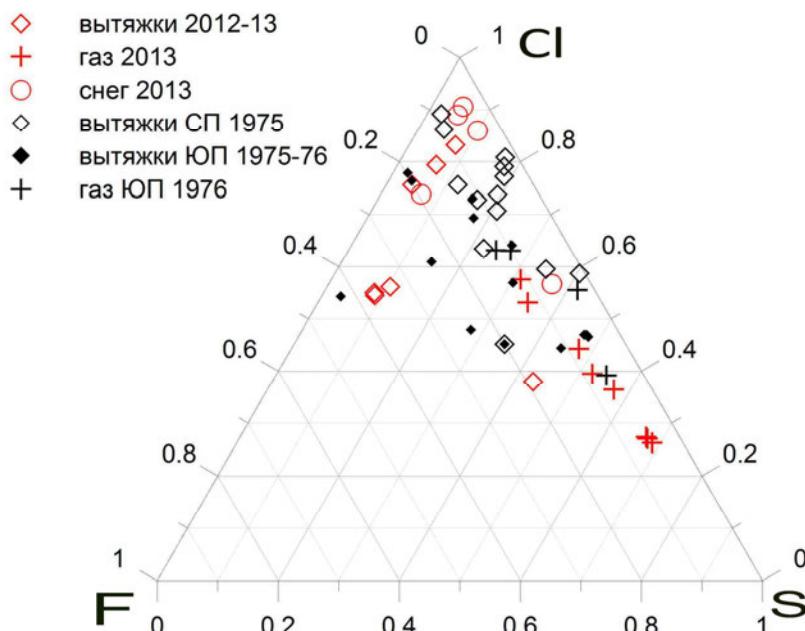


Рис. 5.8. Соотношение (мас.) F, Cl и S в вытяжках из пеплов и газах БТТИ и ТТИ-50 и снеге в районе извержения ТТИ-50.

Несмотря на это, экологический эффект ТТИ-50 2012–13 гг. был незначителен в сравнении с БТТИ 1975–76 гг., благодаря тому, что меньшее количество пирокластических продуктов было извержено (~0.1 км³ против 1 км³) (табл. 5.15) и они были выброшены в течение зимнего сезона 2012–13 гг. и затем постепенно промыты талыми водами в течение последующего весенне-летнего сезона. Для сравнения, 0.95 км³ тефры было извержено во время Северного прорыва БТТИ летом 1975 г., которая уничтожила лес и другую растительность на площади 400 км², а в последующем в результате ветрового переноса даже на 480–500 км² [Быкасов, 1981].

Таблица 5.15. Общее количество водорастворимых веществ, вынесенных из пеплов ТТИ-50 и БТТИ, т

	ТТИ-50			БТТИ		
	Пеплы	Шлаки (< 1.5 км) *	Σ	СП	ЮП	Σ
Масса, т	10^7	$6.5 \cdot 10^7$	$7.5 \cdot 10^7$	$9.6 \cdot 10^8$	$0.3 \cdot 10^8$	$9.9 \cdot 10^8$
F ⁻	5311	11629	16940	29695	4008	33700
Cl ⁻	23267	17186	40453	253608	7668	261276
SO ₄ ²⁻	8347	8229	16576	129717	3624	133341
Na ⁺	4369	6988	11357	81493	2751	84244
K ⁺	1812	2600	4412	11916	861	12777
Ca ²⁺	10570	8138	18708	100040	4110	104150
Mg ²⁺	2462	1729	4191	28350	888	29238
Fe ³⁺ + Fe ²⁺	917+1599		917+1599			
Al ³⁺	2639		2639			
H ₄ SiO ₄ общ	10070		10070	22405	884	23300
Σ	71700	56500	128159	657224	24794	682026

Примечание. * – пирокластика, выпавшая в пределах 1.5 км от извержения, объемом 0.1 км³ [Двигало и др., 2017]; ρ=0.65 т/м³ – по измерениям автора.

5.7. Водорастворимый комплекс пеплов извержений других базальтовых вулканов (Алаид, Ключевской)

Вулкан Ключевской

Из пяти извержений, произошедших за рассматриваемый период, только в ноябре 2013 г. сотрудникам Камчаткой вулканологической станции в пос. Ключи удалось отобрать пробы снега с пеплом не подверженные таянию и с достаточным содержанием пепла в талой воде, чтобы значительно превысить фоновые концентрации элементов. Пробы были отобраны поперек оси пеплопада в районе п. Ключи на расстоянии 25–33 км от вулкана. Результаты гидрохимического анализа, пересчитанные на 100 г пепла, представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.16. Состав водорастворимого комплекса пепла Ключевского вулкана, изверженного 11 ноября 2013 г., мг/100 г пепла

	Кл-142	Кл-143	Кл-144	Кл-147	Кл-148	Кл-151	Кл-152	ср.
pH	6.00	6.03	6.05	6.00	5.80	6.02	6.24	6.02
F ⁻	8.38	7.90	6.60	6.29	7.78	13.69	17.93	9.80
Cl ⁻	41.4	37.0	38.1	37.9	38.2	32.6	35.2	37.2
SO ₄ ²⁻	132	118	127	127	130	98	110	120
Na ⁺	15.7	16.0	12.0	13.9	13.7	14.5	17.7	14.8
K ⁺	2.91	2.81	2.68	2.05	2.48	2.76	3.69	2.77
Ca ²⁺	41.3	38.9	32.6	38.0	42.2	30.3	31.4	36.4
Mg ²⁺	13.1	11.8	11.6	10.7	9.0	9.2	14.6	11.4
B	3.25	3.52	3.47	0.77	1.51	1.84	2.24	2.37
Σ	258	236	234	237	245	203	233	235
S/Cl	1.05	1.05	1.10	1.11	1.12	0.99	1.03	1.07
Cl/F	4.94	4.69	5.77	6.03	4.91	2.38	1.96	4.38

Вулкан Алаид (Северные Курильские острова)

Вытяжки из двух проб пепла, отобранных со снега 27 октября 2012 г. у кромки кратера и примерно в 150 м от кратера, были проанализированы на макро- и некоторые микрокомпоненты. Результаты анализов были пересчитаны на 100 г пепла и на площадь его поверхности (табл. 5.17). Пеплы, отобранные дальше от взрывного кратера, содержат значительно больше сорбированных компонентов, чем пеплы ближней пробы, даже после учета их гранулометрического состава (пересчета на площадь их поверхности). Водорастворимый комплекс пеплов вулкана Алаид отличается преобладанием хлорид-ионов над сульфат-ионами, что характерно, за редким исключением, и для пеплов других его извержений (рис. 5.9).

Таблица 5.17. Водорастворимые компоненты пепла вулкана Алаид 2012 г.

	мг/100 г		мг/м ²	
L, км	150	50	0.150	0.50
pH	4.36	3.93		
Cl ⁻	260.7	58.7	71.3	29.0
SO ₄ ²⁻	130.8	32.8	35.8	16.2
Na ⁺	51.0	8.27	14.0	4.09
K ⁺	11.60	2.63	3.17	1.30
Ca ²⁺	84.0	11.5	23.0	5.7
Mg ²⁺	21.2	3.96	5.81	1.96
H ₄ SiO ₄	79	42	22	21
Cu	2.65	0.21	0.73	0.11
Zn	0.0170	0.0072	0.0047	0.0036
Mn	1.79	0.38	0.49	0.19
V	0.0210	0.0036	0.0057	0.0018
Σ	613	144	168	71
S/Cl	0.17	0.19		
УГПП, м ² /кг	36.5	20.2		

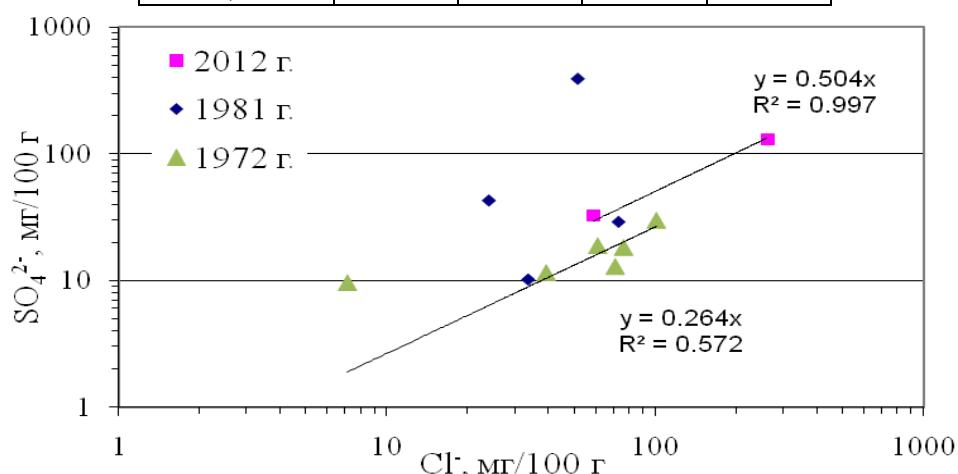


Рис. 5.9. Содержание SO₄²⁻ и Cl⁻ в вытяжках из пепла вулкана Алаид. Данные для 1972 и 1981 гг. по [Будников, Малеев, 1977; Будников, 1996].

5.8. Микрокомпонентный состав водорастворимого комплекса пеплов

Полный микрокомпонентный состав вытяжек из пеплов был определен методом ICP для проб пепла вулканов Карымский (выброс 6.08.2013 г.), Жупановский (резургентный пепел начала активизации 24.10.2013 г.), Камбальный (март 2017 г.), а также двух проб пепла со шлаком ТТИ-50, отобранных в районе извержения 4.04.2013 г. и 5.05.2013 г. (табл. 5.18). Частичный микрокомпонентный анализ методом пламенной адсорбции был выполнен, кроме вышеперечисленных, для двух проб тефры вулкана Алаид 2012 г. и пяти – вулкана Кизимен 2010–11 гг.

Таблица 5.18. Микрокомпонентный состав вытяжек из пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид (Северные Курилы), г/т (ppm)

	Кр-1-13	Ж-1-13	Т-лаг-13	Кз-11*	Ал-12	Кам-17		Кр-1-13	Ж-1-13	Т-лаг-13	Кз-11*	Ал-12	Кам-17
pH	4.7	3.7	3.2	4.7	4.4	5	Eu	0.0149	0.029	0.022			0.022
Al	64	304	521	1.8		5.4	Zr	0.0148	0.00052	1.95			0.001
Si	57	87	439	70	145	34	Cd	0.0147	0.037	0.51		0.03	0.05
Br		9.2	2.1				V	0.0143	0.84	2.55		0.2	
P		7.7	25				Tm	0.0106	0.012	0.0055			0.003
Cu	7.7	0.061	80	0.47	26.5	0.22	Ni	0.0089	0.094	0.39	0.12		
Mn	5.9	88	17	2	17.9	5.3	Lu	0.0083	0.010	0.0054			0.002
Fe	4.3	233	531	44		5.7	Ga	0.0075					
Sr	2.6	9.2	7.1			18	Th	0.0052	0.000094	0.019			
Ce	1.4	0.6	0.62			0.32	Mo	0.0045	0.006	0.066			0.003
Y	0.97	1.3	0.35			0.34	Tl	0.0042	0.0013	1.13			0.0023
Ba	0.93	0.28	8.91			0.46	Cr		0.090	1.25			
Nd	0.87	0.48	0.33			0.25	Pb		0.007	1.32			0.03
Zn	0.84	4.8	7.78		0.17	0.34	Nb	0.0041		0.017			
La	0.55	0.21	0.28			0.13	Te	0.0038	0.009	0.12			0.001
Li	0.30	0.39	1.34			0.091	Cs	0.0038	0.00048	0.15			0.001
Gd	0.22	0.19	0.079			0.09	Pd	0.0033					
Bi	0.22		0.027				Hf	0.0030	0.001	0.045			
Sm	0.19	0.14	0.077			0.075	W	0.0029		0.0029			
Pr	0.19	0.084	0.071			0.047	Ge	0.0024					
Ti	0.17	0.058	56				Ir	0.002					
Dy	0.16	0.2	0.07			0.068	Sn	0.0019		0.035			
Er	0.09	0.097	0.04			0.028	Ag	0.0018		0.025			
B	0.086	6.1	2.6			1	Ta	0.0013		0.00057			
Co	0.066	0.083	0.23	0.22	0.1	0.08	U	0.0012	0.00091	0.017			0.00023
Yb	0.060	0.077	0.035			0.017	Be	0.0012	0.0074	0.02			
Rb	0.053	0.12	3.4			0.084	Re	0.001		0.0039			0.00039
Ho	0.032	0.037	0.014			0.012	Sb	0.001	0.001	0.015			0.006
Tb	0.029	0.03	0.012			0.012	Sc	0.00072		0.087			
Se	0.025		0.62				Rh	0.00035					
As	0.023	0.3	2.5			0.019	Au	0.0002					

Примечание: Кр – Карымский, Ж – Жупановский, Т – ТТИ-50, Кз – Кизимен, Ал – Алаид, Кам – Камбальный, * – среднее из 5 анализов.

Приведенные данные хоть и имеют ограниченный характер, но могут дать представление о масштабах выноса микроэлементов пеплами в окружающую среду при соотнесении их с Приложением 4, а также о различиях в содержании микроэлементов в вытяжках из пеплов вулканов разного состава: андезитового (вулкан Карымский) и

базальтового (ТТИ-50) и разных типов извержений: вулканского (вулкан Карымский) и фреатического (вулканы Жупановский и Камбальный). Можно отметить, что концентрации малолетучих микроэлементов в вытяжках из пеплов в значительной степени определяется pH раствора.

5.9. Сравнительная характеристика водорастворимого комплекса пеплов и основные выводы

Средние значения результатов анализа вытяжек из пеплов извержений разных вулканов, пересчитанные на 100 г пепла, для сравнения сведены в одну таблицу (табл. 5.19, рис. 5.10). Дополнительно добавлены данные автора по пеплам Камбального вулкана и данные для извержений ближайших к городу вулканов Авачинский [Дроздин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995] и Горелый [Кирсанов, Озеров, 1983]. Из изученных автором пеплов наибольшие концентрации водорастворимых веществ (до ~2 г на 100 г) отмечены для резургентных пеплов вулканов Жупановский и Камбальный, которые характеризуются очень высокими содержаниями сульфат-иона, а пеплы Жупановского – также хлора, но при этом низкими концентрациями фтора, наиболее опасного для окружающей среды и человека. Водорастворимый комплекс пеплов Жупановского вулкана 2013–15 гг. имеет значительные сходства с комплексом пеплов Авачинского вулкана начальной стадии извержения 13.01.1991 г., включающего так же значительную долю резургентного материала. Также значительно содержание водорастворимых компонентов в пеплах эксплозивной стадии извержения вулкана Кизимен (декабрь 2010–январь 2011 гг.) – около 1 г, а в пеплах выбросов 28.12.2010–1.01.2011 гг. – до 1.5 г на 100 г пепла, при этом количество фтора так же мало. Трахиандезибазальтовые пеплы (ТТИ-50) и преимущественно ювенильные андезибазальтовые пеплы вулканов (Авачинский, Горелый, Ключевской) содержат больше фтора, чем андезитовые и резургентные пеплы и поэтому представляют наибольшую опасность с точки зрения негативного воздействия на живые организмы.

С целью качественного сравнения состава эруптивных газов в вытяжках из пеплов изучались отношения S/Cl и F/Cl. Среднее отношение S/Cl для большинства изученных вулканов Камчатки (Безымянный, Ключевской, Карымский, Авачинский, Горелый) близко к 1, для Шивелуча и Жупановского немного выше – 2.2–2.3, для Кизимена меняется в широких пределах от 0.35 до 7.6 в зависимости от периода активности и составляет в среднем 4.4 для наиболее активной эксплозивной стадии. Отличительно

Таблица 5.19. Водорастворимые компоненты пеплов извержений вулканов Камчатки и Алаид (Северные Курильские острова), мг/100 г

Вулкан	Дата извержения	L, км	pH	SO_4^{2-}	Cl^-	F ⁻	Ca^{2+}	Na^+	K ⁺	Mg^{2+}	Fe*	Al^{3+}	H_4SiO_4^*	Σ	S/Cl	Cl/F	
Безымянный	24.12.2006	30-70	4.8	211	66	10	74	31	9.1	9.0				410	1.10	6.6	
	17.12.2009	26-46	5.2	68.7	42.0	6.6	36.7	12.9	4.1	2.8			7.50	181	0.55	6.36	
	08.03.2012	3-17	5.4	155	24.7		47.1	17.0	7.7	5.1			3.30	260	2.40		
	ср.		5.0	155	55.3	8.7	58.9	23.6	7.17	6.51			7.08	323	0.95	6.51	
Карымский	2007	1.3-10	4.5	115	22.2	1.43	32.9	24.0	1.79	5.68				203	1.4	18	
	2008	1.3-10	4.5	66.4	9.46	0.82	21.5	8.60	3.06	1.66				112	0.6-5.4/3	12	
	2010	1.3-11	4.6	75.1	25.7	2.36	37.2	20.5	2.58	3.84			9.41	177	1.3	14	
	2011	1.3-10	4.9	67.2	24.0	4.57	22.0	12.1	1.90	1.50	2.0		3.30	139	0.92	5.2	
Шивелуч	ср.	1.3-10	4.6	105	32.0	3.80	40.2	18.1	2.90	3.70	0.43	6.4	3.70	216	1.2	11	
	4-31.12.2006	19-20	5.7	61	13.9	0.69	26.6	2.17	5.23	13.8			16	139	1.46	23	
	2007	16-49	5.2	242	44.6	3.69	85.8	25.5	5.31	13.6			11	432	2.35	13	
	окт.10	40-87	5.1	175	31.1	0.90	56.0	21.0	2.95	13.6			3.0	304	2.40	41	
Кизимен	ср.		5.3	187	34.5	2.20	66.1	20.6	4.20	10.9			6.1	332	2.30	29	
	Дек.2010-янв.2011	10-137	4.7	711	59	4.5	261	26.1	10	12	4.40	1.75	25	1115	4.4	12	
	Фев.- март 2011	14	3.8	312	242	4.6	158	25	8.7	9.3				760	0.53	50	
	Жупановский	21-24.10.2013	0.4-25	3.9	1085	257	2.02	306	79.1	43.3	25.1	23	30.0	29.8	1880	0.8-3.6/2.2	111
ТТИ-50	27.11.12-сент.13	0.2-60	4.8	84	238	50.0	79.0	39.0	17.0	16.0	20.0	26.0	85	654	0.23	3.4	
Ключевской	ноя.13	25-33	6.0	120	37.2	9.80	36.4	14.8	2.77	11.4				232	1.1	4.4	
Алаид	2012	0.15	4.4	131	261		84	51	11.60	21.20			80.0	640	0.17		
Камбальный	2017	10	5.0	1327	10.0	0.40	536	12.0	6.50	2.10	0.57	0.64	12	1910	44.3	25	
Авачинский	13.01.1991	7-25	4.6	1070	98	4.2	482	52	9				21	10	1780	3.64	23.3
	16-17.01.1991		3.8	814	301	118	340	50	11		30	26	120	77	1890	0.90	2.55
Горелый	1980-81 юв.+рез.	0.1-8.5		225	68	12	63	10.5	2.90	31.4	0.3	18.3		431	1.10	5.67	
	1980-81 рез.	0.1-8.5		891	271	33	264	30.3	6.5	58	12	98		1664	1.10	8.21	

Примечание. Курсивом отмечены данные, взятые из работ: Карымский 2010 г. – [Маневич и др., 2013], Авачинский 1991 г. – [Дроздин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995], Горелый 1980-81 гг. – [Кирсанов, Озеров, 1983]. Юв. – ювенильный, рез. – резургентный. Fe*= $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$, H_4SiO_4^* =растворенная+коллоидная формы.

низкие отношения S/Cl имеют вытяжки из пеплов базальтовых вулканов ТТИ-50 и Алаид – 0.23 и 0.17, соответственно.

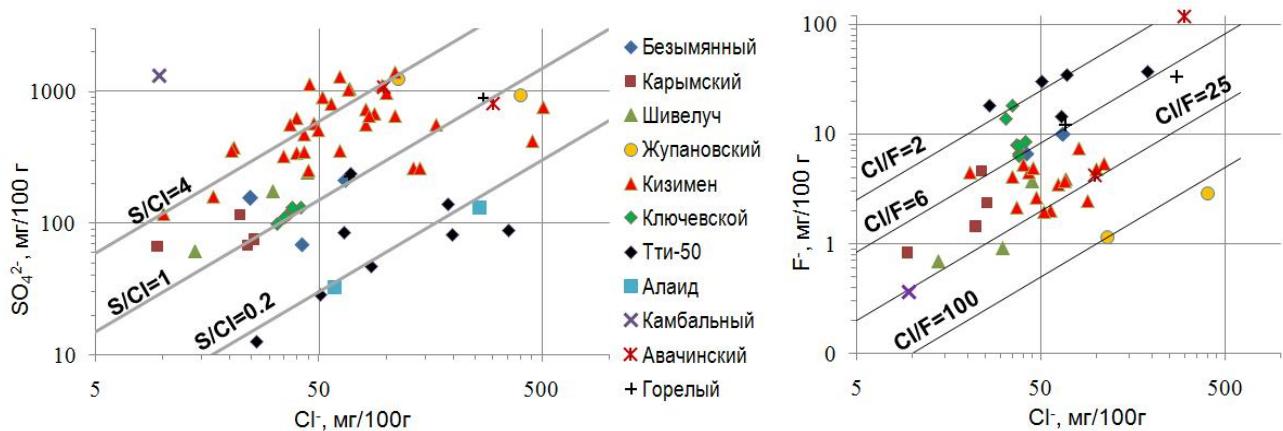


Рис. 5.10. Содержание сульфат-, хлорид- и фторид-ионов в водных вытяжках из пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид.

Концентрации растворимых компонентов были пересчитаны на единицу площади поверхности пеплов ($\text{мг}/\text{м}^2$) для проб с полным гранулометрическим анализом (табл. 5.20), ввиду того, что количества сорбированных компонентов зависят в первую очередь от площади поверхности пеплов, т.е. от их гранулометрического состава, который определяется как характером извержения, так и расстоянием отбора пробы от вулкана. Наибольшее количество сорбированных веществ на единицу поверхности пеплов отмечено для базальтовых вулканов за счет максимального содержания галогенов (F^- и Cl^-), и вулканов Карымский и Кизимен с максимальным содержанием сульфат-иона. Значительное количество сорбированных веществ, нормированных на площадь поверхности, для базальтовых пеплов кроме высоких начальной температуры и концентрации газов в шлейфе, можно объяснить значительной пористостью материала, которая не учитывается в используемой автором методике расчета УПП пеплов; кроме того, сравнительно высокие содержания HCl и HF были отмечены также и в эруптивных газах ТТИ-50 [Zelenski et al., 2014]. Максимальное содержание сульфат-иона в вытяжках из пеплов некоторых выбросов вулканов Кизимен и Карымский, вероятно, объясняется высокой концентрацией SO_2 в шлейфе. Пеплы резургентных извержений (вулканов Жупановский и Камбальный) также характеризуются сравнительно высоким содержанием растворимых веществ благодаря выносу вместе с пеплами и последующему растворению фумарольных (гидротермальных) минералов. Минимальное количество сорбированных веществ на единицу площади поверхности характерно для пеплов вулканов Безымянnyй, Шивелуч, Ключевской, заключительных

Таблица 5.20. Водорастворимые компоненты пеплов извержений вулканов Камчатки и Алаид (Курильские острова), мг/м² УПП

	Дата	L, км	УПП, м ² /кг	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Σ	S/Cl	Cl/F
Безымянный	24.12.2006	31	227	7.20	2.00	0.25	2.41	1.24	0.286	0.31	13.7	1.20	8.10
	24.12.2006	42	250	7.68	2.3	0.44	2.76	1.04	0.21	0.28	14.8	1.11	5.23
	17.12.2009	39	204	2.94	1.75	0.21	1.73	0.527	0.112	0.13	7.4	0.56	8.33
	17.12.2009	45	153	5.39	2.77	0.505	2.51	0.920	0.455	0.201	13.0	0.65	5.49
	17.12.2009	46.3	184	5.25	2.88	0.537	2.66	0.795	0.228	0.179	12.5	0.61	5.36
	08.03.2012	11	182	10.6	2.25	н/о	3.17	1.22	0.487	0.458	18.1	1.57	
	08.03.2012	15	230	6.53	1.86	н/о	2.31	0.77	0.33	0.21	12	1.17	
	ср	33	200	6.51	2.26	0.39	2.51	0.93	0.30	0.25	13.1	0.98	6.50
Кизимен	10-13.12.10	95	171	6.9	0.6	н.п.о.	1.66	0.5	0.5	0.33	11.5	3.83	
	28-29.12.10	23	189	47.5	2.8	0.1	16.8	1.5	0.6	0.74	70.6	5.66	28
	01.01.2011	82	177	73.6	3.2	0.07	27.8	2.1	0.8	1.02	110	7.67	45.7
	07.01.2011	23	271	24.9	3.3	0.09	9.31	0.8	0.3	0.51	39.8	2.52	36.7
	13.01.2011	52	213	26.9	2.2	0.12	9.17	0.9	0.3	0.37	40.2	4.08	18.3
	13.01.2011	137	265	27.4	3.08	<i>0.051</i>	11.9	1.07	0.337	0.679	44.5	2.97	
	09.02.2011	14	245	10.6	5.4	0.15	5.28	0.8	0.2	0.27	24.3	0.65	36
	дек.11	9	241	3.5	1.7	н/о	1.08	0.7	0.2	0.16	7.8	0.69	
Жупановский	окт.13	0.4	361	26.0	11.1	0.0805	8.94	2.06	1.22	0.75	50.2	0.78	138
	янв.15	25	223	56.8	5.24	0.0525	13.4	3.87	1.96	1.06	82.3	3.612	100
Шивелуч	окт.10	73	334	6.21	1.84	0.0419	2.25	0.899	0.127	0.634	12.0	1.13	43.8
	янв.16	25	299	11.8	2.26	н/о	3.50	1.3	0.29	0.71	19.8	1.74	
	2016	22	287	11.0	3.77	н/о	4.89	1.6	0.33	0.68	22.3	0.98	
Карымский	21.04.2007	3.8	34.2	78.2	11.7	0.3	19.1	15.1	0.09	3.7	128	2.23	42.1
	2016	3.8	117	38.4	11.4	н/о	13.3	8.4	1.72	2.3	75.6	1.12	
Алаид	окт.12	0.15	36.5	35.8	71.3	н/о	23.0	14	3.17	5.81	153	0.17	
		0.05	20.2	16.2	29.0	н/о	5.70	4.09	1.30	1.96	58.3	0.19	
ТТИ	27.11.2012	50	105	15.7	55.1	н/о	26.5	9.39	3.26	4.88	115	0.095	
	28.11.2012	50	58	14.0	34.3	н/о	15.2	4.08	1.87	2.21	71.6	0.14	
	нояб.-дек. 2012	7	33	8.56	15.4	9.17	8.08	9.02	2.21	1.58	54.0	0.19	1.68
Ключевской	2013	33	224	5.68	1.69	0.28	1.7	0.62	0.092	0.48	10.5	1.12	6
Камбальный	2017	10	326	40.7	0.3	0.011	16.5	0.36	0.20	0.06	58.1	45.8	26.9

стадий активности Кизимена, причем значения для пеплов Безымянного и Ключевского вулканов довольно близки, включая отношения S/Cl и F/Cl (рис. 5.11).

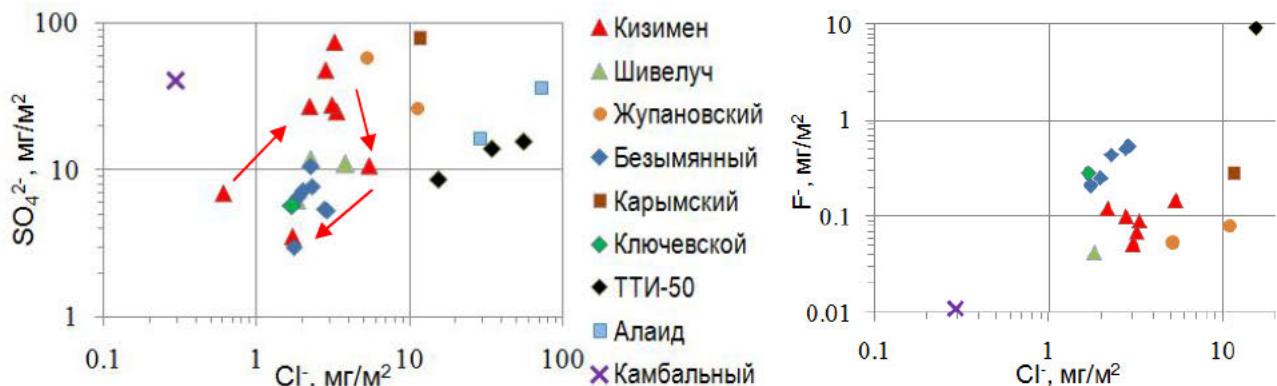


Рис. 5.11. Содержание сульфат-, хлорид- и фторид-ионов, пересчитанные на единицу площади поверхности пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид. Стрелками показаны изменения в ходе извержения вулкана Кизимен.

Количества водорастворимых веществ, вынесенных в результате изученных и некоторых других извержений, среднее за год для постоянно извергающихся вулканов (Шивелуч, Карымский) и суммарные количества за рассматриваемый период представлены в таблице 5.21. За 8 лет с 2006 по 2013 гг. вулканами Камчатки было вынесено вместе с тефрой около 660 ± 150 тыс. т водорастворимых веществ (SO_4^{2-} , Cl, F, Ca, Na, K, Mg), а без учета шлака, отложившегося в ближней зоне ТТИ-50, на 60 тыс. т меньше. Можно заключить, что в окружающую среду в среднем поступает около 80 ± 20 тыс. т растворимых веществ в год, в т.ч. SO_4^{2-} - 41, Cl – 13, F – 3, Ca – 16, Na – 5.5, Mg – 2.3, K – 1.6 тыс. т. Наибольший вклад в общее количество вносит постоянная активность вулкана Шивелуч (не менее 45%), регулярные средней силы извержения вулкана Безымянного (~ 16%), мощные извержения данного периода – ТТИ-50 (~18%) и вулкана Кизимен (~16%); на долю остальных (Ключевской, Карымский, Жупановский) приходится менее 5% общего выноса.

Все вулканы (за исключением Корякского¹²), извергавшиеся за рассматриваемый период, находятся на расстоянии более 30 км от поселков с населением менее 5 тыс. человек, и более 65 км от краевого центра (г. Петропавловск-Камчатский) с населением около 200 тыс. человек, поэтому подобная их активность может представлять только кратковременную респираторную опасность для населения.

¹² Продукты извержения вулкана Корякский (20.12.2008–27.08.2009) автором не изучались. По данным [Мелекесцев и др., 2011], это слабое гидротермально-фреатическое извержение оказало влияние на качество воды некоторых небольших водотоков в районе дачных участков.

Значительное содержание водорастворимых веществ отмечалось в пеплах извержения вулкана Авачинский в 1991 г. (0.5–3 г на 100 г пепла), но по общей массе было вынесено незначительное количество – 3.4 тыс. т, ввиду сравнительно небольшой общей массы изверженного пепла (170 тыс. т) [Дроздин, Муравьев, 1994]. Во время извержения вулкана Горелый в 1980–81 гг. резургентными пеплами и, в меньшей степени, ювенильным материалом [Кирсанов, Озеров, 1983], было вынесено около 500 тыс. т водорастворимых компонентов, т.е. почти столько же, сколько всеми активными вулканами Камчатки за 2006–13 гг.

Тем не менее, за год вулканами Камчатки только в составе водорастворимого комплекса пеплов выносится серы в 2–4 раза больше чем от всех стационарных и передвижных антропогенных источников загрязнения атмосферы Камчатского края, хлора и фтора – в 10000 раза больше [Государственный.., 2004; Доклад.., 2017]. Вынос серы с пеплами в 6–9 раз меньше, а фтора и хлора в 2.5 раза больше чем выбрасывает в атмосферу расчетный промышленный город с миллионным населением за год [Прокачева, Усачев, 1989]. Только за 3.5 месяца – с декабря 2006 г. по середину марта 2007 г. на площади, охваченной пеплопадами (31 тыс. км²), – было вынесено 10 млн т пепла вулканов Безымянный и Шивелуч, а с ними – более 40 тыс. т водорастворимых веществ. Масса серы соответствует выбросам в атмосферу расчетного промышленного города с миллионным населением за 1–3 месяца, а фтора – за год (табл. 5.21).

Рассмотренные нами продукты извержений – наглядный пример вклада вулканической активности в химический состав сезонного снежного покрова, а также почвы и вод суши Камчатки. Действующие вулканы Камчатки – постоянный и, очевидно, главный источник поступления веществ в окружающую среду полуострова, в целом, относительно слабо затронутую антропогенным воздействием.

Таблица 5.21. Масса веществ, вынесенных извержениями вулканов Камчатки в 2006-13 гг. в составе водорастворимого комплекса пеплов

Вулкан	Дата извержения	Тефра, млн т	Водорастворимые вещества, вынесенные за извержение, тыс. т									
			SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Fe*	Al ³⁺	
Безымянный	24.12.2006	7	15	4.6	0.7	5.2	2.2	0.64	0.63			29
	17.12.2009	4.5	2.7	1.7	0.25	1.5	0.55	0.17	0.11			7.0
	08.03.2012	0.5	1.7	0.2	н.о.	0.42	0.18	0.08	0.05			2.6
всего	2006-13	34	52.8	18.8	2.95	20.0	8.03	2.44	2.21			110
Карымский	2007	2.5	2.88	0.555	0.036	0.823	0.6	0.0448	0.142			5.1
	2008	0.6	0.398	0.0568	0.0049	0.129	0.052	0.018	0.010			0.7
	2011	1.5	1.13	0.386	0.035	0.558	0.308	0.039	0.058			2.5
	ср. за год	1.8	1.89	0.58	0.068	0.72	0.33	0.052	0.067	0.0077	0.115	3.7
всего	2006-13	14.4	15	5	0.55	5.8	2.6	0.42	0.53			30
Шивелуч	4-31.12.2006	0.7	0.43	0.097	0.005	0.19	0.056	0.015	0.014			0.8
	2007	8.5	22	4.3	0.36	7.8	2.3	0.45	1.2			38
	окт.10	15	26	4.66	0.131	8.4	3.15	0.44	2.03			45
	ср. за год	11	21	3.8	0.25	7.3	2.3	0.5	1.2			36
всего	2006-13	90	172	31	2.0	60	19	4.1	9.8			297
Кизимен	нояб. 10-дек. 11	10	62	6	0.43	23	2.6	1	1.2	0.44	0.175	97
Жупановский	21-24.10.2013	0.1	0.94	0.4	0.003	0.32	0.074	0.044	0.027	0.001	0.033	1.8
ТТИ-50 (пепел)		10	8.35	23.3	5.3	10.6	4.4	1.8	2.5	1.08	2.63	60
(шлак)		65	8.23	17.1	11.6	8.14	6.99	2.6	1.73			56
всего		75	16.6	40.4	16.9	18.7	11.4	4.4	4.23			116
Ключевской	<i>4 извержения</i>	<i>≤4</i>	4.8	1.5	0.4	1.5	0.6	0.1	0.5			9
Корякский	12.2008-08.2009	0.9										
Всего (без шлака ТТИ)	2006-13	164	317	86	12	117	37	10	17	2	3	605
Всего	2006-13	229	325	103	23	125	44	13	19	1.5	3.0	662
	за год	29	41	13	2.9	16	5.5	1.6	2.3	0.2	0.4	83
Авачинский	13.01-30.01.1991	0.17-0.2	1.6	0.53	0.17	0.51	0.088	0.03	0.07	0.6	0.21	3.4
Горелый	1980-81	48	310	97	12.9	52	11.4	2.56	23	3.8	6	509
Камчатский край*	за год 2003/2016		22 / 8.9	- / 0.0004	- / 0.0002							76 / 81
Город (1 млн. чел.)**	за год		225-360	5	1.2							

Примечание: * – выбросы веществ в атмосферу по данным [Государственный..., 2004; Доклад..., 2017]; ** – выбросы в атмосферу расчетным городом с населением 1 млн человек по [Прокачева, Усачев, 1989].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения поставленной цели исследования автором работы было проанализировано большое количество отечественных и зарубежных литературных источников. Кроме того, были привлечены неопубликованные данные сотрудников ИВиС (результаты гидрохимических анализов и др.) для ряда вулканов, использован обширный материал, накопленный в результате собственных исследований – отбора образцов в процессе полевых работ в период 2006–17 гг. и последующей их обработки.

Основу работы составляют данные, полученные в результате отбора и анализа большого количества проб в ходе геохимической снегосъемки, которая для удаленных и труднодоступных вулканов Камчатки в условиях длительного снежного периода (7–9 месяцев) имеет ведущее значение как способ отбора проб пепла. Это позволяет оценить количество твердого и водорастворимого материала, выносимого при извержениях вулканов в окружающую среду.

Проведенная работа позволила получить следующие результаты и выводы:

1. Анализ опубликованных работ, подтвержденный собственными исследованиями, показал, что при недостаточном количестве площадных проб пепла и неоптимальном их расположении в зонах пеплопада методы, основанные на аппроксимации экспоненциальной и степенной зависимостями убывания количества пепла с расстоянием от вулкана, могут давать существенные ошибки в определении суммарной изверженной массы (объема) пепла. Поэтому в работе выбор методов определения массы пепла в каждом случае основывался на расположении точек отбора проб в зоне пеплопада.

Для повышения точности оценок была разработана с участием автора методика расчета массы изверженного пепла для единичных взрывов на основе специально созданного программно-математического комплекса переноса/осаждения вулканического пепла, позволяющая также оценить и другие параметры извержения – суммарный гранулометрический состав изверженного материала, зону пеплопада, распределение материала по высоте. Но из-за ее трудоемкости она была применена только к нескольким взрывным событиям.

2. Приведены оценки массы выброшенной тефры ряда извержений вулканов Камчатки 2006–13 гг., которая является важной (вулканы Безымянный, Шивелуч), а иногда и основной (Карымский) составляющей их геологического эффекта.

В течение 8 лет (2006–13 гг.) постоянную активность проявляли вулканы Безымянный, Шивелуч, Карымский, Ключевской, произошли по одному длительному продуктивному (≥ 0.5 км³) извержению вулканов Кизимен и Толбачик, а также наблюдались слабые фреатические активизации вулканов Жупановский и Корякский.

За исследуемый период произошли 10 извержений вулкана Безымянный, сходных по характеру. Результаты исследования продуктов четырех из них, а также опубликованные данные по прошлым извержениям, позволили выявить зависимость массы изверженной тефры от высоты эруптивной колонны. С использованием полученной зависимости вынос тефры за 2006–13 гг. оценивается в ~34 млн т или 4 млн т в год. Для хорошо изученных извержений видно, что массы отложений тефры и лавы сопоставимы между собой, а масса отложений ПП превышает их в ~3 раза.

На вулкане Карымский единственным продуктом активности была тефра. Её ежегодная масса варьировал от 0.6 млн т (2008 г.) до 3.8 млн т (2006 г.), а за 8 лет составила 14.4 млн т, в среднем – 1.8 млн т в год. Это совпадает со средней интенсивностью выноса вещества вулканом за последние 500 лет, так и за время его жизни – 2 млн т/год [Брайцева, Мелекесцев, 1989].

На вулкане Шивелуч, хотя и преобладает экструзивный тип извержения, и наибольший объем материала выносится в виде ассоциированных с ним обвалов, раскаленных лавин и ПП, оцененное количество выброшенной тефры за рассматриваемый период (~90 млн т) и в среднем за год (8–11 млн т), составляет около 45% общего выноса тефры Камчатскими вулканами в выбранный период времени.

Самые продуктивные не только за рассматриваемый период, но и с начала XXI века, извержения вулканов Толбачик (ТТИ-50) и Кизимен вынесли всего по ~10 млн т пепла каждое.

Оценки, выполненные автором для отдельных хорошо изученных извержений, экстраполяция этих оценок на малоизученные события, а также опубликованные данные дают возможность оценить примерный вынос пепла вулканами Камчатки за 8 лет (2006–2013 гг.). Пеплов андезитового и дацитового составов было вынесено 150 ± 50 млн т, основного состава – 15 ± 5 млн т (или 80 млн т вместе с пирокластикой ТТИ-50, выпавшей в зоне <1.5 км от вулкана). В среднем за год количество пеплов, изверженных вулканами Камчатки, составило 29 ± 7 млн т. По приблизительным подсчетам (Приложение 4) это составляет около 6% геологического эффекта извержений вулканов

Камчатки. По данным Гущенко И.И. [1965], в голоцене только вулканы Северной Камчатки извергали ~46 млн т тефры в год, на современном этапе 36–45 млн т. Полученные автором близкие оценки для всей Камчатки, вероятно, связаны с отсутствием крупных эксплозивных извержений в рассматриваемый период, все извержения имели $VEI \leq 3$.

3. Состав водорастворимого комплекса пеплов, включающего как адсорбированные газы извержения, так и выщелоченные из породы петрогенные элементы, изучался посредством анализа водных вытяжек из пеплов. В результате исследования уточнены методика их приготовления, учет фоновых концентраций, оптимальное соотношение вода/пепел, время их взаимодействия.

Результаты анализа вытяжек из пеплов вместе с рассчитанной массой выброшенного пепла для отдельных извержений позволили оценить количество вынесенного в окружающую среду водорастворимого материала.

За 8 лет с 2006 по 2013 гг. вулканами Камчатки было вынесено вместе с тефрой около 660 тыс. т водорастворимых веществ (SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}), а без учета шлака, отложившегося в ближней зоне ТТИ-50, на 60 тыс. т меньше. В среднем в окружающую среду поступало около 82 ± 25 тыс. т растворимых веществ в год, в т.ч. SO_4^{2-} – 41, Cl^- – 13, F^- – 3, Ca^{2+} – 16, Na^+ – 5.5, K^+ – 1.6, Mg^{2+} – 2.3 тыс. т. Наибольший вклад в общее количество вносит постоянная активность вулкана Шивелуч (около 45%), регулярные средней силы извержения вулкана Безымянный (~16%), довольно мощные извержения данного периода – ТТИ-50 (~18%) и вулкана Кизимен (~16%); на долю остальных (Ключевской, Карымский, Жупановский) приходится менее 5% общего выноса.

Сравнительный анализ химического состава вытяжек из пеплов показал, что количественный состав и соотношения водорастворимых веществ, поступающих в окружающую среду с вулканическими пеплами, зависит от состава пород вулкана, типа и стадии извержения, гранулометрического состава, степени ювенильности и газонасыщенности эксплозивного материала. В частности, в ходе извержения вулкана Кизимен отмечено увеличение содержания SO_4^{2-} и отношения S/Cl , а затем их уменьшение и увеличение содержания Cl^- в составе водорастворимого комплекса пеплов; максимальные концентрации SO_4^{2-} и других веществ отмечены в вытяжках из

пеплов фреатических извержений, а галогенов (F^- , Cl^-) – в вытяжках из пеплов базальтовых вулканов.

4. Впервые для представительного количества проб пеплов вулканов Камчатки выполнен гранулометрический анализ с использованием метода лазерной дифракции, позволяющего проводить разделение на фракции размером до 0.3 мкм.

Детальный гранулометрический анализ показал наличие значительной доли пылеватой фракции и отсутствие выраженной зависимости ее от расстояния в пеплах андезитовых вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч, для извержений которых характерно формирование пирокластических потоков. Это объясняется совместным осаждением пеплов из эруптивной колонны и из облаков пыли, сопровождающих сход пирокластических потоков, и подтверждается результатами математического моделирования, а также распределением точек на диаграмме, предложенной [Dartevelle et al., 2002]. Пеплы базальтовых вулканов Алаид, Ключевской, Толбачик, а также андезитового вулкана Карымский, для эксплозивных извержений которых не свойственно формирование пирокластических потоков, имеют более крупнозернистый состав.

Полученные результаты имеют научное и практическое значение:

- данные о гранулометрическом составе пеплов и источниках пеплопадов вулканов были использованы для моделирования атмосферного переноса вулканического пепла, объяснения сорбционных и других свойств пеплов, особенностей вариации петрохимического состава, а также важны для оценки вулканической опасности для авиации и здоровья человека;
- выявленные закономерности формирования гранулометрического состава и водорастворимого комплекса пеплов для разных типов вулканов и извержений могут быть использованы при исследованиях пеплов других вулканов, в т.ч. и для задач палеовулканологии;
- выполненные оценки выноса пеплов и поступающих с ними водорастворимых веществ для вулканов Камчатки являются частью общего выноса вулканического материала в окружающую среду;
- разработанный метод оценки массы пепла и других характеристик эксплозивных извержений, а также полученные результаты для конкретных эруптивных событий (схемы отложений пепла (kg/m^2), масса его водорастворимых компонентов) позволяют

оценивать влияние вулканической активности на состояние поверхностных, в т.ч. питьевых, водоемов, почвы, растительный и животный мир, население и объекты хозяйственной деятельности.

Перспективы дальнейших исследований включают детальное изучение микрокомпонентного состава вытяжек из пеплов, для которого в данной работе приведены ограниченные данные; комплексное изучение состава и количества вулканических газов, поступающих в процессе извержения в атмосферу и на поверхность земли в составе пеплов, а также оценку массы пеплов и вынесенных с ними водорастворимых веществ будущих извержений вулканов Камчатки разной мощности с совершенствованием методик этих оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г. Поступление микроэлементов при фумарольной деятельности вулкана Авачинский и их распределение в свежевыпавшем и сезонном снеге и природных водах // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 30–37.
2. Алидибиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. и др. Извержение вулкана Безымянного в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3–17.
3. Андреев В.И., Быкасов В.Е. Некоторые черты ландшафта Толбачинского дола в связи с извержением 1975–1976 гг. // Вопросы географии Камчатки. 1989. № 10. С. 166–168.
4. Андреев В.И., Магуськин М.А., Сенюков С.Л., Озеров А.Ю. Особенности извержения вулкана Карымский в 2005 г. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 98–103.
5. Андреев В.И., Николаева А.Г. О влиянии извержений вулкана Карымского и кальдеры Академии Наук (Кратера Токарева) на окружающую среду // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 11–18.
6. Андреев В.И., Озеров А.Ю., Сенюков С.Л., Гавриленко М.Г. Эруптивная активность вулкана Карымский в 2005–06 гг. (краткое сообщение) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 28–31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 337–346.
7. Башарина Л.А. Влияние вулканической деятельности на химический состав атмосферных осадков и воздух Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1974. № 50. С. 104–111.
8. Башарина Л.А. Водные вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного // Бюллетень вулканологических станций. 1958. № 27. С. 38–42.
9. Башарина Л.А. Фумарольная деятельность вулкана Безымянного в 1956–1957 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1960. № 29. С. 15–27.
10. Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Жданова Е.Ю. Извержение вулкана Безымянного в 1993–1995 гг. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 60–71.

11. Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–26.
12. Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 3–13.
13. Борисов О.Г. Вторичные фумаролы агломератового потока вулкана Безымянного и основной источник их питания к концу 1958 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1960. № 29. С. 28–37.
14. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. Вулкан Карымский: история формирования, динамика активности и долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 14–31.
15. Бrimblcum P. Состав и химия атмосферы: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 352 с.
16. Будников В.А. Пирокластика современных базальтовых извержений. Владивосток: Дальнаука, 1996. 160 с.
17. Будников В.А., Малеев Е.Ф. Пирокластика Олимпийского прорыва вулкана Алаид извержения 1972 года // Бюллетень вулканологических станций. 1977. № 53. С. 65–76.
18. Быкасов В.Е. Вулканогенные экосистемы: предпосылки и возможности обосновления // Вестник ДВО РАН. 2005. № 5. С. 91–97.
19. Быкасов В.Е. Вулканогенный тип ландшафта // Вопросы географии Камчатки. 1982. № 8. С. 17–21.
20. Быкасов В.Е. Шлаково-пепловый чехол извержения 1975 г. и поражение растительности Толбачинского дола // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 76–78.
21. Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984.
22. Волынец А.О., Мельников Д.В., Грибоедова И.Г. Вещественный состав вулканических пород Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 173–214.
23. Гирина О. А., Демянчук Ю. В., Давыдова В. О., Плечов П. Ю. Извержение вулкана Безымянnyй 1 сентября 2012 г., его прогноз и продукты // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню

вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 30–35.

24. Гирина О.А. Конвективная гравитационная дифференциация пирокластики андезитовых вулканов // Литосфера. 2010. № 3. С. 135–144.
25. Гирина О.А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток, 1998. 174 с.
26. Гирина О.А., Коновалова О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки в 2009 г. // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», 29–30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 41–49.
27. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др. Активность вулканов Камчатки в 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы Материалы региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога (к 50-летию ИВиС ДВО РАН). Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012а. С. 28–33.
28. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А. Спутниковый мониторинг Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН в 2012–2013 гг. // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 29 – 30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 50–56.
29. Горбач Н.В., Плечова А.А., Маневич Т.М., Портнягин М.В., Философова Т.М., Самойленко С.Б. Состав вулканических пеплов и динамика извержения вулкана Жупановский в 2013–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 3–20.
30. Горбач Н.В., Портнягин М.В., Философова Т.М. Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитового вулкана Молодой Шивелуч в 2001–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 37–61.
31. Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Волынец А.О., Мельников Д.В., Дегало В.Н. Трещинное Толбачинское извержение в 2012-2013 гг.: первые результаты // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.

32. Гордеев Е.И., Фирстов П.П., Куличков С.Н., Махмудов Е.Р. Инфразвуковые волны от извержений вулканов Камчатки // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 1–12.
33. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Введ. 2014-12-12. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
34. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Камчатской области и Корякского автономного округа в 2003 году». Петропавловск-Камчатский: Управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Камчатской области и Корякскому автономному округу, 2004. 206 с.
35. Гущенко И.И. Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука, 1979.
36. Гущенко И.И. Пеплы Северной Камчатки. М.: Наука, 1965. 144 с.
37. Гущенко И.И. Реконструкция пирокластических аэроальбиносных отложений (тефры) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 4. С. 17–33.
38. Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В., Сокоренко А.В., Демянчук Ю.В. Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэрофотосъёмочных облётов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 30 марта – 1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 26–36.
39. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В., Шевченко А.В., Свирид И.Ю. Извержение 2010–2012 гг. вулкана Кизимен – самое продуктивное (по данным дистанционных наблюдений) на Камчатке в начале XXI века. Часть I. Этап 11.11.2010–11.12.2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 6. С. 3–21.
40. Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. Количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 91–109.
41. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. / Отв. ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. М.: Наука. 1991.

42. Доклад об экологической ситуации в Камчатском крае в 2016 году. Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. Петропавловск-Камчатский, 2017. 374 с.
43. Дроздин В.А., Муравьев Я.Д. Энергетический и экологический аспекты извержения вулкана Авачинский на Камчатке (январь 1991 г.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 3. С. 3–19.
44. Дубик Ю.М., Меняйлов И.А. Новый этап эруптивной деятельности вулкана Безымянного // Сб. «Вулканы и извержения». М: Наука, 1969. С.38–77.
45. Дубик Ю.М., Огородов Н.В., Абдурахманов А.И. и др. Начало нового эруптивного цикла активности вулкана Карымский в мае 1970 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1972. № 48. С. 3–20.
46. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Вершинные извержения вулкана Ключевской (Камчатка) в начале XXI столетия, 2003–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 3–20.
47. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С.48–62.
48. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А. Извержения вулкана Ключевской в 2015 -2016 гг. // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 42–45.
49. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Оценка объемов изверженных продуктов вулкана Безымянный за 1995–2009 гг. // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 28–41.
50. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Роль вулканических пеплов в формировании почвенно-растительного покрова в зоне современного эксплозивного вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2008. № 1. С. 19–34.
51. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Ряховская Н.И., Гайнатулина В.В., Аргунеева Н.Ю., Макарова М.А. Особенности геохимической трансформации естественных почв и повышение продуктивности агроценозов при поступлении продуктов вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 57–72.

52. Земцов А.Н. Исследование твердой дисперсной фазы эруптивного вулканического облака. Диссертация на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук / рук. работы Е.К. Мархинин. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. 267 с.
53. Иванов Б.В. Извержение Карымского вулкана в 1962–65 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 134 с.
54. Иванов Б.В., Флеров Г.Б., Масуренков Ю.П. и др. Динамика и состав продуктов извержения Авачинского вулкана в 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 5–27.
55. Карпов Г.А., Лупикина Е.Г., Николаева А.Г., Бычков А.Ю., Лапицкий С.А., Николаева И.Ю. Динамика изменения гидрогеохимических характеристик, теплового режима и биоценозов пресных и термальных вод бассейна озера Карымское после катастрофического подводного извержения 1996 г. в кальдере Академии Наук (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 5. С. 3–21.
56. Карпов Г.А., Лупикина Е.Г., Андреев В.И., Самкова Т.Ю. Воздействие вулканизма на окружающую среду (на примере извержений в кальдере Академии Наук вулкана Карымский) // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 83–99.
57. Кирсанов И.Т. Извержение Ключевского вулкана в 1966 г. с прорывом побочных кратеров им. Пийпа в октябре-декабре 1966 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1968. № 44. С. 11–29.
58. Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25–42.
59. Кирсанова Т.П., Пилипенко Г.Ф., Юрова Л.М. О влиянии извержения на химический состав поверхностных и подземных вод (на примере района извержения Толбачинских вулканов на Камчатке) // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 126–134.
60. Кирьянов В.Ю., Соловьева Н.А. Изменение вещественного состава пеплов в результате гравитационной эоловой дифференциации // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 10–19.
61. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 16–36.

62. Кирьянов В.Ю. Гравитационная эоловая дифференциация пеплов вулкана Шивелуч (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1983. № 6. С. 30–40.
63. Кирьянов В.Ю. Пеплы крупнейших извержений вулканов Камчатки и их стратиграфическое значение: автореф. дис. ...канд. г.-м. наук. Владивосток, 1987.
64. Кирьянов В.Ю., Рожков Г.Ф. Гранулометрический состав тефры крупнейших извержений вулканов Камчатки в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 16–29.
65. Куренков И.И. Изменение биологической продуктивности озера под влиянием вулканического пеплопада // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 127–130.
66. Лупикина Е.Г., Карпов Г.А. Корреляция биофильной компоненты в воде оз. Карымское с поступлением вулканического пепла вулкана Карымский // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 207–212.
67. Malik H.A. Извержение вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 50–59.
68. Malik H.A. Извержение вулкана Кизимен 2010–2013 гг.: результаты исследования водных вытяжек из пеплов, природных вод и постэруптивных газов // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 84–91.
69. Malik H.A. Импактный вклад вулканических извержений в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 4. С. 45–52.
70. Malik H.A., Кузьмина А.А. Особенности химического состава снежного покрова в районе активных вулканов // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», 29–30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 201–211.
71. Malik H.A., Максимов А.П., Ананьев В.В. Извержения вулкана Кизимен в 2010–2012 гг. и его продукты // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 – 30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 64–70.

72. Малик Н.А., Овсянников А.А. Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С.7–10.
73. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 262 с.
74. Маневич Т.М., Малик Н.А., Маневич А.Г., Овсянников А.А. Пирокластика извержения вулкана Карымский в 2005–2011 гг. // Материалы региональной конференции «Вулканализм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 – 30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 61–65.
75. Манько Ю.И., Ворошилов В.П. Еловые леса Камчатки. М.: Наука, 1978.
76. Манько Ю.И., Сидельников А.Н. Влияние вулканализма на растительность. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989.
77. Мархинин Е.К. Роль вулканализма в формировании земной коры.– М.: Наука, 1967.
78. Мархинин Е.К. Вулканализм. М.: Недра, 1985. 288 с.
79. Мархинин Е.К., Аникеев Ю.А., Гранник В.М., Грабков В.К., Абдурахманов И.А., Васильев Б.И., Долганова П.С., Леонов Н.Н., Шутова Г.С., Земцов А.Н., Тронь А.А., Трухин Ю.П., Шувалов Р.А. Извержение вулкана Тятя на Курильских островах в июле 1973 г. // Геология и геофизика. 1974. № 10. С. 20–32.
80. Мархинин Е.К., Токарев П.И., Пугач В.Б., Дубик Ю.М. Извержение вулкана Безымянного весной 1961 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1963. № 34. С. 12–35.
81. Махмудов Е.Р., Фирстов П.П., Кожевникова Т.Ю. Сейсмические эффекты, сопровождающие извержения вулкана Безымянного (Камчатка) // Материалы 5-ой Сахалинской школы молодых ученых: Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск, 8–11 июня, 2010. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2011. С. 178–185.
82. Мелекесцев И.В. Сильные вулканические пеплопады в районе г. Петропавловска-Камчатского // Вопросы географии Камчатки. 1989. № 10. С. 101–107.
83. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926–1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3–23.
84. Мелекесцев И.В., Карташева Е.В., Кирсанова Т.П., Кузьмина А.А. Загрязненная свежевыпавшей тефвой вода как фактор природной опасности (на примере извержения

- вулкана Корякский, Камчатка, в 2008–2009 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 19–32.
85. Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Волынец О.Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) – будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3–32.
86. Мельников Д.В., Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Извержение 2010–2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геологогеоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 87–101.
87. Меняйлов И.А. Зависимость состава вулканических газов от состояния вулканической активности и геохимический прогноз извержения // Бюллетень вулканологических станций. 1976. № 52. С. 42–48.
88. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Вергасова Л.П., Гусева Р.В., Шапарь В.Н., Рожков А.М. Химизм и металлоносность вулканических газов и продуктов их реакций на Новых Толбачинских вулканах в 1975 г. // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 117–125.
89. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности экскалиаций Большого Трещинного Толбачинского Извержения. М.: Наука, 1980.
90. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н., Литасова С.Н. Водные вытяжки из пеплов Новых Толбачинских вулканов // Бюллетень вулканологических станций. 1979. № 56. С. 149–161.
91. Моисеенко К.Б., Малик Н.А. Оценка суммарной массы выбросов вулканического пепла с использованием моделей атмосферного переноса // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 35–55.
92. Моисеенко К.Б., Малик Н.А. Реконструкция параметров пеплового выброса на вулкане Безымянный в ходе извержения 24.12.2006 г. с использованием мезомасштабной модели атмосферного переноса пепловых частиц // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 658–672.
93. Моисеенко К.Б., Малик Н.А. Численное решение обратной задачи восстановления суммарной изверженной массы вулканического пепла и ее распределения по высотам в эруптивном облаке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 1. Вып. 25. С. 79–86.
94. Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Андреев В.И., Иванов В.В., Карташева Л.А., Марков И.А. Вулканическая

деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38–70.

95. Научно-технический отчет «Оценка влияния на загрязнение территории г. Петропавловска-Камчатского тяжелыми металлами из промышленных и вулканических источников (эколого-геохимические исследования)» (х/д №12 с Администрацией Камчатской области от 8 апреля 1993 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 1994.

96. Научно-технический отчет «Разработка метода прогноза извержений вулканов Камчатки по аэрозольному предвестнику» (х/д № 4-94 с Администрацией Камчатской области от 2 марта 1994 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 1994.

97. *Овсянников А.А. Малик Н.А.* Тефра извержения вулкана Кизимен в декабре 2010 г.–феврале 2011 г. //Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканализм и связанные с ним процессы», 30 марта – 1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 57–61.

98. *Овсянников А.А., Маневич А.Г.* Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 7–9.

99. *Овсянников А.А., Муравьев Я.Д.* Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 3–20.

100. *Озеров А.Ю., Аристин А.А., Кайл Ф. и др.* Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 614–635.

101. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Санкт-Петербург. Издательство ВСЕГЕИ. 2008. 200 с.

102. *Пийт Б.И.* Вулкан Кизимен // Бюллетень вулканологических станций на Камчатке. 1946. № 13. С. 22–32.

103. *Пономарева В.В.* Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тефры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений: автореф. дис. ... д. г. н. Москва, 2010. 50 с.

104. *Прокчева В.Г., Усачев В.Ф.* Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 176 с.

105. Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П. и др. Активизация вулкана Алайд (Курильские острова) в 2012 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 7–10.
106. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нуждаев И.А. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 13–27.
107. Самойленко С.Б., Карпов Г.А. Анализ условий накопления вулканических пеплов в бассейне озера Карымского // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 28–31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 100–107.
108. Свирид И. Ю., Шевченко А. В., Двигало В. Н. Морфология кратера вулкана Безымянный по данным аэрофотограмметрических наблюдений 2006 г. // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога 28–31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский: Издательство ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 95–100.
109. Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными методами в 2007 году // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: Издательство ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 254–263.
110. Серафимова Е.К., Флеров Г.Б., Невзоров А.Н. Состав водорастворимого комплекса базальтовых лав Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 25–32.
111. Скрипко К.А. К оценке роли гравитационной дифференциации летучих при движении пирокластических потоков // Бюллетень вулканологических станций. 1975. № 51. С. 64–73.
112. Соколов И.А. Вулканизм и почвообразование. М.: Наука, 1973. 224 с.
113. Товарова И.И. О выносе водорастворимых веществ из пирокластики вулкана Безымянного // Геохимия. 1958. № 7. С. 686–688.
114. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Богоявленская Г.Е., Кононкова Н.Н. Андезит-дацит-риолитовые расплавы при кристаллизации вкрапленников андезитов вулкана Безымянного, Камчатка // Геохимия. 1999. № 1. С. 14–24.
115. Транбенкова А.Г., Муравьев Я.Д. Влияние вулканической деятельности на химический состав снежного покрова в районе вулканов Мутновский и Горелый

- (Камчатка) // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во «Наука для Камчатки», 2003 г. С. 111–116.
116. Трубников Б.А., Адамчук Ю.В. Сопоставление спектра масс шлакопепловых выбросов вулканов со спектром масс метеорных частиц // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 96–99.
117. Федотов С.А. Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28.
118. Федотов С.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А. и др. Извержения Карымского вулкана в 1998–2000 гг., связанные с ними сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы, их воздействие на окружающую среду // В сборнике «Катастрофические процессы и их влияние на природную среду». Вулканизм. Том 1. Москва. 2002. С. 117–160.
119. Фирстов П.П. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4–5. С. 33–47.
120. Фирстов П.П., Махмудов Е.Р. Оценка количества пепла, выбрасываемого в атмосферу при сильных эксплозивных извержениях андезитовых вулканов на основании волновых возмущений в атмосфере // Труды третьей научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 159–163.
121. Флеров Г.Б., Иванов Б.В., Андреев В.Н. и др. Вещественный состав продуктов извержения вулкана Алайд в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 28–43.
122. Хренов А.П., Дубик Ю.М., Иванов Б.В. и др. Эruptивная деятельность вулкана Карымский за 10 лет (1970–1989 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 29–48.
123. Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–19.
- 124. Шевченко А.В., Двигало В.Н.** Морфология внутрикратерного конуса вулкана Безымянный в 2015 г. по данным дешифрирования стереоснимков // Материалы XIX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы»,

посвящённой Дню вулканолога, 29-30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 152–157.

125. Широков В.А. Оценка массы и объема тефры при вулканических извержениях // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 24–34.
126. Allard P., Burton M., Murel F. Spectroscopic evidence for a lava fountain driven by previously accumulated magmatic gas // Nature. 2005. V. 433. P. 407–410.
127. Armienta M.A., Cruz-Reyna S.De, Morton O., Cruz O. & Ceniceros N. Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three volcano eruptions from Popocatepetl // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2002. V. 113. № 1–2. P. 61–80. doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00251-7
128. Ayris P.M., Delmelle P., Cimarelli C., Maters E.C., Suzuki Y.J., Dingwell D.B. HCl uptake by volcanic ash in the high temperature eruption plume: mechanistic insights // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 144. P. 188–201. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2014.08.028>
129. Ayris P.M., Lee A.F., Wilson K. et al. SO₂ sequestration in large volcanic eruptions: High-temperature scavenging by tephra // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. V. 110. P. 58–69.
130. Bagnato E, Aiuppa A., Andronico D., Cristaldi A., Liotta M., Brusca L. and Miraglia L. Leachate analyses of volcanic ashes from Stromboli volcano: A proxy for the volcanic gas plume composition? // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. D17204. Doi:10.1029/2010JD015512.
131. Bagnato E, Aiuppa A., Bertagnini A., Bonadonna C., Cioni R., Pistolesi M., Pedone M., Hoskuldsson A. Reply to the “Comment by Delmelle et al. (2013) on “Scavenging of sulfur, halogens and trace metals by volcanic ash: The 2010 Eyjafjallajo“kull eruption” by Bagnato et al. (2013)” // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 127. P. 385–389.
132. Bagnato E., Aiuppa A., Bertagnini A., Bonadonna C., Cioni R., Pistolesi M., Pedone M., Hoskuldsson A. Scavenging of sulphur, halogens and trace metals by volcanic ash: the 2010 Eyjafjallajo“kull eruption // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. V. 103. P. 138–160.
133. Bonadonna C., Houghton B.F. Total grainsize distribution and volume of tephra-fall deposits // Bulletin of Volcanology. 2005. V. 67. P. 441–456.
134. Bonadonna C., Mayberry G.C., Calder E.S. et al. Tephra fallout in the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. In: Druitt T.H., Kokelaar B.P. (eds) The Eruption of

Soufriere Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999. Geological Society, London, Memoirs, 21. 2002. P. 483–516.

135. *Bonadonna C., Phillips J.C.* Sedimentation from strong volcanic plumes // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108 (B7). 2340. doi:10.1029/2002JB002034.
136. *Bonadonna C., Costa A.* Estimating the volume of tephra deposits: A new simple strategy // Geology. 2012. doi: 10.1130/G32769.1
137. *Bonasia R., Macedonio G., Costa A. et al.* Numerical inversion and analysis of tephra fallout deposits from the 472 AD sub-Plinian eruption at Vesuvius (Italy) through a new best-fit procedure // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2009. V. 189. P. 238–246.
138. *Carter A.J., Girina O.A., Ramsey M.S., Demyanchuk Y.V.* ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezymianny Volcano, Russia // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 2569–2577.
139. *Casadevall T.J.* The 1989/1990 eruption of Redoubt Volcano Alaska: Impacts on aircraft operations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 62. P. 301–316. doi:10.1016/0377-0273(94)90038-8.
140. *Colucci S., Palladino D.M., Mulukutla G.K., Prousevitch A.A.* 3-D reconstruction of ash vesicularity: Insights into the origin of ash-rich explosive eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 255. P. 98–107.
141. *Darteville S., Ernst G.G.J., Stix J., Bernard A.* Origin of the Mount Pinatubo climactic eruption cloud: Implications for volcanic hazards and atmospheric impacts // Geology. 2002. V. 30. № 7. P. 663–666.
142. *Delmelle P., Ayris P.M., Maters E.C.* Comment on “Scavenging of sulfur, halogens and trace metals by volcanic ash: The 2010 Eyjafjallajo‘kull eruption” by Bagnato et al. (2013) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 127. P. 381–384.
143. *Delmelle P., Villeras F., Pelletier M.* Surface area, porosity and water adsorption properties of fine volcanic ash particles // Bulletin of Volcanology. 2005. V. 67. № 2. P. 160–169.
144. *Dvigalo V., Shevchenko A., Svirid I.* Photogrammetric survey in volcanology: a case study for Kamchatka active volcanoes / Nemeth K. (Ed.). Updates in volcanology – From volcano modelling to volcano geology. Rijeka, Croatia, InTech, 2016. P. 55–79.
145. *Eaton G. P.* Volcanic ash deposits as a guide to atmospheric circulation in the geologic past // Journal of Geophysical Research. 1963. V. 68. № 2. P. 521–528.

146. Encyclopedia of volcanoes / Eds. Sigurdsson H. et al. Elsevier, 2000.
147. Encyclopedia of volcanoes / Eds. Sigurdsson H. et al. Elsevier, 2015.
148. Evans, J.R., Huntoon J.E., Rose W.I. et al. Particle sizes of andesitic ash fallout from vertical eruptions and co-pyroclastic flow clouds, Volcán de Colima, Mexico // Geology. 2009. V. 37 (10). P. 935–938.
149. Fierstein J., Nathenson M. Another look at the calculation of fallout tephra volumes // Bulletin of Volcanology. 1992. V. 54 (2). P. 156–167.
150. Froggatt P.C. Review of methods estimating rhyolitic tephra volumes; applications to the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1982. V. 14. P. 301–318.
151. Galle B., Johansson M., Rivera C. et al. Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) – A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JD011823
152. Girina O.A. Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22–41.
153. Global Volcanism Program, 2013. Volcanoes of the World, v. 4.7.4. Venzke, E. (ed.). Smithsonian Institution. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>. (Дата обращения: 13.11.2018).
154. Heiken G., Wohletz K. Volcanic ash. London: Univ. of California Press, 1985.
155. Hillman E.S., Horwell C.J., Densmore A.L., et al. Sakurajima volcano: a physico-chemical study of the health consequences of long-term exposure to volcanic ash // Bulletin of Volcanology. 2012. V. 74. P. 913–930.
156. Horwell C.J., Sparks R.S.J., Brewer T.S., Llewellyn E.W., Williamson B.J. Characterization of respirable volcanic ash from Soufriere Hills Volcano, Montserrat, with implication for human health hazards // Bulletin of Volcanology. 2003. V. 65. № 5. P. 346–362.
157. Jaffe D. A., Cerundolo B., Kelley J. The influence of Redoubt Volcano emissions on snow chemistry // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 62. P. 359–367.
158. Kaminski E., Jaupart C. The size distribution of pyroclasts and the fragmentation sequence in explosive volcanic eruptions // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103 (B12). P. 29759–29779.

159. *Lacroix A.* Les mineraux des fumerolles de l'eruption du Vesuve en avril 1906 // Bulletin de la Societe Francaise de Mineralogie. 1907. V. 28. P. 219–266.
160. *Le Guern F., Faivre-Pierret R.X., Garrec J.P.* Atmospheric contribution of volcanic sulfur vapor and its influence on the surrounding vegetation // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1988. V. 35. P. 173–178.
161. *Legros F.* Minimum volume of tephra fallout deposit estimated from a single isopach // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 96. P. 25–32.
162. *Mastin L.G., Guffanti M., Servranckx R., Webley P., Barsotti S., Dean K., Durant A., Ewert J.W., Neri A., Rose W.I., Schneider D., Siebert L., Stunder B., Swanson G., Tupper A., Volentik A., Waythomas C.F.* A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash–cloud transport and dispersion during eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2009. V. 186. № 1–2. P. 10–21.
163. *Miyaji N., Sumita M., Yoshida M. et al.* Tephra-stratigraphical study of the 1988–1989 eruptions of Tokachi-dake Volcano, Central Hokkaido // Bulletin of Volcanological Society of Japan. 1990. V. 35. № 2. P. 131–145.
164. *Moiseenko K.B., Malik N.A.* Estimates of total ash content from 2006 and 2009 explosion events at Bezymianny volcano with use of a regional atmospheric modeling system // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 270. P. 53–75.
165. *Newhall C. A., Self S.* The volcanic explosiviry index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // Journal of Geophysical Research. 1982. V. 87. P. 1231–1238.
166. *Nogami K., Hirabayashi J., Ohba T., Ossaka J., Yamamoto M., Akagi S., Ozawa T., and Yoshida M.* Temporal variations in the constituents of volcanic ash and adherent water-soluble components in the Unzen Fugendake eruption during 1990–1991 // Earth Planets Space. 2001. V. 53. P. 723–730.
167. *Oskarsson N.* The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1980. V. 8. P. 251–266.
168. *Pouget S., Bursik M., Webley P., et al.* Estimation of eruption source parameters from umbrella cloud or downwind plume growth rate // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 258. P. 100–112.

169. *Pyle D.M.* The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits // *Bulletin of Volcanology*. 1989. V. 51. P. 1–15.
170. *Rose W.I.* Scavenging of volcanic aerosol by ash: atmospheric and volcanologic implications // *Geology*. 1977. № 5. P. 621–624.
171. *Rose W.I., Durant A.J.* Fine ash content of explosive eruptions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2009. V. 186. P. 32–39.
172. *Scollo S., Prestifilippo M., Coltelli M., et al.* A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2011. V. 200. P. 129–142.
173. *Shevchenko A.V., Mania R., Walter T.R., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu.* A 40-year photogrammetric analysis reveals changing eruption style and dome to cone transition at Bezymianny volcano, Kamchatka // Proceedings of the 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26. 2018. P. 210–212.
174. *Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Y.* Airborne photo-grammetry and geomorphological analysis of the 2001–2012 exogenous dome growth at Molodoy Shiveluch Volcano, Kamchatka // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 304. P. 94–107.
175. *Stefansson K., Sigurjonsson J.* Temporary increase in fluorine content of water following the eruption. In: *The eruption of Hekla 1947–1948*. V. 3. Soc. Scientiarum Islandica, Reykjavik. 1957. P. 1–13.
176. *Stoiber R.E., Williams S.N., Malinconoco L.L.* Mt. St. Hellens, Washington, 1980 volcanic eruption: magmatic gas component during the first 16 days // *Science*. 1980. V. 208. P. 1258–1259.
177. *Stoiber R.E., Williams S.N., Malinconico L.L. et al.* Mt. St. Hellens: evidence of increasing magmatic component // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1981. V. 11. P. 203–212.
178. *Taylor P.S., Stoiber R.E.* Soluble material on ash from active central American Volcanoes // *Bulletin of Geological Society of America*. 1973. V. 84. P. 1031–1042.
179. *Thorarinsson S.* The eruption of Hekla, 1947-48II, 3. The tephra-fall from Hekla, March 29th, 1947 // *Visindafélag Íslendinga*. 1954. P. 1–3.

180. *Thorarinsson S., Sigvaldason G.E.* The Hekla eruption of 1970 // Bulletin of volcanology. 1972. V. 36. P. 269–288.
181. *Varekamp J.C., Luhr J.F., Prestegard K.L.* The 1982 eruption of El Chichon Volcano (Chiapas, Mexico): character of the eruptions, ash-fall deposits, and gasphase // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1984. V. 23. P. 39–68.
182. *Webley P.W., Dehn J., Lovick J., et al.* Near Real Time Volcanic Ash Cloud Detection: Experiences from the Alaska Volcano Observatory. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. Special Issue on Volcanic Ash Clouds. 2009. V. 186. P. 80–91.
183. *Wen S., Rose W.I.* Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5 // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99 (D3). P. 5421–5431.
184. *Witham C.S., Oppenheimer C., Horwell C.J.* Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2005. V. 141. P. 299–326.
185. *Zelenski M.E., Malik N.A., Taran Y.A.* Emissions of trace elements during the 2012–2013 effusive eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka: enrichment factors, partition coefficients and aerosol contribution // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 285. P. 136–149.

Приложение 1. Пробы пепла извержения Безымянного вулкана 24.12.2006 г. и их характеристики

№ пробы	L, км	l, км	m, г/м ²	C, мг/ 100 г	Содержание фракции (мкм), в вес. %														
					500 - 1000	250 - 500	125 - 250	71 (63)*- 125	56 -71 (63)*	<56	31.3 -56	15.6 - 31.3	7.8 - 15.6	4 - 7.8	2 - 4	1 - 2	0.5 - 1	<0.5	
Б-54/3-7	68.1	10	242			0.18	6.06	24.6	7.05	62.1									
Б-55-07	56.2	9	805	452		0.32	15.8	19.1	5.60	59.2									
Б-930	23	-	148		0.50	0.66	6.61	25.7*	4.00*	63.0	24.4	20.0	6.97	4.38	3.36	2.5	1.12	0.25	
Б-931	26.8		32																
Б-1-06	40.1		42	368															
Б-2-06	36.6		1513																
Б-3-06	41	2	1892	198		6.26	27.7	11.4	3.71	51.0									
Б-4-06	39.9	0	2561			5.85	26.9	14.1*	1.45*	51.7	12.5	15.1	8.12	5.30	5.24	3.52	1.45	0.47	
Б-5-06	42.1		690																
Б-6-06	41.6	5	1143			4.49	28.4	16.6*	1.59*	48.9	12.0	13.7	7.22	5.26	4.64	3.72	1.80	0.56	
Б-Кл-07	41.6		1002																

Примечание. * - для проб, проанализированных с использованием лазерного анализатора, рассчитаны фракции в соответствии с логарифмической шкалой, т.е. используется размер 63 мкм, а для ситового гранулометрического анализа пеплов этого извержения применялось сито с размером ячейки 71 мкм. L – расстояние от вулкана, l – расстояние от оси пеплопада, m – масса пепла, выпавшего на единицу площади в результате пеплопада, C (мг/100 г) - содержание водорастворимых веществ (SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) в 100 г пепла.

Приложение 2. Пробы пепла вулкана Безымянный, изверженного 17 декабря 2009 г., и их характеристики

№ пробы	L, км	l, км	m, г/м ²	C, мг/100 г	Содержание фракции (мкм), вес. %														
					1000-2000	500-1000	250-500	125-250	63-125	56-63	<56	31.3-56	15.6-31.3	7.8-15.6	4-7.8	2-4	1-2	0.5-1	<0.5
Б-146-9	46.3	5	369	250		1.50	13.5	20.8	18.0	2.21	44.0	12.3	13.3	6.6	4.9	3.58	2.37	0.95	0.16
Б-148-9	41.4	5	372	206		2.17	24.9	12.4	14.0	2.56	43.9								
Б-149-9	42.2		40																
Б-Коз1-9	46.2		420																
Б-Коз2-9	45.9	1	781			0.94	22.3	14.8	13.4	2.32	46.2								
Б-1-09	56.7		46																
Б-2-09	50.8		108																
Б-3-09	47.4		248																
Б-4-09	44.2		604																
Б-5-09	41.7		604																
Б-6-09	41.1		76																
Б-160-9	46.9	6.7	425	279															
Б-161-9	44.6	2	553	195	0.037	3.69	20.6	21.4	16.1	1.99	36.2	10.2	10.8	5.38	4.00	2.96	1.92	0.78	0.13
Б-162-9	41.4	3.3	586	174															
Б-7-09	39	0	963	153	0.090	3.81	15.6	15.4	15.9	2.72	46.5	12.1	13.7	7.23	5.47	4.10	2.68	1.09	0.18
Б-8-09	39.8		786	132															
Б-9-09	41.3	1.5	678	132															
Б-10-09	43	2	611	138	0.017	2.09	17.4	19.4	15.8	2.65	42.7								
Б-11-09	26	4.5		184	7.12*	5.03	9.66	12.8	18.4	3.65	43.3								
Б-12-09	28.8		351	98															
Б-13-09	30.3	3	936	114	3.19	3.93	6.88	13.3	20.1	2.42	50.1	15.9	15.3	7.03	4.88	3.58	2.29	0.93	0.16
Б-14-09	30.8		980	114															
Б-15-09	34.1	0	1191	115	0.69	4.89	16.2	13.4	15.7	2.62	46.5								
Б-16-09	37.8		919																
Б-17-09	40.8		638																

Примечание. * - в пробе присутствуют также частицы размером >2000 мкм в небольшом количестве (0.53%). Условные обозначения см. Приложение 1.

Приложение 3. Пробы пепла вулкана Безымянnyй извержения 9 марта 2012 г. и их характеристики

№ пробы	L, км	m, г/м ²	C, мг /100 г	Содержание фракции (мкм), вес. %															
				2000– 4000	1000– 2000	500– 1000	250– 500	125– 250	63– 125	56– 63	<56	31.3– 56	15.6– 31.3	7.8– 15.6	4-7.8	2-4	1-2	0.5-1	< 0.5
Б-Апах-12	15.7	898	148		0.93	5.99	21.5	11.3	12.5	1.72	46.0	9.85	12.4	7.95	6.6	4.83	3.05	1.23	0.2
Б-277-12	2.6	1145																	
Б-279-12	2.7	168	356																
Б-77-12	15	710	220																
Б-78-12	13.3	688																	
Б-79-13	11.5	979		0.17	2.08	6.83	26.7	10.0	9.38	1.20	43.6	9.25	11.6	7.59	6.35	4.65	2.88	1.14	0.18
Б-80-12	11.2	292	334		0.56	2.91	15.6	18.2	18.8	1.76	42.2	11.6	12.2	6.57	4.87	3.61	2.32	0.94	0.16
Б-81-12	10.2	84	494																
Б-83-12	2.9	272			0.22	2.34	12.0	13.5	18.5	2.35	51.0	15.9	15.7	7.13	5	3.72	2.46	1.02	0.18
Б-84-12	4.5	55																	
Б-85-12	8.3	12																	
Б-86-12	9.5	16																	
Б-87-12	17	279																	
Б-88-12	19.7	43																	
Б-94-12	14.8	182	256	0.49	7.72	13.5	13.1	5.91	13.3	2.10	43.8	10.2	11.6	7.33	6.05	4.53	2.84	1.13	0.19
Б-УКам-12	125	10																	

Примечание. Условные обозначения как в Приложении 1.

Приложение 4. Продукты извержений вулканов Камчатки в 2006–2013 гг.

	2006		2007			2008	2009		2010	2011	2012		2013	Σ , млн т
Безымянный	9.05	24.12	12.05	14-15.10	5.11	19.08	17.12		31.05	13.04	8.03	1.09	-	T~35 ПП~100 Л=57
	<i>T~13 млн т, ПП=0.005 км³=7.8 млн т, Л=0.00085 км³=1.9 млн т</i>	T=7 млн т, ПП~0.006- 0.008 км³=9- 13 млн т, Л~0.001 км³=2.2 млн т	<i>T~0.8 млн т, ПП=0.004 км³=6.2 млн т, Л</i>	<i>T~2 млн т, ПП=0.005 км³=7.8 млн т, Л</i>	<i>ПП=0.001 км³=1.6 млн т</i>	<i>T~1.2 млн т, ПП=0.003 км³=4.7 млн т, Л</i>	T=4.5 млн т, ПП=0.002 км³=3.1 млн т, Л=0.0039 км³=8.6 млн т	<i>T~2 млн т, ПП=0.023 км³=35.7 млн т, Л=0.0043 км³=9.5 млн т</i>	T=0.8 млн т, ПП=0.01 км³=15.5 млн т, Л	T=0.5 млн т, ПП, Л	<i>T~3.5 млн т, ПП, Л</i>			
Карымский	T=3.8 млн т		T=2.5 млн т			T=0.6 млн т	<i>T~1-2 млн т</i>		<i>T~1-2 млн т</i>	T=1.5 млн т	<i>T~1-2 млн т</i>		<i>T~1-2 млн т</i>	T~14.4
Шивелуч	4.12 -		T=8.5 млн. т, ПП, Э			<i>T~11 млн т, ПП, Э</i>	<i>T~11 млн т, ПП, Э</i>		T~15 млн т +~11 млн т, ПП=0.02 км³, Э=0.28 км³	<i>T~11 млн т, ПП, Э</i>	<i>T~11 млн т, Э</i>		<i>T~11 млн т, ПП, Э</i>	T~90 ПП~750 Э=720
	T=0.7 млн. т, ПП, Э								<i>11.11 -</i>				<i>- окт.</i>	
Кизимен	-		-			-	-		T=10 млн т, ПП=0.28 км³, Л=0.195 км³		<i>Л, Э</i>		<i>Э</i>	T=10, ПП=420 Л=450
ТТИ-50	-		-			-	-		-	-	<i>27.11 -</i>		<i>- сент.</i>	T=10 П~65 Л=1190
											T=10 млн т, П≤0.1 км³≤65 млн т, Л=0.54 км³			
Ключевской*	-		февраль–июль			октябрь –	<i>- янв.</i>	<i>сент. –</i>	<i>– ноябрь</i>	-	<i>–</i>		<i>авг.– нояб.</i>	<i>T≤4</i>
			Т, Л			T, Л	T, Л		T, Л	-	<i>–</i>		<i>Т, Л</i>	
Жупановский	-		-			-	-		-	-	<i>–</i>		<i>21- 24.10</i>	T=0.1 млн т
						20.12 -	<i>- 27.08</i>		-	-	<i>–</i>			
Корякский	-		-				T=0.0005-0.001 км³		-	-	<i>–</i>		<i>-</i>	T=0.9±0.3

Примечание. Жирным шрифтом выделены оценки автора, курсивом – оценки полученные автором, являющиеся приблизительными, из-за недостатка данных, остальные взяты из литературы.

Т – тефра, ПП – пирокластические потоки, Л – лавовые потоки, П (только для ТТИ-50) – пирокластика (шлаки) конусов и отложившаяся в пределах 1.5 км от эруптивного центра, Э – продукты экструзивной деятельности (раскаленные лавины, обрушения). Указана масса (млн т) или объем (км³) отложений, как в источнике. Для сравнения разных типов отложений объемы переводятся в массу: $\rho(\text{ПП})=1.6-1.8 \text{ т/м}^3$ [Гирина, 1998] и $\rho(\text{Л})=2.2 \text{ т/м}^3$ [Действующие..., 1991; Жаринов, Демянчук, 2011], для Толбачика $\rho(\text{П})=0.65 \text{ т/м}^3$ (по измерениям автора).

Для вулкана Безымянного объемы лавы даны по [Свирид и др., 2007; Двигало и др., 2011; Шевченко, Двигало, 2015; Shevchenko et al., 2018], отложений ПП по [Гирина и др., 2012a; Girina, 2013].

Для вулкана Карымский масса тефры в 2006 г. по [устное сообщение Т.М. Жиделевой, 2007], в 2009–2010 гг. по [Маневич и др., 2012].

Для вулкана Шивелуч 2010 г. по [Жаринов, Демянчук, 2013], приблизительные расчеты для остальных лет кроме 2006–2007 гг. проведены на основании данных [Shevchenko et al., 2015; Горбач и др., 2016].

Для вулкана Кизимен объемы и массы отложений ПП и лавы по [Двигало и др., 2013].

Для ТТИ-50 объемы пирокластики и лавы по [Двигало и др., 2017].

Для 4-х извержений Ключевского вулкана дана приблизительная оценка массы пепла на основании имеющегося ограниченного набора проб и оценок для извержений 2015, 2016 гг. [Жаринов и др., 2017].

Для вулкана Жупановский масса тефры начальной стадии активизации в октябре 2013 г. по [Горбач и др., 2018].

Для вулкана Корякский объем и масса тефры по [Мелекесцев и др., 2011].

Приложение 5. Пробы пепла извержения вулкана Кизимен в 2010-2011 гг., и их характеристики

Дата	№ пробы	L, км	m, г/м ²	C, мг / 100 г	УПП, м ² /кг	Содержание фракции (мкм), вес. %																
						1000-2000	500-1000	250-500	125-250	63-125	56-63	<56	31.3-63	15.6-31.3	7.8-15.6	4-7.8	2-4	1-2	0.5-1	<0.5		
13.12.2010	093/	97	100	180	137			1.7	30.8	30.2		33.2	13.9		10.5	4.89	3.36	2.36	1.51	0.65	0.14	
	094/	95	73	265	171		0.990	27.7	5.43	16.0		44.8	18.9		14.4	6.27	4.25	3.01	2	0.89	0.19	
	97/3	59	206		218			0.26	2.36	22.6		64.0	32.4		21.8	8.17	5.1	3.53	2.45	1.11	0.25	
	123	100	88		169		0.046	0.91	17.24	32.8	3.74	45.6	18.7		14.6	6.29	4.19	2.67	1.86	0.83	0.19	
28.12.2010	87/5	23	514	1334	189		0.810	9.24	15.1	21.6		46.7	18.9		15.3	7.08	5.03	3.53	2.29	0.93	0.18	
	102/2	92	65	1529	219			0.16	1.26	30.8		64.8	25.7		21.1	8.05	5.31	3.76	2.57	1.07	0.24	
01.01.2011	дол	82	343	574	177		0.090	0.94		2.5	11.6		43.5	32.7		27.5	9.92	6.07	4.41	2.94	1.15	0.22
	61	240	8		267				0.71	12.4		70.1	35.9		24.5	10.0	6.72	4.8	3.25	1.36	0.3	
07.01.2011	87/4	23	321	1077	271			0.18	1.71	21.3		68.3	27.7		21.9	9.69	5.26	3.55	1.41	0.24		
?	87/3	23	148	765			0.07	1.97	2.04	19.6	10.9	65.4										
?	87/2	23	107	590			0.20	6.57	4.35	15.4	8.3	65.2										
13.01.2011	96	51.9	200	856	213		0.097	15.6	11.14	13.3	4.41	55.4	19.2		18.4	8.34	5.95	4.06	2.47	1.05	0.2	
	98(1)	74.2	158		238			2.1	24.0	12.3	2.8	58.8	18.4		18.2	9.14	6.67	4.7	2.9	1.21	0.23	
	119	137	120	1195	265			0.05	0.5	23.3	6.9	69.3	25.7		23.1	10.11	7.16	4.94	3.17	1.35	0.25	
	99/1	70.7	119		269			0.03	4.0	23.4	4.3	68.3	16.4		24.7	11.0	7.83	6.24	4.34	1.53	0.28	
	98/1	68.8	116		225		0.035	11.8	12.5	13.7	3.5	58.5	18.9		18.7	8.94	6.75	4.24	2.67	1.16	0.24	
	125/1	83.9	113		203		0.070	9.3	20.8	13.6	2.9	53.4	17.5		17.5	8.26	5.82	3.92	2.41	0.97	0.19	
	120	134	110		225		0.016	0.12	4.04	28.5	7.65	59.7	27.5		18.5	7.58	5.59	4.02	2.77	1.16	0.22	
	95	51.9	87		253			2.06	9.33	19.8	4.76	64.0	21.3		20.8	9.84	7.1	4.84	3.03	1.29	0.23	
	122/1	113	55		222		0.076	0.65	22.01	13.5	1.82	61.6	20.3		20.0	9.05	6.04	4.01	2.68	1.08	0.21	
	97/1	59	45		273		0.270	6.65	7.24	13	4.04	68.8	20.2		22.6	10.8	8.25	5.5	3.58	1.28	0.18	
	118 (Эссо)	136	42		262			0.10	0.5	13.6	6.2	79.5	32.3		26.3	10.5	7.1	4.57	3.08	1.29	0.26	
15.01.2011	102/1	92	110	853	209			1.71	12.3	23.5		58.8	21.3		19.2	8.47	5.7	3.98	2.48	0.98	0.18	
Суммарные пробы на начало февраля 2011	Kз-0116	3.8				0.57*	2.4	0.71	6.6	17.0	5.1	50.0										
	Kз-0117	6.9	2473	580		0.24	3.8	1.18	7.0	17.5	5.2	65.1										
	Kз-0119/1	8.8		184			2.1	0.10	10.5	23.6	5.9	57.7										
09.02.2011	0122_	14	386	596	245		0.09	0.94	2.5	11.6		81.1	32.7		27.5	9.92	6.07	4.41	2.94	1.15	0.22	
26.02.2011	130/1	97	14					2.23	0.89	17.7	8.01	71.2										
дек. 2011	пр_3	9	56	194	241			3.43	9.43	15.7		68.5	27.3		21.4	8.66	5.47	4.07	2.88	1.31	0.32	

Примечание. Из 200 проб приведены те, для которых был выполнен гранулометрический анализ. * - проба содержит 17.7 вес. % частиц размером более 2000 мкм. Условные обозначения как в Приложении 1.

Приложение 6. Пробы пепла извержения вулкана Шивелуч в декабре 2006–2007 г., и их характеристики

№ пробы	m, г/м ²	Σ , г/м ²	Примечание	L, км	Азимут, °	С, мг/ 100 г	Содержание фракции (мм), вес. %					
							<0.056	0.056-0.071	0.071-0.125	0.125-0.25	0.25-0.5	0.5-1.0
III-02/1-07	21.9	29		50.7	219							
III-02/2-07	7.00											
III-5/1-07	4.21	12.6	Пос. Ключи	48.8	219							
III-5/2-07	5.63											
III-49-07	2.75											
III-4/1-07	136	959		24.5	279		63.9	10.0	20.8	4.86	0.417	
III-4/2-07	180						71.1	7.44	14.8	6.23	0.372	0.046
III-4/3-07	642					218	2.46	0.29	0.58	1.19	90.4	5.07
III-03/1-07	28.7	44		30.9	299							
III-03/2-07	7.24											
III-03/3-07	7.96											
III-07/1-07	36.1	51	2 верх. слоя	33	305		69.5	13.7	13.4	3.30	0.14	
III-07/2-07	15.0											
III-17-07	13.4		2 верх. слоя	44.6	303							
III-18-07	19.9		2 верх. слоя	41.8	305							
III-6-07	30.1		2 верх. слоя	38.8	307							
III-08/1-07	16.6	49		29.4	292							
III-08/2-07	32.9											
III-09/1-07	61.3	124		22.4	298	296						
III-09/2-07	33.8											
III-09/3-07	28.9											
III-10/1-07	43.0	86	2 верх. слоя	21.5	307							
III-10/2-07	21.8											
III-10/3-07	20.9											
III-11/1-07	34.1	218		19.7	324							
III-11/2-07	50.6											
III-11/3-07	133					109						
III-12/1-07	33.9	128		22.7	318							
III-12/2-07	41.2											
III-12/3-07	52.4											
III-13-07	3.50			23.7	349							

№ пробы	m, г/м ²	Σ , г/м ²	Примечание	L, км	Азимут, °	C, мг/ 100 г	Содержание фракции (мм), вес. %					
							<0.056	0.056-0.071	0.071-0.125	0.125-0.25	0.25-0.5	0.5-1.0
III-15/1-07	12.3	145		20.6	340							
III-15/2-07	133				436							
III-16/1-07	16.4	524		18.8	337							
III-16/2-07	508				138	31.9	3.49		6.23	24.8	32.40	1.15
III-14/1-07	37.8	423		19.3	326							
III-14/2-07	39.8											
III-14/3-07	345				97							
III-30/1-07	3.00			58.6	208							
III-30/2-07	1.50	4.5										
III-31/1-07	21.8	36		53.8	207							
III-31/2-07	14.3											
II-18-07	28.7			47.6	119							
II-17-07	85			40	110							
II-16-07	200			31.9	111							
III--32-07	25.9	250		26.5	122							
II-15-07	220											
III-33/1-07	10.9			17	123							
III-33/2-07	81.3					446	71.1	10.6	14.5	3.33	0.42	
II-19-07	490	640										
II-01-07	61.6					574						
III-34/1-07	7.30			23	156							
III-34/2-07	18.9											
III-34/3-07	138	165					67.5	11.0	17.3	3.94	0.17	
929/1	5.28			47.3	222							
929/2	7.04											
929/4	10.9											
II-11-07	6.30	21	2 верх. слоя	52	225							
II-12-07	14.5						19.0	2.21	6.64	71.6	0.55	
II-2-07	41.2			67.9	237		35.8	6.78	17.3	39.5	0.565	
II-8-07	50.5			75.5	239		43.4	4.09	17.4	35.0	0.204	
II-4-07	56.5			83.6	238							
II-6-07	42.8			91	239		48.7	5.32	32.3	13.5	0.190	
II-13-07	10.6			99.3	238							

№ пробы	m, г/м ²	Σ , г/м ²	Примечание	L, км	Азимут, °	C, мг /100 г	Содержание фракции (мм), вес. %						
							<0.056	0.056-0.071	0.071-0.125	0.125-0.25	0.25-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0
Ш-051/1-07	156	1431		20.7	113								
П-051/2-07	1274												
П-052/1-07	127	1329		15.8	105	396							
П-052/2-07	1202												
Ш-054/1-7	17.71	297		23.8	234								
Ш-054/2-7	125.25		3 слоя			681							
Ш-054/4-7	153.87					225	2.66	1.05	0.743	0.310	67.1	28.1	0.062
Ш-060-07	15449		Каран, снежник	4.2	250								
Ш-093/1-7	15000	25000	снежник	4.7	260		70.7	10.4	10.8	4.74	2.12	0.29	0.89
Ш-093/2-7	10000												

Примечание. Σ – суммарная масса пепла в точке отбора. Условные обозначения как в Приложении 1.

Приложение 7. Химический состав вод ручья Поперечного, мг/л

дата	11.12.11		23.12.11	24.12.11	26.12.11	04.01.12	07.01.12	01.03.12	19.03.12		12.10.13	
место компонент	тропа	100 м от устья	тропа	тропа	тропа	тропа	тропа	тропа	600 м н.у.м.*	тропа	700 м н.у.м.	тропа
pH	6.8	7.1	6.7	6.6	6.7	6.6	6.6	6.9	6.6	7.1	7.8	7.4
HCO ₃ ⁻	131.8	233.1	151.3	131.8	147.7	119.0	125.5	153.7	190.3	128.1	87.8	97.6
Cl ⁻	5.8	26.8	8.6	7.8	7.8	6.4	6.4	8.5	9.9	6.4	0.2	0.2
SO ₄ ²⁻	45.4	66.5	123	108	115	90.1	89.5	161	259	117	200	188
Na ⁺	17.5	28.9	14.8	13.4	14.8	16.7	16.2	22.3	3.8	17.4	30.0	29.1
K ⁺	3.7	4.9	3.8	3.6	3.7	3.8	3.9	3.7	8.9	4.2	4.4	4.7
Ca ²⁺	36.1	26.5	48.1	41.7	41.3	48.1	48.1	72.1	98.4	53.3	54.2	57.3
Mg ²⁺	12.7	28.9	16.2	14.5	16.4	14.3	14.7	19.0	23.0	15.0	15.6	16.4
NH ₄ ⁺	0.4	0.9	0.6	0.6	0.7	<0.1	0.8	<0.1	<0.1	0.0	<0.1	<0.1
Feобщ	<0.1	<0.1	0.7	0.1	2	<0.1	<0.1	0.3	2.1	4.5	1.2	0.9
H ₃ BO ₃	2.4	2.4	1.2	1.2	1.2	2.4	2.1	<0.28	0.0	0.0	<0.28	<0.28
H ₄ SiO ₄ p.	70.9	80.5	82.1	76.3	79.4	71.1	38.4	72.1	92.4	82.8	29.4	41.7
Σ	327	499	450	399	436	372	346	513	693	429	423	436

Примечание. Тропа – место пересечения ручья Поперечного с тропой на Тумрокские источники, * - выходы термальной воды в долине ручья

Приложение 8. Химический состав озер и других поверхностных вод в верховьях ручья Поперечного, мг/л

дата	23.03.12	29.04.12	01.08.12	15.10.12				12.10.13	
место	о3. Подпрудное 2	исток руч. Поперечный, 1230 м	о3. Подпрудное 1	о3. Подпрудное 1	о3. Теплякова	лужа, 1850 м н.у.м.	грязевой поток, 1400 м н.у.м.	о3. Подпрудное 1	о3. Подпрудное 2
pH	6.8	4.1	5	6.6	6.36	4.66	4.53	6.4	6.8
HCO ₃ ⁻	36.6	< 0.05	0.0	6.1	<0.5	6.1	<0.5	7.9	48.8
Cl ⁻	9.9	34.8	9.2	11.5	14.5	9.3	22.4	0.2	0.2
SO ₄ ²⁻	119.0	192.1	48.0	61.8	51.9	14.0	34.1	36.4	8.0
Na ⁺	25.5	4.5	3.4	2.1	2.3	2.2	8.3	2.8	5.6
K ⁺	3.7	2.2	1.1	1.0	1.2	1.9	2.5	0.9	3.0
Ca ²⁺	36.1	84.2	18.0	16.4	15.6	4.2	10.0	8.4	7.5
Mg ²⁺	5.6	2.3	3.6	4.6	2.7	2.4	1.2	2.2	5.3
Fe ³⁺	< 0.05	0.1	н/о	н/о	н/о	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.0
H ₄ SiO ₄ p.	50.5	4.8	14.9	41.9	32.7	2.5	47.7	5.6	25.2
H ₄ SiO ₄ к.	65.6	н/о	20.7	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Σ	353	325	119	145	121	43	126	64	105