

На правах рукописи

Малик Наталия Александровна



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

Специальность
25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Петропавловск-Камчатский, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник ИВиС ДВО РАН
Геннадий Александрович Карпов

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
Деркачев Александр Никитович
(ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток)

кандидат геолого-минералогических наук,
Дегтерев Артем Владимирович
(ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

Защита состоится 20 мая 2019 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.006.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН по адресу: 690022, г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ДВО РАН (адрес тот же) и на сайте <http://fegi.ru>

Отзывы на диссертацию и автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 690022, г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159, Дальневосточный геологический институт, ученому секретарю диссертационного совета Д 005.006.01, e-mail: elena_valpaper@yandex.ru

Автореферат разослан « » марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.006.01
к.г.-м.н.



Е.В. Перевозникова

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 извержения, оценках его воздействия на природные экосистемы и человека, исследованиях атмосферного переноса и осаждения пепла.

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 поверхностью 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; Vagnato 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, P 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 надежной 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 вулканических пеплов и их влияния на состав природных вод в районах активного вулканизма по опубликованным данным.
2. Выбор/разработка методики оценки массы изверженного пепла и её применение к извержениям 2006–13 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 Курильских островов, **предмет исследования** – пеплы их извержений 2006–17 гг.

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 свежевывающего пепла была предоставлена сотрудниками ИВиС ДВО РАН. Наиболее полно изучен материал извержений вулканов Безымянный (2006, 2009 и 2012 гг.), Кизимен (2010–13 гг.), Шивелуч (2006–07, 2010 гг.), Карымский (2007–11 гг.), Толбачик (ТТИ-50, 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 г.). 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 с породами 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 ($\text{кг}/\text{м}^2$), количество его водорастворимых компонентов) могут использоваться для обоснования степени вулканической опасности для населения и объектов хозяйственной деятельности. Полученные данные позволяют оценивать 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 для расчетов общего выноса вулканического материала в окружающую среду.

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

Защищаемые положения.

1. По данным отбора площадных проб пеплов эксплозивных извержений вулканов Безымянный, Шивелуч, Карымский, Кизимен и ТТИ-50 в период 2006–13 гг. установлено, что масса тefры, 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 тefры.

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.%) пылевой 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 исследований докладывались на международных и российских конференциях: ежегодных конференциях, посвященных Дню вулканолога, 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.

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).

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

Структура и объем работы. Работа имеет 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 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. Максимова, 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. Тарану, 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. Тембрелу; 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; А.Б. Белоусову, которым был приобретен лазерный дифракционный анализатор частиц «Analysette22 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, зав. лабораторией вулканогенного рудообразования ИВиС к.г.-м.н. В.М. Округину.

ГЛАВА 1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПЕПЛЫ И ИХ ВОДОРАСТВОРИМЫЙ КОМПЛЕКС (ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ)

В начале главы приводится классификация вулканических продуктов в зависимости от типа извержения и состава пород. Большая по объему и массе часть продуктов современных вулканических извержений представлена пирокластикой [Мархинин, 1967] – рыхлым обломочным материалом, образующимся в результате эксплозий при фрагментации магмы/лавы. Пирокластические отложения подразделяются на 5 генетических типов [Гирина, 1998], среди которых тефра (фрагменты вулканических пород, переносимых воздушными потоками) – наиболее типичный продукт эксплозивных извержений. Наиболее мелкие частицы тефры (<2 мм, вулканический пепел) ввиду малой скорости гравитационного осаждения находятся в атмосфере достаточно долго (до нескольких месяцев, в зависимости от размеров частиц и высоты выброса) и могут распространяться на большие расстояния от эруптивного центра. Поэтому для конкретных извержений большое научное и практическое значение имеет вопрос о массе и гранулометрическом составе тефры, как части общей массы изверженных пород.

В эруптивном облаке во время эксплозивных извержений происходит захват магматических летучих (соединений серы и галогенов) и микрокомпонентов (As, Vg, Cu, Pb и др.) в виде водорастворимых минералов (CaSO_4 , NaCl и др.) на поверхности тефры, которые оседают вместе с ней на земную поверхность. Водорастворимый комплекс пеплов – это эфемерные минералы (соли) на их поверхности, 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.).

Изучение водных вытяжек из пеплов в отечественной вулканологии было начато Л.А. Башариной для извержения вулкана Безымянный 1955–56 гг. [Башарина, 1958]. В течение 50–80-х годов исследования по данной тематике активно развивались. Был изучен водорастворимый комплекс пеплов последующих извержений Безымянного вулкана (1961, 1965 гг.), извержений вулканов Алайд (1972, 1981 гг.), Горелый (1980–81 гг.), Шивелуч (1964, 1994 гг.), Чикурачки (1986 г.), БТТИ 1975–76 гг. Однако, после извержения Авачинского вулкана в 1991 г. [Дрознин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995], т.е. последние 20–25 лет, детальных исследований водорастворимых компонентов пеплов не проводилось.

В зарубежной науке первое упоминание о водорастворимых веществах, адсорбированных на вулканическом пепле, было сделано в работе [Lacroix, 1907]. Более детальное обсуждение и первые предположения об источнике растворимого материала в пеплах Центральноамериканских вулканах были представлены в [Taylor, Stoiber, 1973]. С этого времени проведено много всесторонних исследований водорастворимых компонентов пеплов, включая их происхождение, форму нахождения на поверхности частиц, связь с различными характеристиками извержения, метеоусловиями и свойствами пеплов. Компильтивная работа [Witham et al., 2005], обобщающая литературные материалы по теме вытяжек из вулканического пепла и факторов адсорбции летучих, дает достаточно полное представление о работах зарубежных ученых, посвященных исследуемой проблеме, опубликованных до 2005 г. В настоящее время для многих извержений (Стромболи, Попокатепетль, Эйяфьятлайокудль и др.) опубликованы результаты таких

исследований, проведенных на высоком уровне [Armienta et al., 2002; Vagnato et al., 2011; Vagnato et al., 2013]. Также проводятся экспериментальные работы по изучению процессов адсорбции газов (SO_2 , HCl) на вулканических стеклах разного состава при различных условиях (t° , содержания H_2O и других газов) [Auyis et al., 2013; Auyis et al., 2014]. Несмотря на столь многочисленные и качественные исследования в этой области, нет однозначного мнения по ряду вопросов. Так, если в ранних работах содержание анионов и их отношения считались явными показателями состава эруптивных газов, 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 определения генезиса отдельных элементов в водных вытяжках до настоящего времени весьма противоречивы. Поэтому дальнейшее изучение водорастворимых компонентов пеплов (накопление фактического материала, экспериментальные исследования) имеет важное научное значение. Кроме того, актуальна и практическая сторона этого вопроса – изучение влияния пеплов и их водорастворимых компонентов на природные экосистемы и человека.

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 основу работы положены результаты исследования пеплов, отобранных методом геохимической снегосъемки, который наиболее доступен и результативен в условиях длительного снежного периода (7–9 месяцев), а также при удаленности и труднодоступности действующих вулканов Камчатки. Возможность массового отбора проб пепла по площади пеплопада в условиях ограниченного периода времени позволяет оценить количество твердого и водорастворимого материала, выносимого в окружающую среду как единичными эксплозиями, так и при длительных извержениях вулканов в холодный период года.

Пробы снега с пеплом после таяния фильтровались, талая вода после измерения объема анализировалась, пеплы высушивались, взвешивались, подвергались дальнейшему анализу.

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

2.2. Оценка массы выброшенного пепла. Проведенный анализ опубликованных работ показал, что при невозможности полноценного отбора площадных проб пепла в ближней, средней и дальней зонах от вулкана аппроксимация убывания количества отложенного пепла с расстоянием от центра извержения как экспоненциальной, так и степенной зависимостями дает существенные ошибки в определении изверженной массы (объема) тefры. Установлено, что для надежного подсчета объема экспоненциальная аппроксимирующая зависимость должна иметь 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 завышениям при экстраполяции на ближнюю зону [там же]; по данным [Широков, 1985] степенной показатель также не остается постоянным с расстоянием, что требует привлечения подходов, основанных на интерполяции по отдельным интервалам расстояний.

Автором использовались методы определения массы изверженного 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. Ошибка расчетов оценивается минимум в 30% при расположении точек отбора, позволяющем построить несколько изолиний массы пепла.

Для повышения точности оценок количества пепла, в условиях недостаточного числа отобранных проб, при участии автора была разработана методика оценки массы изверженного пепла на основе специально созданного программно-математического комплекса переноса/осаждения вулканического пепла [Moiseenko, Malik, 2014]. Она позволяет учитывать роль атмосферных процессов, а также восстанавливать суммарный гранулометрический состав и распределение изверженного материала в эруптивной колонне по высоте, выполнить приближенную реконструкцию зоны пеплопада. Проведенные численные эксперименты показали, что оценки массы пепла, получаемые в рамках разработанного подхода, характеризуются устойчивостью относительно вариаций модельных параметров в диапазонах их неопределенностей, и хорошо согласуются с результатами, полученными на основе других методов. Из-за трудоемкости данной методики ее использование в данной работе ограничивается тремя эксплозивными событиями.

2.3. Гранулометрический анализ пирокластики. Гранулометрический анализ пирокластики 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 (56, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000 мкм). Для частиц менее 56 мкм применялся лазерный дифракционный анализатор «Analysette-22 COMPACT» фирмы FRITZSCH GmbH, позволяющий определять распределение частиц по размерам в диапазоне 0.3–300 мкм. Результаты анализа пробы ситовым методом и наиболее мелкой фракции (<56 мкм) методом лазерной дифракции объединялись с помощью программного обеспечения «А-22» к лазерному дифракционному анализатору «Analysette-22 COMPACT». С его использованием также вычислялись гранулометрические характеристики: удельная поверхность частиц (УПП), средний размер, стандартное отклонение.

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

В главе дано описание объектов исследования – вулканов, активных в 2006–13 гг., и их извержений. Кратко описан ход извержений, рассмотрен их геологический эффект, основное внимание уделено изучению продуктов эксплозивной активности. Приведены результаты изучения петрохимического и минералогического состава изверженной пирокластики. По петрохимическому составу изученные образцы относятся к умереннокалиевым породам от андезибазальтов до дацитов (Ключевской, Безымянный, Шивелуч, Кизимен,

Карымский, Жупановский) и к высококалиевым преимущественно трахиандезибазальтам (Толбачик, Алайд).

Изученные извержения вулкана Безымянный 24.12.2006, 17.12.2009 14.04.2011 и 9.03.2012 гг. имеют сходный кратковременный характер, с длительностью эксплозивной стадии от 20 до 120 мин, которая характеризуется взрывом субплинианского типа с последующим формированием пирокластических потоков (ПП). Подобные извержения являются типичными для вулкана Безымянный после 1977 г. и происходят 1-2 раза в год. За 2006–13 гг. произошло 10 таких событий (табл. 1).

Масса изверженного 24 декабря 2006 г. пепла, опробованного в 40 точках (рис. 1), была вычислена с применением ряда методик [Широков, 1985; Fierstein, Nathenson, 1992; Legros, 2000; Bonadonna, Houghton, 2005; Moiseenko, Malik, 2014] и составила от 5.4 до 8.5 млн т, в среднем 7 млн т (табл. 1). Масса тефры извержения 17 декабря 2009 г. была оценена по 25 площадным пробам теми же методами и составила ~4.5 млн т. Масса пепла, выброшенного в результате более слабых и менее опробованных извержений 14 апреля 2011 г. и 9 марта 2012 г., была оценена методами [Legros, 2000] и [Fierstein, Nathenson, 1992] и составила, соответственно, 0.7 ± 0.3 и 0.5 ± 0.2 млн т.

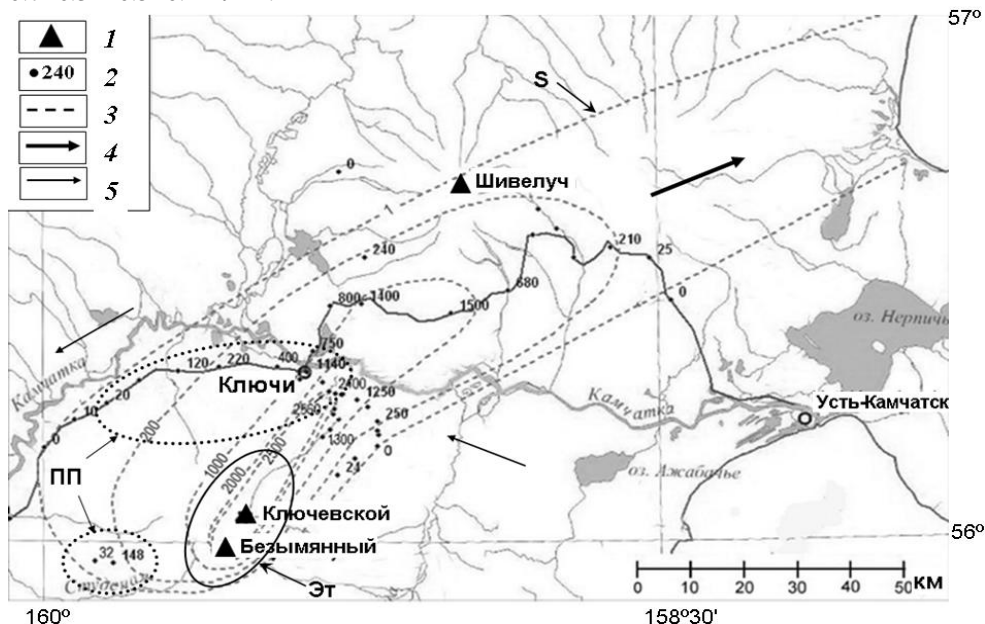


Рис. 1. Схема отложений пепла для извержения вулкана Безымянный 24.12.2006: 1 – действующие вулканы, 2 – точки отбора и массы проб, $г/м^2$, 3 – изолинии массы пепла, $г/м^2$, 4, 5 – направление ветра вблизи тропопавзы и на высотах <1.5 км, соответственно; ПП – зона отложений пепла с высот менее 6 км (модельные расчеты [Моисеенко, Малик, 2015]), S – граница зоны пепловых отложений по спутниковым данным NOAA, Эт – граница эруптивной тучи через 70 мин после начала извержения (снимок TERRA MODIS ch20b 10:30 UTC).

Результаты изучения 4-х извержений, а также плинианской стадии пароксизма 30 марта 1956 г. показали, что количество пепла, выброшенное во время эксплозивной стадии, зависит от высоты эруптивной колонны (рис. 2), возможно, благодаря близкой длительности кульминационных эксплозий вулкана Безымянный. Подобные зависимости уже приводились [Федотов, 1982; Mastin, 2009], при этом показатель степени в большинстве формул был близок к полученному (рис. 2).

Используя выявленную зависимость и высоты эруптивных колонн [Girina, 2013; Гирина и др., 2014] для шести похожих извержений, произошедших в рассматриваемый период (табл. 1), получаем приблизительную массу выброшенного пепла: для 9.05.2006 (12 км) – 13 млн т, 11.05.2007 (5 км) – 0.7 млн т, 14.10.2007 (7 км) – 2 млн т, 19.08.2008 (6 км) – 1.2 млн т, 31.05.2010 (7 км) – 2 млн т, 1.09.2012 (7–9 км) – 2–5 млн т. За исследуемый период 2006–13 гг. вынос тefры составил около 35 млн т или 4.5 млн т в год (табл. 1).

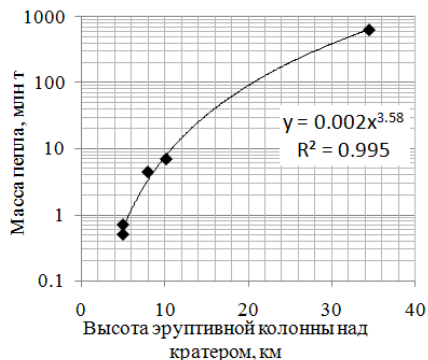


Рис. 2. Зависимость массы изверженного пепла от высоты эруптивной колонны.

Извержение вулкана Кизимен в 2010–13 гг. Начавшаяся в ноябре 2010 г. эксплозивная активность вулкана, в феврале 2011 г. дополнилась излиянием вязкого лавового потока. Интенсивность эксплозивной деятельности при этом несколько снизилась, а в декабре 2011 г. прекратилась. В апреле-мае 2012 г. излияние лавы сократилось, а на кромке кратера начали выжиматься жесткие блоки. Особенностью эксплозивной активности явилось интенсивное, временами непрерывное формирование пирокластических потоков, даже при слабых пепловых выбросах.

К марту 2011 г. пеплопадами была охвачена территория полуострова Камчатка от п. Тигиль до г. Петропавловск-Камчатский общей площадью 100 тыс. км². Было проведено шурфование снежной толщи примерно в 100 точках и отобрано около 200 образцов пепла. Для подсчета массы тefры, изверженной вулканом к концу февраля, на карту был нанесен суммарный вес пепла в каждой точке, территория вокруг вулкана разделена на сектора, в каждом из которых была посчитана масса пепла по [Широков, 1985]. Общая масса изверженного за 3 месяца пепла составила ~10 млн т.

Отдельно исследовались отложения крупных выбросов на основе послыонного отбора пепла из снежных шурфов и их временной привязки. Масса пепла выделенных и закартированных отложений эксплозий 13 и 28 декабря 2010 г., 1, 7 и 13 января 2011 г. составила от 0.3 до 2.1 млн т.

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

Такой характер активности позволил объяснить разделение шивелучских пеплов по ряду признаков на два типа (рис. 3): I – крупнозернистые темные пеплы, образовавшиеся в результате эксплозий; на расстоянии 25–50 км от вулкана преобладает фракция 0.125–0.5 мм, пылеватая фракция составляет менее 20%; и II – тонкие рыжие пеплы, отложившиеся из облаков, поднимающихся над движущимися лавинами и ПП; пылеватая фракция преобладает (~70%) даже на расстояниях 5–20 км (см. Главу 4). Встречаются пеплы смешанного состава, подобно рассмотренным выше пеплам вулканов Безымянный и Кизимен.



Рис. 3. Отложения крупнозернистых (нижний горизонт) и пылеватых (верхний горизонт) пеплов в 4 км на запад от купола вулкана Шивелуч в июле 2007 г.

После более чем годового периода покоя 4 декабря 2006 г. вулкан Шивелуч возобновил свою эксплозивную деятельность, которая сохранялась в течение всего 2007 г. К середине марта, т.е. за первые 3.5 месяца извержения, пеплопадами была охвачена практически вся площадь в радиусе >100 км от вулкана. На основании изучения 70 площадных проб пепла и распространения шлейфов по спутниковым снимкам территория вокруг вулкана была разделена на пять секторов, для которых были проведены изолинии массы пепла и подсчитана его общая масса с использованием степенной зависимости [Широков, 1985], которая составила около 2.5 млн т. Предполагая, исходя из сейсмических и спутниковых данных, примерно одинаковую активность вулкана в течение 2007 г., общая масса выброшенных за год пеплов составила около 8–9 млн т.

28 октября 2010 г. произошло одно из крупнейших извержений после 1980 г. Была разрушена значительная часть экструзивного купола с ЮВ стороны. По расчетам [Жаринов, Демянчук, 2013], отложения пепла покрыли площадь 2000 км², а его масса составила 7.8 млн т. По расчетам автора с использованием формулы [Legros, 2000] минимальный объем тефры составил 15 млн т.

По данным [Shevchenko et al., 2015; Горбач и др., 2016] суммарный объем отложений пирокластических потоков, сформированных за 2001–13 гг., оценивается ~0.6 км³ (или 0.46 км³ в пересчете на плотную породу, в т.ч. ~0.4 км³ – материал разрушения купола и остальное ~0.06 км³ – ювенильный материал). За 8 лет (2006–13 гг.) объем материала ПП составил 0.37 км³. Количество пеплов, вынесенных в облака ПП за этот период, можно оценить, используя результаты [Bonadonna et al., 2002], согласно которым при извержении 1995–99 гг. на вулкан Суффриер (о. Монтсеррат) 4–16% от общей массы ПП было вынесено в виде пеплов облаков ПП. При плотности отложений ПП 1.8 т/м³, получаем минимальную массу пеплов облаков ПП, выпавших за 8 лет 0.37 км³ × 1.8 т/м³ × 0.04 = 30 · 10⁶ т. Основываясь на полевых наблюдениях в 2007 г. (рис. 3) и расчетах для вулкана Безымянный (см. Главу 4), можно предположить в 2 раза большее количество эксплозивных пеплов. Таким образом, общая масса пеплов, изверженных в 2006–13 гг., составила ~90 млн т. Если учесть отсутствие активности в 2006 г. и массу пепла пароксимальной фазы в октябре 2010 г., получаем ~11 млн т в год, что близко к полученным оценкам для 2007 г. (8.5 млн т).

Очередной эруптивный цикл **вулкана Карымский** начался 02.01.1996 г. и продолжается с небольшими периодами покоя более 20 лет. До 2004 г. на склоны вулкана изливались лавовые потоки, после этого извержение перешло в чисто эксплозивную фазу, характеризующуюся выбросами вулканского типа.

Автором, непосредственно участвовавшим в отборе проб пепла в радиусе 1.5–10 км от вулкана весной 2007, 2008 и 2011 гг., составлены схемы отложений пепла и подсчитаны их годовые массы по секторам и в целом [Широков, 1985], которые составили, соответственно, 2.5; 0.6 и 1.5 млн т. По данным исследований при участии автора [Маневич и др., 2012], общая масса изверженного пепла за период 2005–11 гг. составила около 10 млн т, или 1–2 млн т пепла в год. В первый год активизации (1996 г.) вулкан выбросил 4.4 млн т тефры [Муравьев и др., 1997], за 2006 г. ~3.8 млн. т [Жиделева и др., 2007, доклад]. С учетом приведенных данных, среднегодовой вынос пепла для 8-летнего периода составил 1.8 млн т, что совпадает со средней интенсивностью выноса вещества за время жизни вулкана, так и за последние 500 лет – 2 млн т/год [Брайцева, Мелекесцев, 1989].

Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС (ГТИ-50) 2012–13 гг. было преимущественно эффузивным со средним коэффициентом эксплозивности 15 об.%. Объем лав, излившихся с 27 ноября 2012 г. по июнь 2013 г., был оценен в 0.542 км^3 , а объем новообразованных конусов им. Меняйлова и Набоко составил $\sim 0.02 \text{ км}^3$, остальной пироклаستي, выпавшей на расстоянии до 1.5 км, – 0.08 км^3 [Двигало и др., 2017]. При плотности шлака 0.65 т/м^3 , по данным измерений автора, общая масса пироклаستي, выпавшей в ближней 1.5-километровой зоне, составила 65 млн т.

Мощные эксплозии, формирующие протяженные пепловые шлейфы, в основном наблюдались в начале извержения. Они распространялись на север, юго-восток и запад-северо-запад от эруптивного центра. По спутниковым данным [Гирина и др., 2013] и визуальным наблюдениям, в остальное время извержения значительных пеплопадов не было, хотя небольшое выпадение тефры периодически наблюдалось в ближней зоне. На основе анализа отложений пепла в 3-х секторах (северном, западном и юго-восточном) общая масса тефры, изверженной в течение первой недели, оценена примерно в 10^7 т с объемом около 0.01 км^3 (принимая плотность тефры 1 т/м^3), более половины которой ($5\text{--}6 \cdot 10^6 \text{ т}$) было отложено пеплопадами первых двух дней в северном секторе.

В главе также приведено **краткое описание извержений других вулканов** активных в 2006–13 гг.: Ключевской, Жупановский, Алаид, материал извержений которых изучался автором, но из-за недостаточного количества проб оценка его количества не выполнялась или бралась из опубликованных источников.

Заключение к главе 3. Приведенные оценки массы тефры извержений вулканов Камчатки являются важной (Безымянный, Шивелуч), а иногда и основной (Карымский) составляющей их геологического эффекта. В таблице 1 перечислены извержения вулканов Камчатки за 2006–13 гг. с указанием типов их эруптивных продуктов. Приведены масса или объем изверженных продуктов отдельно по их типам, подсчитанные автором и взятые из опубликованных источников. Таким образом, показаны активность вулканов Камчатки за указанный период, типы их извержений (по эруптивным продуктам), а также вклад автора в их изученность.

Таблица 1. Продукты извержений вулканов Камчатки в 2006–2013 гг.

	2006		2007			2008	2009	2010	2011	2012		2013	Σ, Мт
Безымянный	9.05	24 12	12.05	14–15 10	5.11	19.08	17.12	31.05	13.04	8.03	1.09		Т~34 ПП~100 Л=57
	<i>T~13 Mm,</i> ПП=0.005 км ³ , Л=0.00085 км ³	Т=7±1 Мт, ПП~0.007 км³=11 Мт, Л~0.001 км³	<i>T~0.8 Mm,</i> ПП=0.004 км ³ , Л	<i>T~2 Mm,</i> ПП=0.005 км ³ , Л	ПП=0.001 км ³	<i>T~1.2 Mm,</i> ПП=0.003 км ³ , Л	Т=4.5 Мт, ПП=0.002 км ³ , Л=0.0039 км ³	<i>T~2 Mm,</i> ПП=0.023 км ³ , Л=0.0043 км ³	Т=0.7 Мт, ПП=0.01 км ³ , Л	Т=0.5 Мт, ПП, Л=0.0072 км ³	<i>T~3.5 Mm,</i> ПП, Л	–	
Карымский	Т=3.8 Мт		Т=2.5 Мт			Т=0.6 Мт	<i>T~1–2 Mm</i>	<i>T~1–2 Mm</i>	Т=1.5	<i>T~1–2 Mm</i>	<i>T~1–2 Mm</i>	Т=14.4	
Шивелуч	4.12 – Т=0.7 Мт, ПП, Э		Т=8.5 Мт, ПП, Э			Т, ПП, Э	Т, ПП, Э	Т>15 Mm <i>+~11 Mm,</i> ПП=0.02 км ³ , Э=0.28 км ³	Т, ПП, Э	Т, Э	Т, ПП, Э	Т=90 ПП=750 Э=720	
Кизимен	–		–			–	–	11.11 – Т=10 Мт, ПП=0.28 км ³ , Л=0.195 км ³	–	Л, Э	– окт. Э	Т=10, ПП=420 Л=450	
ТТИ–50	–		–			–	–	–	–	27.11 – Т=10 Мт =0.01 км ³ , П=0.1 км ³ Л=0.54 км ³	– сент.	Т=10 Л=65 Л=1190	
Ключевской	–		февраль-июль			окт. – янв.	сент.–ноябрь.		–	–	авг.–нояб. Т, Л	Т≤4	
Жупановский	–		–			–	–	–	–	–	21–24.10 Т=0.1 Мт	Т=0 1	
Корякский	–		–			20.12 – Т=0.0005–0.001 км ³	– 27.08	–	–	–	–	Т=0.9± 0 3	

Примечание. Жирным шрифтом выделены оценки автора, курсивом – оценки, являющиеся приблизительными из-за недостатка данных, остальные взяты из литературы. Т – тефра, ПП – пирокластические потоки, Л – лавовые потоки, П (только для ТТИ-50) – пирокластика, выпавшая в пределах 1.5 км от эруптивного центра, включая шлаковые конуса, Э – продукты экструзивной деятельности. Для сравнения разных типов отложений объемы пересчитаны в массу: ρ(ПП)=1.6-1.8 т/м³ [Гирина, 1998], для Толбачика ρ(П)=0.65 т/м³ (по измерениям автора), ρ(Л)=2.2 т/м³ [Действующие..., 1991]. Для вулкана Безымянный объемы лавы по [Свирид и др., 2007; Двигало и др., 2011; Шевченко, Двигало, 2015; Shevchenko et al., 2018], отложений ПП по [Гирина и др., 2012; Girina, 2013]. Масса тефры вулкана Карымский в 2006 г. по [Жиделева и др., 2007, доклад], в 2009–10 гг. по [Маневич и др., 2012], объем отложений вулкана Шивелуч 2010 г. по [Двигало и др., 2011], приблизительные расчеты для остальных лет кроме 2006–07 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 вулкана Ключевской 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]

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕПЛОВ

Представлены результаты детального гранулометрического анализа пеплов извержений 2006–17 гг. вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч, Карымский, Жупановский, Толбачик, Ключевской, Алаид и Камбальный, 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. Оценена доля фракций (<10 и <4 мкм) пеплов Камчатских вулканов, опасных для здоровья человека.

В пеплах андезитовых вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч и Жупановский отмечено высокое содержание пылеватых фракций, независимо от расстояния отбора пробы от вулкана (рис. 4). 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, а также образования большого количества мелкой фракции за счет истирания при движении ПП [Rose, Durant, 2009]. В то же время, изученные пробы пеплов андезитового вулкана Карымский характеризуются относительно небольшим содержанием пылевой фракции.

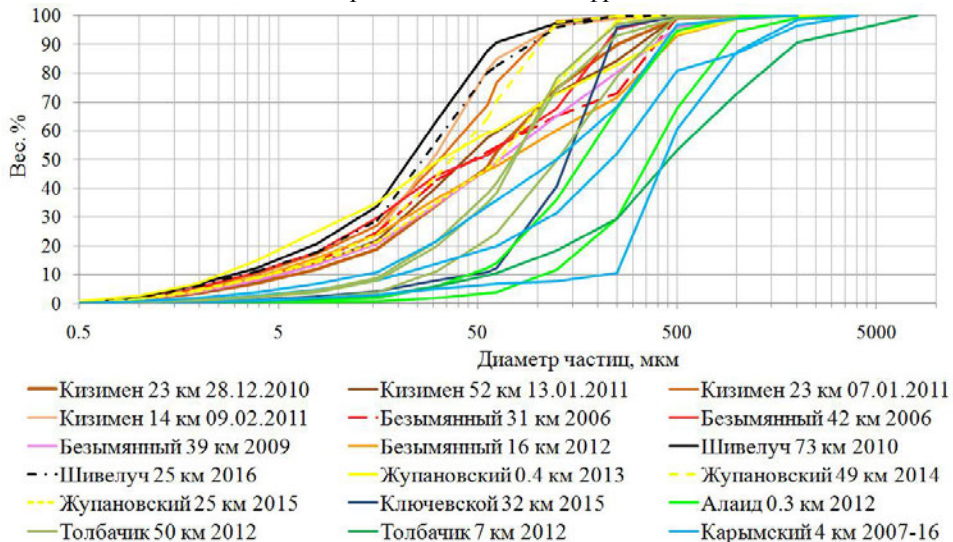


Рис. 4. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержений вулканов Камчатки и Северных Курил (Алаид). В легенде после названия вулкана указано расстояние отбора пробы и дата извержения.

По величине удельной поверхности пепла (УПП) в зависимости от расстояния отбора от вулкана пробы разделились на 3 группы: (1) пеплы среднего и кислого состава, имеющие высокие значения УПП, даже на небольшом удалении от вулкана и практически независимо от него (рис. 5, поле 1); (2) пеплы основного

состава и вулкана Карымский, имеющие значительно меньшую удельную поверхность на тех же расстояниях, а также пеплы дальнего разноса вулканов первой группы (рис. 5, поле 2). Различия в гранулометрическом составе пеплов этих групп объясняются тем, что эксплозии вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч обычно сопровождаются пирокластическими потоками или раскаленными лавинами, над которыми поднимаются облака пыли, поэтому пепловые отложения формируются как из эруптивной колонны, так и из облаков ПП. В результате, отложения ближней и средней зоны пеплопада обогащены пылевой фракцией, и ожидаемого увеличения УПП с расстоянием не наблюдается. Такое увеличение можно отметить для пеплов дальнего разноса, например, вулкана Кизимен (рис. 5, поле 2), т.к. с расстоянием доля пеплов облаков ПП (ПОПП) уменьшается. Для извержений вулкана Карымский и вулканов основного состава формирование ПП не характерно, поэтому их пеплы отлагаются только из эруптивной тучи. Максимальную УПП при минимальном расстоянии от вулкана имеют пеплы вулканов Жупановский начальной фреатической стадии извержения и Камбальный (рис. 5, поле 3).

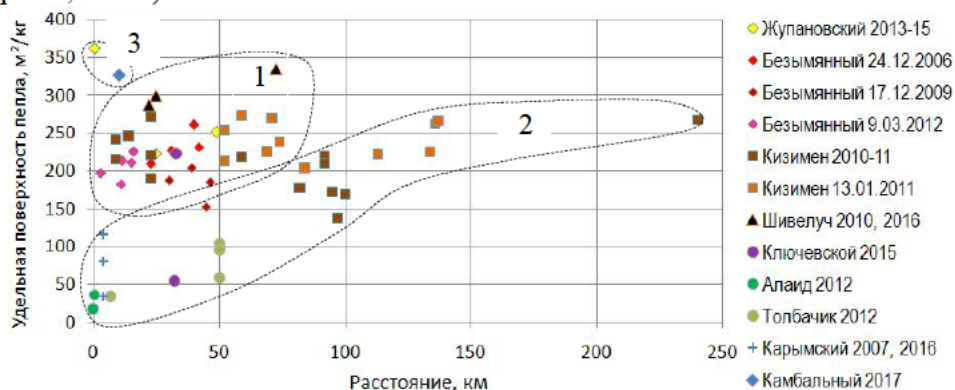


Рис. 5. Изменение удельной поверхности пеплов с расстоянием от вулкана.

Данные выводы подтверждаются также статистически обоснованным разделением отложений на два основных типа по двум новым гранулометрическим параметрам: (1) УПП/средний размер (m^{-2}) и (2) средний размер/сортировка (безразмерный) [Darteville et al., 2002]. Первое отношение разделяет грубозернистые от мелкозернистых отложений (отложения ПП от ПОПП, пеплопада в ближней от дальней зоны), второе – отложения ПП и ПОПП от отложений плиннианских и др. выбросов. Согласно диаграмме (рис. 6) пробы пепла разделяются на две группы: отложения, содержащие значительную долю ПОПП (слева сверху), и эксплозивные пеплы (справа снизу). С увеличением расстояния доля ПОПП уменьшается, поэтому точки для пеплов дальнего разноса вулкана Кизимен смещаются вправо (рис. 6).

Как показали модельные расчеты для извержения вулкана Безымянный 24.12.2006 г. [Моисеенко, Малик, 2015], существенная доля выброса, ~30% (1.5 млн т), приходится на высоты 2.5–6.5 км н.у.м. (рис. 7), что значительно ниже уровня нейтральной плавучести газовзвеси (9.5 км н.у.м.) эруптивной колонны. Вероятно, основным источником выброса на этих высотах являются облака ПП. В пользу

данного предположения свидетельствует повышенное содержание фракции ≤ 63 мкм (58–60%) в пробах, для которых абсолютно преобладает вклад переноса от модельного источника выброса на высотах ниже 6 км (см. рис. 1, точки в областях отмеченных как ПП), по сравнению с пробами, отобранными на тех же расстояниях, но с преобладающим вкладом источника пепла с больших высот (~51–53%).

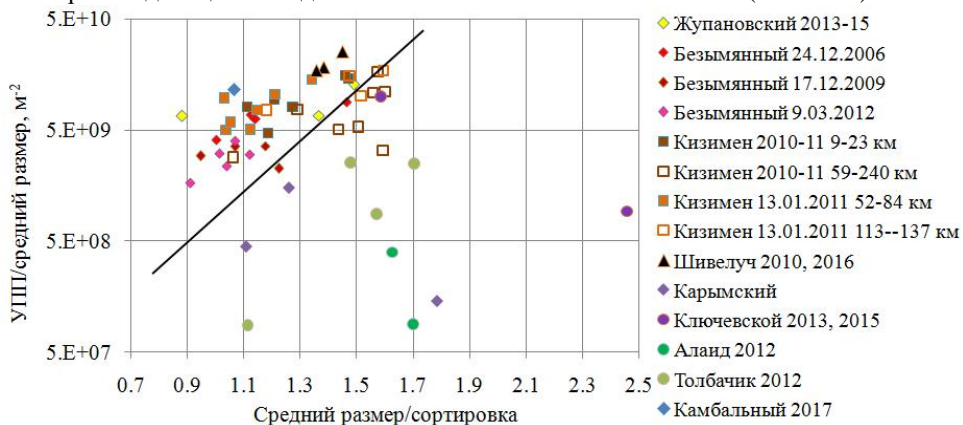


Рис. 6. Гранулометрические отношения для образцов тефры по [Dartevelle et al., 2002]. Линия, обозначает границу между пеплами взрывных (субплинианского, вулканического, стромболианского типа) и отложениями, ассоциированными с ПП.

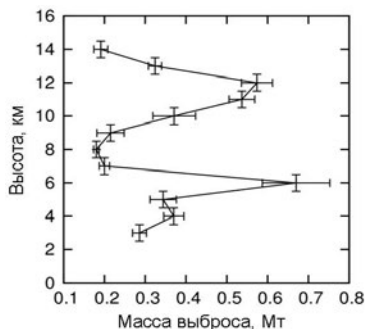


Рис. 7. Распределение массы пеплового выброса по высотам в эруптивном облаке при извержении на вулкане Безымянный 24.12.2006. Вертикальные линии – интервалы высот выброса (шаг 1 км) для модельного источника, горизонтальные линии – стандартные отклонения для восстановленных величин.

Согласно результатам [Bonadonna et al., 2002], при извержении 1995–99 гг. на вулкане Суффриер 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. Если предположить, на основании близости состава пород и типа извержения, что эта оценка справедлива и для ПП Безымянного вулкана, то будем иметь для события 24.12.2006: $M_{\text{попп}} = M_{\text{пп}} \cdot 0.04(0.16) = 0.4 - 2.1 \cdot 10^6$ т (при $M_{\text{пп}} = 7 - 13 \cdot 10^6$ т), что составляет 6–30% от общей оцененной массы пепла. Эта оценка хорошо согласуется с величиной 1.5 млн т, полученной с помощью численного моделирования.

Полученные на основе гранулометрического состава выводы объясняют особенности петрохимического состава тефры. Так, благодаря вкладу ПОПП, имеющих более кислый химический состав (на 2–3% SiO_2) по сравнению с другими типами пирокластики, в ближней и средней зонах пеплопада не удастся проследить

эоловую дифференциацию пеплов для извержений вулканов Кизимен и Безымянный, которая должна была бы проявиться в закономерном изменении их минералогического и химического состава с расстоянием. В пепле вулкана Кизимен, отобранном на расстоянии 10–30 км от вулкана, явно повышено содержание SiO_2 – до 69%, по сравнению с другими пеплами. Аналогичная ситуация наблюдается и для продуктов извержений Безымянного вулкана [Малик, 2011]. Эоловую дифференциацию удастся проследить для пеплов дальнего разноса (>40–50 км от вулкана).

Гранулометрический состав пепла и опасность пеплопадов для здоровья.

Использование лазерного дифракционного анализатора частиц позволило выделить кроме "ингалируемой" фракции (<100 мкм), способной проникать только в верхние отделы дыхательных путей, вызывая раздражение, также и "торакальную" фракцию (<10 мкм), осаждающуюся в верхних отделах легких, вызывая приступы астмы и бронхита, и "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]. Содержание опасных фракций (<10 и <4 мкм) в пеплах вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч велико – 13–24% и 7–13% на расстоянии 10–100 км от вулкана, достигая максимума во фрегатических пеплах Жупановского (28 и 15%) и Камбального (27 и 14%) (рис. 8). Для вулканов Алаид, Ключевской, Толбачик оно не превышает 6% (<10 мкм) и 2.7% (<4 мкм). Пеплы вулкана Карымский имеют промежуточное положение.

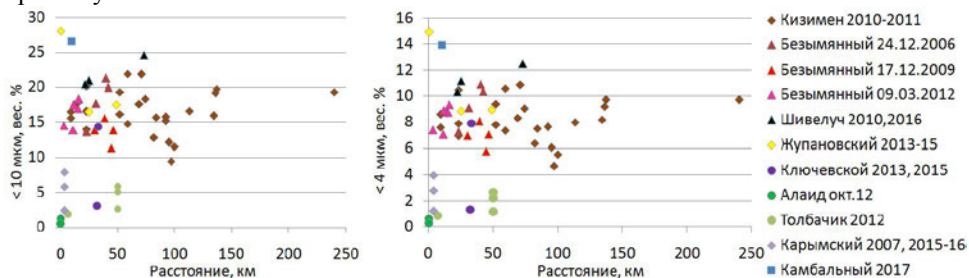


Рис. 8. Содержание «опасных» для здоровья фракций в пеплах вулканов Камчатки и вулкана Алаид (Северные Курильские острова) в зависимости от расстояния от вулкана.

ГЛАВА 5. ВОДОРАСТВОРИМЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЕПЛОВ И ИХ ВЫНОС В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Водорастворимые компоненты пеплов извержений вулканов Камчатки и вулкана Алаид (Курильские острова), происходивших в 2006–17 гг., были изучены посредством анализа водных вытяжек из пеплов (см. главу 2). Дополнительно, при проведении сравнительного анализа были добавлены данные для извержений ближайших к городу вулканов Авачинский в 1991 г. [Дрознин, 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, табл. 1) 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 за год.

Наибольшие концентрации водорастворимых веществ, пересчитанных на 100 г пепла (до ~2), отмечены для резургентных пеплов вулканов Жупановский и Камбальный, а также для пеплов эксплозивной стадии (декабрь 2010 – январь 2011 гг.) извержения вулкана Кизимен (табл. 2). Все они характеризуются высокими содержаниями сульфат-иона (рис. 9), а пеплы Жупановского – также хлорид-иона, но при этом низкими концентрациями фторид-иона, 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., так же включающих значительную долю резургентного материала. Преимущественно ювенильные трахиандезибазальтовые (ТТИ-50) и андезибазальтовые пеплы (вулканов Авачинский, Горелый, Ключевской) выносят 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 анионов (табл. 2, рис. 9). Среднее отношение S/Cl (масс.) 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 активной эксплозивной стадии. Отличительно низкие отношения S/Cl имеют вытяжки из пеплов основного состава ТТИ-50 и вулкана Алаид – 0.23 и 0.17, соответственно.

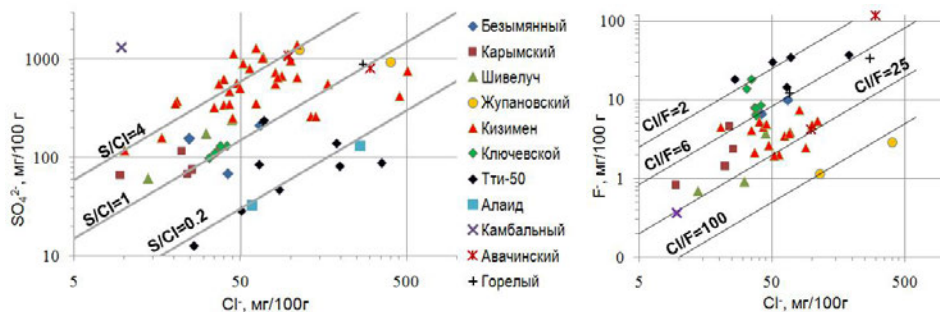


Рис. 9. Содержания сульфат-, хлорид- и фторид-иона в водных вытяжках из пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид (Курильские острова).

Концентрации растворимых компонентов были пересчитаны на единицу площади поверхности пеплов ($\text{мг}/\text{м}^2$) для проб с полным гранулометрическим анализом (табл. 3, рис. 10), ввиду того, что количества адсорбированных компонентов зависят, в первую очередь, от гранулометрического состава сорбента. Наибольшие количества сорбированных веществ на единицу поверхности пеплов характерны для базальтовых вулканов (ТТИ-50 и Алаид), для которых отмечается максимальное содержание галогенов (F и Cl), и вулканов Карымский и Кизимен с максимальным содержанием SO_4^{2-} . Значительное количество сорбированных веществ, нормированных на площадь поверхности, для базальтовых пеплов можно объяснить не только высокой начальной температурой и концентрацией газов в шлейфе, но и пористостью материала, которая не учитывается в используемой автором методике расчета УПП пеплов; кроме того, сравнительно высокие

содержания HCl и HF были отмечены также в эруптивных газах ТТИ-50. Максимальное содержание SO_4^{2-} в вытяжках из пеплов некоторых эксплозий вулканов Кизимен и Карымский можно объяснить высокой концентрацией SO_2 в выбросе. Резургентные пеплы (Жупановского и Камбального вулканов) вынесли так же большое количество водорастворимых веществ благодаря содержанию в них и последующему растворению фумарольных минералов. Минимальное количество сорбированных веществ на единицу площади поверхности характерно для пеплов вулканов Безымянный, Шивелуч, Ключевской, заключительных стадий активности Кизимена, причем концентрации веществ для пеплов Безымянного и Ключевского вулканов довольно близки, включая отношения S/Cl и F/Cl (рис. 10).

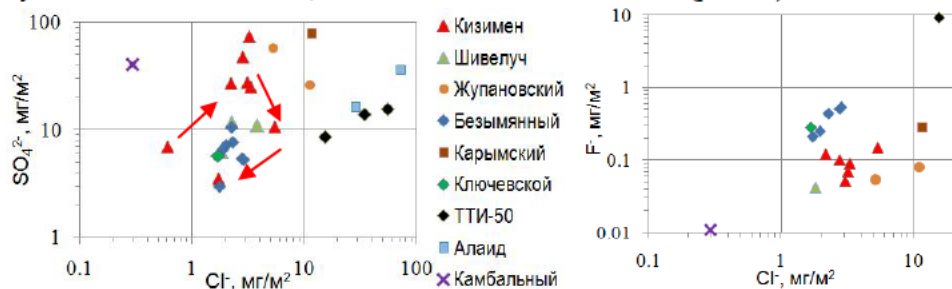


Рис. 10. Содержания сульфат-, хлорид- и фторид-иона, пересчитанные на единицу площади поверхности пеплов, для вулканов Камчатки и вулкана Алаид. Стрелками показаны изменения в ходе извержения вулкана Кизимен.

Анализ водорастворимых компонентов пеплов вулкана Кизимен показал, что их содержание закономерно меняется в ходе извержения (рис. 10). С начала извержения к 1 января 2011 г. концентрация сорбированных компонентов ($\text{г}/\text{м}^2$) возросла почти в 10 раз, в первую очередь, за счет SO_4^{2-} ; отношение S/Cl в этот период (28.12.10–1.01.11) так же было максимальным – 5.7–7.6 (табл. 3). В январе эти показатели постепенно снижаются, возрастая во время сильных эксплозий (13.01.11). В вытяжках из пеплов, отобранных в феврале-марте 2011 г., происходит увеличение содержания Cl, уменьшение SO_4^{2-} и, соответственно, уменьшение отношения S/Cl до 0.6 и затем до 0.3. В декабре 2011 г., данное отношение сохраняется (0.65), но минерализация вытяжек падает. Содержание F в течение извержения постепенно возрастало. Данные изменения, вероятно, отражают изменения в составе эруптивных газов и являются типичными для извержений с участием ювенильного вещества (газы серы, как менее растворимые в магме, выделяются из неё в первую очередь, затем HCl и HF; газонасыщенность извергаемого материала сначала резко возрастает, а затем постепенно снижается).

Сравнение результатов анализов для 3-х изученных извержений вулкана Безымянный (табл. 3) показывает близкие содержания в вытяжках из пеплов F, Cl и их отношений, а также катионов. Большее содержание SO_4^{2-} и отношение S/Cl в пеплах извержения 24.12.2006 по сравнению с 17.12.2009 можно объяснить отмеченной прямой связью между силой извержения и содержанием SO_4^{2-} [Гушенко, 1965]: извержение в декабре 2009 г. по объему изверженного материала и высоте эруптивной колонны было слабее извержения в декабре 2006 г. Сравнение с историческими извержениями [Гушенко, 1965] дает максимальное содержание SO_4^{2-} в пеплах пароксизма 30.03.1956 и минимальное – в пеплах извержения 1961 г.,

самого слабого из рассмотренных. Возможное объяснение высокого содержания SO_4^{2-} и отношения S/Cl в вытяжках из пеплов извержения 8.03.2012 г., наименее мощного из изученных, – вторичные минералы, вынесенные при разрушении измененных пород фумарольных площадок и жерла.

Были подсчитаны количества водорастворимых веществ, вынесенных с пеплами извержений, средние за год для постоянно извергающихся вулканов (Шивелуч, Карымский) и суммарные количества за период 2006–13 гг. (табл. 4). За 8 лет вулканами Камчатки было вынесено вместе с тефрой около 650 ± 200 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.

Все вулканы (за исключением Корякского¹), 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.

Значительное содержание водорастворимых веществ отмечалось в пеплах извержения вулкана Авачинский в 1991 г. (0.5–3 г/100 г), но по общей массе было вынесено незначительное количество – 3.4 тыс. т, ввиду сравнительно небольшой общей массы изверженного пепла (~170 тыс. т) [Дрознин, 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.

В целом за год, вулканами Камчатки только в составе водорастворимого комплекса пеплов выносятся серы в 2–4 раза больше чем от всех стационарных и передвижных антропогенных источников загрязнения атмосферы в Камчатском крае, хлора и фтора – в 10000 раз больше [Государственный..., 2004; Доклад..., 2017] (табл. 4). Вынос серы с пеплами в 6–9 раз меньше, а фтора и хлора в 2.5 раза больше по сравнению с выбросом в атмосферу модельного промышленного города с миллионным населением за год [Прокачева, Усачев, 1989].

На примере извержений, произошедших за выбранный восьмилетний период, показано, что действующие вулканы Камчатки – постоянный и, очевидно, главный источник поступления веществ в окружающую среду полуострова, в целом относительно слабо затронутую антропогенным воздействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые комплексно изучена тефра извержений вулканов Камчатки 2006–13 гг. В этот период регулярную активность проявляли вулканы Безымянный, Шивелуч, Карымский, Ключевской. Наблюдались длительные продуктивные ($\geq 0.5 \text{ км}^3$) извержения вулканов Кизимен и Толбачик, слабые фреатические активизации вулканов Жупановский и Корякский.

¹ Продукты извержение 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

Таблица 2. Содержание водорастворимых компонентов в пеплах извержений вулканов Камчатки и Алаид (Курильские острова), мг/100 г

Вулкан	Дата извержения	L, км	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Fe ₀₆	Al ³⁺	H ₄ SiO ₄	Σ	S/Cl	Cl/F
Безымянный	24.12.2006 (16)	30-70	4.8	211	66	10	74	31	9.1	9.0	н/о	н/о	н/о	410	1.1	6.6
	17.12.2009 (9)	26-46	5.2	69	42	6.6	37	12.9	4.1	2.8	н/о	н/о	7.5	181	0.55	6.4
	08.03.2012 (7)	3-17	5.4	155	25	н/о	47	17.0	7.7	5.1	н/о	н/о	3.3	260	2.4	
	ср.		5.0	155	55	8.7	59	23.6	7.2	6.5	н/о	н/о	7.1	323	0.95	6.5
Карымский	2007 (3)	1.3-10	4.5	115	22	1.4	33	24.0	1.8	5.7	н/о	н/о	н/о	203	1.4	18
	2008 (2)	1.3-10	4.5	66	9.5	0.82	22	8.60	3.1	1.7	н/о	н/о	н/о	112	3/(0.6-5.4)	12
	2010 (13)	1.3-11	4.6	75	26	2.4	37	20.5	2.6	3.8	н/о	н/о	9.4	177	1.3	14
	2011 (10)	1.3-10	4.9	67	24	4.6	22	12.1	1.9	1.5	2	н/о	3.3	139	0.9	5.2
	ср.	1.3-10	4.6	105	32	3.8	40	18.1	2.9	3.7	0.43	6.4	3.7	216	1.2	11
Шивелуч	4-31.12.2006 (3)	19-20	5.7	61	14	0.69	27	2.17	5.2	14	н/о	н/о	16	139	1.5	23
	2007 (9)	16-49	5.2	242	45	3.7	86	25.5	5.3	14	н/о	н/о	11	432	2.4	13
	окт.10 (4)	40-87	5.1	175	31	0.9	56	21.0	3	14	н/о	н/о	3.0	304	2.4	41
	2014-16 (16)	10-58	5.4	181	32	н/о	67	19	4.9	8.2	н/о	н/о	2	314	1.9	
	ср. (30)		5.3	187	35	2.2	66	21	4.2	11	н/о	н/о	6.1	332	2.3	29
Кизимен	дек. 10-январь.11 (25)	10-137	4.7	711	59	4.5	261	26	10	12	4.4	1.8	25	1115	4.4	12
	фев.- март 2011 (4)	14	3.8	312	242	4.6	158	25	8.7	9.3	н/о	н/о	н/о	760	0.53	50
Жупановский	21-24.10.2013 (2)	0.4-25	3.9	1085	257	2	306	79	43.3	25	23	30	30	1880	2.2/(1-3.6)	111
ГТИ-50	нояб.12-сент.13 (20)	0.2-60	4.8	84	238	50	79	39	17	16	20	26	85	654	0.23	3.4
Ключевой	нояб. 2013 (7)	25-33	6.0	120	37	9.8	36.4	15	2.77	11	н/о	н/о	н/о	232	1.1	4.4
Алаид	2012 (2)	0.15	4.4	131	261	н/о	84	51	11.6	21	н/о	н/о	80	640	0.17	
Камбальный	2017 (1)	10	5.0	1330	10	0.4	536	12	6.5	2.1	0.57	0.64	12	1910	44	25
Авачинский	13.01.1991	7-25	4.6	1070	98	4.2	482	52	9	30	26	21	10	1780	3.6	23
	16-17.01.1991		3.8	814	301	118	340	50	11			120	77	1980	0.9	2.6
Горелый	1980-81 юв.+рез.	0.1-8.5		225	68	12	63	11	2.9	31	0.3	18		431	1.1	5.7
	1980-81 рез.	0.1-8.5		891	271	33	264	30	6.5	58	12	98		1664	1.1	8.2

Примечание. В скобках указано количество проб. Курсивом отмечены не авторские данные, взятые из работ: Карымский 2010 г. – [Маневич и др., 2013], Авачинский 1991 г. – [Дрознин, Муравьев, 1994; Иванов и др., 1995], Горелый 1980-81 гг. – [Кирсанов, Озеров, 1983]. Юв. – ювенильный, рез. – резургентный. L – расстояние точки отбора пепла от вулкана, Σ – сумма, н/о – компонент не определялся.

Таблица 3. Содержание водорастворимых компонентов в пеплах извержений вулканов Камчатки и Алайд, мг/м² УПП

	Дата	L, км	УПП, м ² /кг	SO ₄ ²⁻	Cl	F	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Σ
Безымянный	24.12.2006	31	227	7.2	2.0	0.25	2.4	1.2	0.29	0.31	14
	24.12.2006	42	250	7.7	2.3	0.44	2.8	1.0	0.21	0.28	15
	17.12.2009	39	204	2.9	1.8	0.21	1.7	0.53	0.11	0.13	7.4
	17.12.2009	45	153	5.4	2.8	0.51	2.5	0.92	0.46	0.20	13
	17.12.2009	46.3	184	5.3	2.9	0.54	2.7	0.8	0.23	0.18	13
	08.03.2012	11	182	11	2.3	н/о	3.2	1.2	0.49	0.46	18
	08.03.2012	15	230	6.5	1.9	н/о	2.3	0.77	0.33	0.21	12
	ср	33	200	6.5	2.3	0.39	2.5	0.93	0.3	0.25	13
Кизимен	10–13.12.10	95	171	6.9	0.6	н.п.о.	1.7	0.5	0.5	0.33	12
	28–29.12.10	23	189	48	2.8	0.1	17	1.5	0.6	0.74	71
	01.01.2011	82	177	74	3.2	0.07	28	2.1	0.8	1	110
	07.01.2011	23	271	25	3.3	0.09	9.3	0.8	0.3	0.51	40
	13.01.2011	52	213	27	2.2	0.12	9.2	0.9	0.3	0.37	40
	13.01.2011	137	265	27	3.1	0.051	12	1.1	0.34	0.68	45
	09.02.2011	14	245	11	5.4	0.15	5.3	0.8	0.2	0.27	24
	дек.11	9	241	3.5	1.7	н/о	1.1	0.7	0.2	0.16	7.8
ср	54	220	28	2.8	0.097	10	1.1	0.41	0.51	44	
Жупановский	окт.13	0.4	361	26	11	0.081	8.9	2.1	1.2	0.75	50
	январь.15	25	223	57	5.2	0.053	13	3.9	2	1.1	82
Шивелуч	окт.10	73	334	6.2	1.8	0.042	2.3	0.9	0.13	0.63	12
	январь.16	25	299	12	2.3	н/о	3.5	1.3	0.29	0.71	20
	2016	22	287	11	3.8	н/о	4.9	1.6	0.33	0.68	22
Карымский	21.04.2007	3.8	34.2	78	12	0.3	19	15	0.09	3.7	128
	2016	3.8	117	38	11	н/о	13	8.4	1.7	2.3	76
Алайд	окт.12	0.15	036.5	36	71	н/о	23	14	3.2	5.8	153
		0.05	20.2	16	29	н/о	5.7	4.1	1.3	2	58
ТТИ	27.11.2012	50	105	16	55	н/о	27	9.4	3.3	4.9	115
	28.11.2012	50	58	14	34	н/о	15	4.1	1.9	2.2	72
	нояб.-дек. 2012	7	33	8.6	15	9.17	8.1	9	2.2	1.6	54
Ключевской	2013	33	224	5.7	1.7	0.28	1.7	0.62	0.092	0.48	11
Камбальный	2017	10	326	41	0.3	0.011	17	0.36	0.20	0.06	58

Примечание. L – расстояние точки отбора пепла от вулкана, УПП – удельная поверхность пепла, Σ – сумма, н/о – компонент не определяется, н.п.о. – ниже порога определения.

Таблица 4. Количество веществ, вынесенных извержениями вулканов Камчатки в 2006–13 гг. в составе водорастворимого комплекса пеплов

Вулкан	Дата извержения	Пепел, млн т	Водорастворимые вещества, вынесенные за извержение, тыс. т							
			SO ₄ ²⁻	Cl	F	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Σ
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	35	54	19	3.0	21	8.3	2.5	2.3	110
Карымский	2007	2.5	2.9	0.56	0.036	0.82	0.6	0.045	0.14	5.1
	2008	0.6	0.4	0.057	0.0049	0.13	0.052	0.018	0.01	0.7
	2011	1.5	1.1	0.39	0.035	0.56	0.31	0.039	0.058	2.5
	<i>ср. за год</i>	<i>1.8</i>	<i>1.9</i>	<i>0.58</i>	<i>0.069</i>	<i>0.72</i>	<i>0.33</i>	<i>0.049</i>	<i>0.066</i>	<i>3.7</i>
	всего	2006–13	14.4	15	5	0.55	5.8	2.6	0.4	0.53
Шивелуч	дек.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	4.7	0.13	8.4	3.2	0.44	2	45
	<i>ср. за год</i>	<i>11</i>	<i>21</i>	<i>3.8</i>	<i>0.25</i>	<i>7.3</i>	<i>2.3</i>	<i>0.5</i>	<i>1.2</i>	<i>36</i>
	всего	2006–13	90	172	31	2.0	60	19	4.1	9.8
Кизимен	нояб. 10–дек. 11	10	62	6	0.43	23	2.6	1	1.2	97
Жупановский	21–24.10.2013	0.1	0.94	0.4	0.003	0.32	0.074	0.044	0.027	1.8
ТТИ–50 (пепел)	нояб.-дек. 2012	10	8.4	23	5.3	11	4.4	1.8	2.5	60
ТТИ-50 (шлак)	нояб.2012-июнь 13	65	8.2	17	12	8.1	7	2.6	1.7	56
всего		75	17	40	17	19	11	4.4	4.2	116
Ключевской	<i>4 извержения</i>	<i>≤4</i>	<i>4.8</i>	<i>1.5</i>	<i>0.4</i>	<i>1.5</i>	<i>0.6</i>	<i>0.1</i>	<i>0.5</i>	<i>9</i>
Корякский	20.12.2008–08.2009	0.9								
Σ	2006–13	229	325	103	23	125	44	13	19	662
	<i>за год</i>	29	41	13	2.9	16	5.5	1.6	2.3	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	3.4
Горелый	1980–81	48	310	97	13	52	11	2.6	23	509
Камчатский край*	<i>за год 2003 / 2016</i>		22 / 8.9	– / 0.0004	– / 0.0002					76 / 81
Город (1 млн чел.)**	<i>за год</i>		225–360	5	1.2					

Примечание: * – выбросы веществ в атмосферу в 2003 и 2016 гг. по данным [Государственный..., 2004; Доклад..., 2017]; ** – выбросы в атмосферу модельным городом с населением 1 млн человек по [Прокачева, Усачев, 1989]

В результате изучения площадных проб пепла этих извержений установлено, что вулканом Безымянный 24.12.2006, 17.12.2009, 14.04.2011 и 8.12.2012 гг. было выброшено ~7, ~4.5, ~0.7 и ~0.5 млн т пепла, соответственно; Карымский в 2007, 2008 и 2011 гг. – ~2.5, ~0.6 и ~1.5 млн т в год, соответственно; Шивелуч – ~8.5 млн т в 2007 г. и ~15 млн т 27.10.2010; Кизимен (2010–11 гг.) и Толбачик (ТТИ-50, 2012–13 гг.) – по ~10 млн т. Экстраполируя эти результаты на другие извержения вулканов Камчатки данного периода и привлекая опубликованные данные, было подсчитано, что на поверхность планеты за 8 лет поступило 150 ± 50 млн т тефры андезитового и дацитового состава и 80 ± 10 млн тонн тефры основного состава (в т.ч. 65 млн т пирокластики ТТИ-50, выпавшей в зоне <1.5 км от вулкана). В среднем за год вулканы Камчатки выбрасывали 29 ± 7 млн т тефры. По приблизительным подсчетам (табл. 1) это составляет около 6% геологического эффекта извержений вулканов Камчатки.

По данным И.И. Гущенко [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 за рассматриваемый период.

Подсчитанная масса пеплов извержений 2006–13 гг. и результаты исследования водных вытяжек из них позволили установить, что за 8 лет вулканами Камчатки на пеплах было вынесено около 650 ± 200 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. Это составляет 80 ± 25 тыс. т в год, в т.ч. SO_4^{2-} – 41, Cl^- – 13, F^- – 3, Ca^{2+} – 16, Na^+ – 5.5, Mg^{2+} – 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 Безымянный (~16%), мощные извержения данного периода – ТТИ-50 (~18%) и вулкана Кизимен (~16%); на долю остальных вулканов (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 начале 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 для пеплов фреатических извержений, а галогенов (F^- , Cl^-) – для пеплов базальтовых вулканов.

Впервые для представительного числа 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 (>40%) пылевой фракции и отсутствие выраженной зависимости ее от расстояния в пеплах извержений андезитовых вулканов Безымянный, Кизимен, Шивелуч, вследствие осаждения материала из облаков, сопровождающих сход пирокластических потоков, вместе с пеплами эруптивной колонны. Это подтверждается результатами математического моделирования, а также

распределением точек на диаграмме гранулометрических отношений, предложенной в [Dartevelle et al., 2002]. Пеплы основного состава вулканов Алайд, Ключевской, Толбачик, а также андезитовые пеплы вулкана Карымский, для эксплозивных извержений которых не свойственно формирование пирокластических потоков, имеют более крупнозернистый состав.

Полученные в работе 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 свойств и особенностей вариации петрохимического состава пеплов, 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 массы 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 ($\text{кг}/\text{м}^2$), 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Малик Н.А.** Импактный вклад вулканических извержений в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 4. С. 45–52.
2. **Малик Н.А.** Извержение вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 50–59.
3. **Малик Н.А., Овсянников А.А.** Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 г. – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7–10.
4. **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.
5. **Zelenski M., Malk N., Taran Yu.** 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.
6. **Моисеенко К.Б., Малик Н.А.** К вопросу об оценках суммарных выбросов вулканического пепла с использованием моделей атмосферного переноса // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 35–55.
7. **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.

8. *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.
9. *Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М.* Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013–2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. С. 21–33.
10. *Гирина О.А., Сеников С.Л., Малик Н.А. и др.* Изучение активности вулканов камчатки и о. Парамушир (Северные Курилы) в 2006 г. в рамках проекта KVERT // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2 (8). С. 151-157.
11. *Гирина О.А., Маневич А.Г., Малик Н.А. и др.* Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2007. № 4. С. 29-40.
12. *Гирина О.А., Малик Н.А., Котенко Л.В.* Активность вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) в 2002-2007 гг. по данным KVERT // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1 (11). С. 67-73.
13. *Гирина О.А., Ушаков С.В., Малик Н.А. и др.* Действующие вулканы Камчатки и о. Парамушир Северных Курил в 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 1–17.
14. *Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П. и др.* Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2 (20). С. 7–10.
15. *Ermolin M.S., Fedotov P.S., Malik N.A., Karandashev V.K.* Nanoparticles of volcanic ash as a carrier for toxic elements on the global scale // Chemosphere. 2018. V. 200. P. 16–22.
16. *Bergal–Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani N., Muravyev Y., Malik N., et al.* A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc. // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2017. 172: 35, doi:10.1007/s00410-017-1347-z.
17. *Taran Yu., Zelenski V., Chaplygin I., Malik N., et al.* Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): geochemistry and fluxes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2018. V. 19. № 6. P. 1859–1880. <https://doi.org/10.1029/2018GC007477>.

Другие публикации:

1. *Малик Н.А.* Состав пеплов ТТИ-50 // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 214–233.
2. *Зеленский М.Е., Малик Н.А., Таран Ю.А.* Вулканические газы ТТИ-50 // Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 234–239.
3. *Малик Н.А., 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.
4. *Овсянников А.А., Малик Н.А.* Тейра извержение вулкана Кизимен в декабре 2010 г. – феврале 2011 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. 57–61.
5. *Малик Н.А., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А.* Экологические аспекты начального этапа (октябрь 2010 – май 2011 гг.) извержения вулкана Кизимен, Камчатка // Мат-лы 6-й Международной конференции "Вулканизм, биосфера и экологические проблемы". Майкоп-Туапсе, 2011. С. 236–239.

6. *Дрознин В.А., Малик Н.А., Муравьев Я.Д., Овсянников Н.А.* Началось извержение Вулкана Кизимен (Центральная Камчатка) // Вопросы географии Камчатки, 2011. Вып. 13. С. 3–8.
7. *Малик Н.А., Максимов А.П., Ананьев В.В.* Извержение 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.
8. *Маневич Т.М., Малик Н.А., Маневич А.Г., Овсянников А.А.* Пирокластика извержения вулкана Карымский в 2005–2011 гг. // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 61–65.
9. *Бергаль-Кувикас О.В., Малик Н.А., Сероветников С.С., Клименко Е. С.* Первые результаты российско-японского проекта «Комплексные геологические и геофизические исследования Северной группы вулканов на Камчатке, прогноз и динамика извержений для обеспечения безопасности населения» // Материалы X региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». 28–29 ноября 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 69–84.
10. *Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М. и др.* Эмиссия элементов эруптивными газами ТТИ им. 50-летия ИВиС ДВО РАН // Материалы региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 28–29 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 92–105.
11. *Малик Н.А., Зеленский М.Е.* О температуре и составе газа фумарол вулкана Авачинский в 2012–2013 г. // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск–Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 94–97.
12. *Малик Н.А., Плутахина Е.Ю.* Самородная сера вулкана Кизимен // Материалы XII Региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле» 25 ноября 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 31–38.
13. *Плутахина Е.Ю., Малик Н.А.* Хлор и его соединения в продуктах фумарольной деятельности Авачинского вулкана (2013–14 гг.) // Материалы XIV региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки» 14 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 51–60.
14. *Округин В.М., Малик Н.А., Плутахина Е.Ю.* Экспериментальное изучение распределения химических элементов на Авачинском вулкане (2013–2014 гг.) // Материалы XXXII Крашенинниковских чтений. Петропавловск-Камчатский, 2015. С. 261–266.
15. *Малик Н.А.* 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.
16. *Округин В.М., Малик Н.А., Плутахина Е.Ю. и др.* Новые данные о возгонах и сублиматах Авачинского вулкана (2014–2015 гг.) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 – 30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 400–405.
17. *Малик Н.А., Моисеенко К.Б.* Особенности гранулометрического состава пеплов вулканов Камчатки и вулкана Алаид // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 119–124.