

На правах рукописи



003493896

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'В.В.' or similar, written in a cursive style.

ПОНОМАРЕВА Вера Викторовна

**КРУПНЕЙШИЕ ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ
И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ТЕФРЫ ДЛЯ ДАТИРОВАНИЯ
И КОРРЕЛЯЦИИ ФОРМ РЕЛЬЕФА И ОТЛОЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.25 – Геоморфология и эволюционная география

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва, 2010

18 МАР 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН

Официальные оппоненты: Доктор географических наук,
профессор
Герман Сергеевич Ананьев

Доктор геолого-минералогических наук
Борис Григорьевич Поляк

Доктор географических наук
Валерий Павлович Чичагов

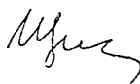
Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения РАН

Защита состоится **12 марта 2010 г. в 11 часов** на заседании диссертационного
совета Д 002.046.04 при Учреждении Российской академии наук Институт
географии РАН по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 29; факс (495)
9590033; адрес электронной почты: igras@igras.geonet.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН

Автореферат разослан 10 февраля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.н.



И.С. Зайцева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Из всех вулканических явлений пеплопад – это наиболее частое событие. Площадь, на которую может повлиять крупный пеплопад, на порядки превышает площадь зоны воздействия других вулканических процессов. При сильном извержении тефра (вулканический пепел) может выпасть за тысячи километров от вулкана, а связанные с эруптивным облаком аэрозоли могут оказывать воздействие на природную среду в глобальном масштабе. В то же время роль вулканизма в долгосрочных изменениях природной среды и климата и, как следствие, в изменении условий жизни человечества пока еще не установлена. Оценки роли вулканизма варьируют от признания его основной причиной оледенений и других глобальных изменений климата до полного отрицания его воздействия на природную среду в региональном или глобальном масштабах. Одной из причин таких различий в оценке роли вулканизма как фактора воздействия на природную среду является недостаточная изученность вулканизма и прежде всего неполнота летописи эксплозивных извержений. Многие сильнейшие извержения даже за последние 40-50 тысяч лет еще не реконструированы, несмотря на то, что такие извержения оставили вполне весомые геологические следы: поля игнимбритов, прослои пеплов в глубоководных скважинах и огромные кальдерные депрессии. Поэтому нельзя взять готовую глобальную летопись крупнейших извержений, чтобы сравнить пики эксплозивного вулканизма с другими данными и оценить возможное влияние извержений на другие природные процессы.

В последние два десятилетия во всем мире активно ведется работа по документированию и датированию крупнейших эксплозивных извержений. Данная работа, посвященная реконструкции параметров крупнейших голоценовых извержений Камчатки, распределению их во времени и сравнению данных по Камчатке с данными по другим островным дугам и миру в целом, вносит значительный вклад в глобальную летопись крупнейших извержений, что и определяет ее актуальность.

Основная цель работы состояла в реконструкции параметров крупнейших голоценовых эксплозивных вулканических извержений Камчатки и изучении их распределения во времени в сопоставлении с летописями аналогичных извержений в пределах соседних островных дуг и мира в целом. Кроме того, в цели работы входила разработка системы геохронологических реперов (изохрон) для датирования различных форм рельефа и отложений Камчатки и прилежащих акваторий, основанной на использовании горизонтов тефры реконструированных крупнейших извержений, и датирование с ее помощью этапов эндогенного рельефообразования.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- разработать методы реконструкции прошлых эксплозивных вулканических извержений, установить особенности захоронения их продуктов в различных климатических и седиментационных обстановках;
- реконструировать крупнейшие голоценовые эксплозивные извержения вулканов Камчатки;

- изучить временное распределение крупнейших вулканических извержений Камчатки и сопоставить полученные результаты с данными по другим островным дугам Тихоокеанского огненного кольца и по миру в целом;
- разработать методы корреляции горизонтов тефры и использования этих горизонтов как инструментов для датирования голоценовых форм рельефа и отложений при различных палеогеографических и геоморфологических исследованиях;
- используя разработанную систему геохронологических реперов, провести сопоставление геологических летописей различных катастрофических природных событий (этапов формирования вулканических построек, тектонических и вулкано-тектонических обвалов, подвижек по активным разломам и т.п.) и выявить этапы активизации процессов эндогенного рельефообразования на Камчатке.

Методы и районы исследования. В процессе реконструкции летописи эксплозивных извержений нами применялись прежде всего тефрохронологический метод, геолого-геоморфологическое картографирование и радиоуглеродное датирование. Для изучения вещественного состава изверженных продуктов использованы данные минералогического и химического анализа, полученные с помощью электронного микроскопа, рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), метода "мокрой химии". Для изучения распределения эксплозивных извержений во времени были применены методы математической статистики (в соавторстве). Основным научным "полигоном" в данном исследовании является полуостров Камчатка. Кроме того, для сравнения привлечены данные автора по таким районам, как Аляска, Курильские острова, Япония, Филиппины и Средиземноморье (о. Стромболи).

Личный вклад автора. В основу диссертации положены данные, собранные автором за 30 лет полевых работ на активных вулканах Камчатки и Курильских островов, а также данные, полученные в результате аналитической обработки полевых материалов и образцов. Фактический материал включает более тысячи описанных автором разрезов почвенно-пирокластического чехла и других позднелейстоцен-голоценовых отложений, составленные автором геолого-геоморфологические карты отдельных вулканов и карты изопактов тефры различных извержений, а также более тысячи радиоуглеродных дат, полученных в Лаборатории геохимии изотопов и геохронологии Геологического института РАН, как правило, при участии автора, и несколько тысяч химических анализов как валовых образцов тефры, так и отдельных ее компонентов. Кроме этого, автором использованы обширные литературные данные о различных аспектах эксплозивного вулканизма, включая каталоги эксплозивных извержений и реконструкции параметров отдельных извержений с приведением необходимых ссылок на первоисточники. Для сопоставления пиков эксплозивного вулканизма с изменениями климата использованы литературные данные о климатах голоцена, а также данные палинологических и палеоботанических исследований на Камчатке.

Защищаемые положения:

1. Для крупного региона (Камчатка) создана детальная летопись голоценовых эксплозивных извержений с объемом пирокластики $\geq 1 \text{ км}^3$, что вносит значительный вклад в мировую летопись эксплозивного вулканизма (~14% известных извержений такого масштаба). Для выявления эксплозивных извержений, реконструкции их параметров, определения состава и объема пирокластических продуктов разработана и применена единая комплексная методика, включающая тефрохронологические исследования, радиоуглеродное датирование, изучение минерального и химического состава тефры, а также геолого-геоморфологическое картографирование.
2. Крупнейшие эксплозивные извержения вулканов Камчатки имели тенденцию к группированию во времени, причем самые крупные вспышки эксплозивного вулканизма имели место 8700-6800 и 1800-1400 калиброванных лет назад (л.н.). Сопоставление камчатской летописи голоценового эксплозивного вулканизма с летописями аналогичных извержений других островных дуг и мира в целом показало наличие в них близких по времени периодов усиления эксплозивной активности.
3. Наиболее крупным голоценовым извержением на Камчатке и одним из пяти крупнейших голоценовых извержений мира с объемом продуктов около 200 км^3 является извержение, приведшее к образованию кальдеры Курильского озера ~8500 л.н. Тефра этого извержения распространилась на расстояние более 1700 км от источника, а область погребения и практически полного уничтожения растительности (при мощности пирокластики более 70-100 см) составила 5000-6000 км^2 .
4. Самым активным эксплозивным вулканом на Камчатке в голоцене был вулкан Шивелуч. Крупные извержения с объемом выброшенных продуктов $\geq 0.6-0.8 \text{ км}^3$ происходили по меньшей мере 23 раза за голоцен, т.е. в среднем 2 извержения за 1000 лет. Деятельность вулкана Шивелуч была неравномерной во времени: три основных периода усиления активности имели место 10500-8400 л.н.; 4600-3700 л.н. и в последние 2900 лет. Тефра вулкана распространялась на расстояние $>350 \text{ км}$ от его кратера.
5. На основе исследования горизонтов тефры крупных извержений Камчатки создана уникальная система геохронологических реперов (изохрон), которая позволяет датировать и коррелировать этапы формирования голоценовых форм рельефа и отложений. С ее использованием выделены основные периоды общекамчатской активизации процессов эндогенного рельефообразования: 1) раннеголоценовый (ранее 11000 л.н.); 2) 8600-8100 л.н.; 3) 7300-6100 л.н.; 4) 4700-3800 л.н.; 5) 1800-1000 л.н. Система геохронологических реперов имеет важный потенциал для палеогеографических и геоморфологических исследований в пределах Камчатки и прилегающих акваторий и должна быть использована для непосредственного сопоставления палеоклиматических, палеоокеанологических, археологических и других данных.

Научная новизна данной работы заключается в том, что в ней впервые обобщен и проанализирован полученный автором обширный материал по голоценовому вулканизму Камчатки и проведено сравнение полученных для этого ре-

гиона данных с данными по вулканизму других островных дуг и всего мира. Впервые детально рассмотрены особенности захоронения тефры в различных осадках. Разработаны методы реконструкции прошлых эксплозивных извержений. Получена летопись крупнейших голоценовых эксплозивных извержений вулканов Камчатки и проведено сравнение ее с таковыми для сопредельных регионов и всего мира. Установлено, что крупнейшие эксплозивные извержения имеют тенденцию к группированию во времени. Впервые с помощью корреляции горизонтов тефры проведено сопоставление геологических летописей различных катастрофических природных событий Камчатки (этапов формирования вулканических построек, крупных тектонических и вулкано-тектонических обвалов, подвижек по активным разломам и т.п.) и выявлены общие периоды активизации эндогенных рельефообразующих процессов в голоцене.

Практическая значимость. Проведенные автором исследования крупнейших извержений Камчатки и режима активности ряда вулканов полуострова позволили дать долгосрочный прогноз вулканической активности для изученных вулканов и установить зоны различной степени поражения природной среды при эксплозивных извержениях. Датирование подвижек по разломам с помощью маркирующих горизонтов тефры показало, что при оценке сейсмической опасности на Камчатке необходимо учитывать сейсмический потенциал коровых разломов, которые неоднократно вызывали сильные землетрясения в течение голоцена и могут вызвать их в будущем. В практическом плане результаты работ явятся основой для разработки мероприятий и рекомендаций по минимизации ущерба для населения и хозяйственных объектов, расположенных вблизи активных вулканов и разломов с учетом характера, силы и частоты возможных вулканических извержений и землетрясений.

Апробация работы, публикации. Материалы, которые легли в основу диссертационной работы, были представлены на XIV Конгрессе ИНКВА (Берлин, ФРГ, 1995); на совещании Европейского геофизического союза (Гаага, Нидерланды, 1996); Конгрессах Международного Союза Геофизики и Геодезии (IUGG) (Боулдер, США, 1995; Бирмингем, Соединенное Королевство, 1999); Международном Геологическом Конгрессе (Флоренция, Италия, 2004); на Генеральных ассамблеях Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (IAVCEI) (Пуэрто-Вайярта, Мексика, 1997; Рейкьявик, Исландия, 2008); на совещаниях Американского Геофизического Союза (Сан-Франциско, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008); Чапмановской конференции Американского Геофизического Союза (Филиппины, 2005); на совещаниях в рамках Международной Программы Геологической Корреляции (Милан, Италия, 2001; Сантьяго, Чили, 2002; Петропавловск-Камчатский, 2003); на Всероссийском совещании по изучению четвертичного периода (Москва, 1994) и на других международных и российских конференциях и совещаниях. Материалы диссертации дважды докладывались на заседаниях Лаборатории эволюционной географии Института географии РАН, а также на заседаниях Центра четвертичных исследований Университета штата Вашингтон (США) и в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

По теме диссертации опубликовано более 70 работ (из них 29 работ в международных журналах и монографиях, 11 - в отечественных монографиях).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (358 наименований) и приложения и содержит 255 страниц текста, 81 рисунок и 19 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему учителю и коллеге к.г.н. О.А.Брайцевой за руководство, многолетнее сотрудничество и поддержку. Автор выражает искреннюю благодарность академику В.И.Коваленко за постоянную поддержку этих исследований и профессору А.А.Величко за поддержку и ценные рекомендации. Автор благодарит своих коллег, сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН д.г.-м.н. И.В.Мелекесцева, д.ф.-м.н. А.А.Гусева, д.г.-м.н. Г.П.Авдейко, И.В.Флоренского, к.г.н. Т.К.Пинегину, Л.И.Базанову, к.г.н. О.В.Дирксена, а также сотрудников Геологического института РАН Л.Д.Сулержицкого, к.г.-м.н. М.М.Певзнер, к.г.-м.н. Н.Е.Зарецкую, к.г.-м.н. А.И.Кожурина за многолетнее сотрудничество, помощь на всех этапах работы, плодотворный обмен мнениями и доброжелательную критику. Эта работа была бы невозможна без огромного количества радиоуглеродных дат, полученных в Геологическом институте РАН Л.Д.Сулержицким и его учениками. Многочисленные микрозондовые анализы вулканических стекол были выполнены с помощью профессора Ф.Кайла (Институт горного дела штата Нью-Мексико, США) и к.г.-м.н. М.В.Портнягина (ГЕОМАР, Германия). Автор признателен сотрудникам Института географии РАН чл.-корр. РАН д.г.н. О.Н.Соломиной и к.г.н. И.И.Спасской за критическое чтение и обсуждение первого варианта рукописи, а также благодарит д.г.н. О.К.Борисову, к.г.н. Е.Ю.Новенко и других сотрудников Лаборатории эволюционной географии ИГ РАН за критические замечания. Полевые и лабораторные исследования осуществлялись прежде всего благодаря финансовой поддержке РФФИ, Программы 16 Президиума РАН и Национального Географического общества (США).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Вулканизм и его воздействие на природную среду

В разделе 1.1 рассмотрено современное распределение вулканов по земному шару. Показано, что вулканические проявления широко распространены на земном шаре и встречаются на различных широтах, в различных тектонических и климатических обстановках. Широтное положение вулканов в большой степени определяет влияние его крупнейших эксплозивных извержений на климат. Две трети наземных голоценовых вулканов расположены в северном полушарии и всего лишь одна пятая находится между 10° ю.ш. и Южным полюсом (Simkin and Siebert, 2002-). Этот факт указывает на то, что наземный вулканизм может воздействовать на климат северного полушария в большей степени. Две трети наземных голоценовых вулканов (более 1000) входят в так называемое «Огненное кольцо», окружающее Тихий океан.

В разделе 1.2 рассматриваются различные проявления вулканизма и приводится составленная автором сводка о характере и дальности их воздействия (Табл. 1). Связанные с вулканами явления, воздействующие на природную среду и человека, можно схематично свести к следующему набору событий:

1. Обрушение части вулканической постройки и образование обломочной лавины.
2. Направленный взрыв.
3. Выброс тефры и образование эруптивного облака.
4. Образование пирокластических потоков.
5. Излияние лавовых потоков.
6. Сход обломочных потоков (лахаров).

Крупнейшие голоценовые обломочные лавины как на Камчатке, так и во всем мире имели объем до 10 км^3 , дальность пробега около 30 км, площади более 200 км^2 . Для позднего плейстоцена установлены отложения обломочных лавин в 2-3 раза большего объема. В связи с практически мгновенным распространением на значительные площади, обломочные лавины на вулканах являются одним из опаснейших и плохо прогнозируемых явлений. И все же дальность их воздействия ограничена первыми десятками километров (Табл. 1).

Выброс пирокластического материала происходит практически при каждом извержении и может включать выброс пирокластического материала направленным взрывом, выброс обломков по баллистической траектории, извержение тефры и образование пирокластических потоков. Дальность воздействия направленного взрыва и баллистических обломков не превышает 20-30 км, пирокластических потоков – 100 км, в то время как площадь, на которую может повлиять крупный пеплопад, на порядки превышает площади зон воздействия других вулканических процессов. В зависимости от силы извержения, а также размера и плотности частиц, тефра может воздействовать на районы, удаленные на тысячи километров от вулкана. Пепел позднелейстоценового извержения Тоба был обнаружен за 3000 км от источника (Rose et al., 1990), а пепел голоценового извержения, связанного с образованием кальдеры Аньякчак на Аляске, – в ледниковом керне из Гренландии на расстоянии около 4500 км от источника (Pearce et al., 2004). Такой дальний перенос пепла объясняется тем, что пепловое облако сильного извержения достигает верхних слоев атмосферы и попадает в струйные течения, которые и переносят тончайший пепел на огромные расстояния. На распространение пепловой тучи оказывает влияние не только сила извержения, но и положение центра извержения на земном шаре. Пепловые тучи высоких широт скорее всего отложат пепел в "своем" полушарии, в то время, как пепловые тучи тропиков могут распространиться до высоких широт обоих полушарий. Кроме твердых частиц, эруптивная туча состоит из газов, самыми распространенными из которых являются водяной пар, углекислый газ и двуокись серы. Вулканический смог, образующийся при взаимодействии вулканических газов с кислородом, пылью, влагой и солнечным светом, представляет собой видимую дымку, которая состоит из газа и подвешенной смеси мельчайших жидких и твердых частиц, называемой аэрозолями. Основными компонентами аэрозолей в таком смоге являются серная кислота и другие со-

Таблица 1. Характер и дальность воздействия различных вулканических проявлений в голоцене

Тип проявления	Скорость распространения, км/час	Расстояние от вулкана, км	Состояние материала	Характер благоприятного воздействия	Характер неблагоприятного воздействия
Обломочная лавина	240-290	30	Как правило, холодный (за исключением материала активного купола)	-	Полностью уничтожает все живое и погребает рельеф
Направленный взрыв	> 1000	29	Раскаленный	-	Ударное латеральное воздействие: поваленные деревья, снесенные постройки; сжигание древесины
Эруптивное облако: тефра	< 500	4500	Как правило, холодный	Вдали от вулкана: увеличение плодородия почв	Вблизи вулкана: уничтожение растительность, резкое увеличение твердого стока рек, вплоть до образования водно-пирокластических потоков; создание нагрузки на подстилающую поверхность, особенно в мокром виде (обрушения крыш); переотложение ветром с образованием пыльных бурь. Вдали от вулкана: повреждение растений твердыми частицами, загрязнение атмосферы и водных резервуаров, повреждение моторов самолетов и прочей техники, перенос соединений галогенов, тяжелых металлов и серы.

Эруптивное облако: газы				-	Кислотные дожди (повреждение растений и механизмов), образование зон концентрации двуокиси углерода, замутнение атмосферы и влияние на средние глобальные температуры
Обломки, вылетающие из кратера по баллистической траектории		до 20	Раскаленный вблизи кратера, холодный - на расстоянии	-	Повреждение растительности и живых существ
Пирокластические потоки и пирокластические волны	~750	100	Раскаленный	-	Полностью уничтожают (сжигают и погребают) все живое. Потоки обычно приурочены к понижениям в рельефе, волны распространяются почти независимо от рельефа
Лавовые потоки	до 100	30	Раскаленный	-	Полностью погребают все живое, вызывают пожары; обычно приурочены к понижениям в рельефе.
Лахары	~65	100	Как правило, холодный	Образование идеально ровных поверхностей, которые часто используются под строительство	Вблизи источника: перемещение деревьев, домов, крупных обломков пород В нижнем течении: погребение территории под плащом грязи.

единения серы, которые в наибольшей степени ответственны за климатический эффект крупнейших эксплозивных извержений.

Лахары (потоки смеси вулканического обломочного материала и воды) могут покрывать расстояния до 100 км от вулкана (Табл. 1) и затопливать огромные территории. Особым типом лахара можно считать так называемый "hyurg-concentrated density current", в котором роль твердой составляющей играет легкая плавучая пемза. Пемзово-водные потоки образуются при прорыве кратерного озера или при массовом таянии снега при контакте с раскаленной пирокластикой.

В разделе 1.3 рассмотрен сценарий типичного крупного эксплозивного извержения и его воздействие на природную среду. Перед извержением обычно происходят землетрясения, сопровождающие подъем магмы к поверхности. Сила этих землетрясений может варьировать в широких пределах; они могут приводить к крупным обвалам как самих вулканических построек, так и окружающих гор. Кроме того, при продвижении магмы могут происходить значительные деформации земной поверхности. Затем происходит извержение с выбросом тefры и обломков, вылетающих из кратера по баллистической траектории (Табл. 1). При уменьшении интенсивности выноса пирокластического материала происходит обрушение эруптивной колонны и образование пирокластических потоков. Они погребают и сжигают все на своем пути. Практически вся растительность на площади, исчисляющейся сотнями и тысячами квадратных километров, погребается и/или сжигается. При контакте пирокластических потоков со снегом и льдом образуются лахары и пемзово-водные потоки. При опустошении корового магматического очага может произойти обрушение его кровли, сопровождающееся землетрясениями и обвалами и приводящее к образованию кальдерной депрессии. Эруптивная туча распространяется под действием ветра, а ее верхняя часть достигает стратосферы и разносится струйным течением вокруг земного шара. Твердые частицы удаляются из стратосферы (выпадают) в течение месяца после извержения (Pinto et al., 1989) и, таким образом, оказывают незначительное воздействие на климат. Содержащие серу вулканические газы гораздо в большей степени ответственны за воздействие вулканических извержений на климат. Считается установленным, что вулканическое извержение может воздействовать на климат в глобальном масштабе. В качестве примеров доказанного удаленного или даже глобального воздействия исторических вулканических извержений можно привести детально описанный в литературе "год без лета", наступивший в 1816 г., через год после извержения в Тамбора (апрель, 1815 г.).

В разделе 1.4 рассмотрена возможная роль вулканизма в изменениях природной среды и климата. В настоящее время сосуществуют диаметрально противоположные представления о роли вулканизма в изменениях природной среды и климата и в истории человечества. С одной стороны, вулканизм рассматривается как главный фактор таких крупнейших изменений природной среды, как те, что привели к вымиранию динозавров (Мелекесцев, 1979; MacLeod, Keller, 1996), оледенениям (Мелекесцев, 1969; Prueher, Rea, 1998), гибели цивилизаций (Минойская культура: LaMoreaux P. E., 1995; Содом и Гоморра, Три-

фонов, Караханян, 2004). Считается, что извержение вулкана Тоба ~74 тыс. лет назад чуть не привело к гибели человеческого рода (Ambrose, 1998). Утверждается, что именно вулканизм определяет, будут ли циклы Миланковича выражены в виде ледниковых периодов или нет (Langmuir, Huybers, 2008). Несмотря на это, большинство авторов палеоклиматических и палеоокеанологических исследований в удаленных от современных вулканов районах вообще не упоминает вулканизм в числе факторов, могущих иметь воздействие на природную среду в региональном и глобальном масштабах.

Причина такого разнobia в оценке роли вулканизма лежит в недостаточной изученности вулканизма и отсутствии детальной летописи сильнейших эксплозивных извержений мира. Многие крупные извержения даже за последние 40 тыс. лет еще не задокументированы, несмотря на то, что такие извержения оставили вполне весомые следы: поля игнимбритов, прослои пеплов в глубоководных скважинах и огромные кальдерные депрессии. Поэтому нельзя взять готовую летопись, чтобы сравнить пики эксплозивного вулканизма с другими данными и оценить возможное влияние извержений на другие природные процессы. Первое описание извержения было сделано очевидцем еще в 79 г. н.э. (классическое описание катастрофического извержения вулкана Везувий, оставленное Плинием-младшим). Тем не менее, за последующие почти 2000 лет, за которые произошло как минимум 20 эксплозивных извержений с объемом пирокластики $\geq 10 \text{ км}^3$ и три с объемом $\geq 100 \text{ км}^3$, только три таких извержения (Тамбора, 1815; Кракатау, 1883; и Пинатубо, 1991) были внятно описаны очевидцами. Это говорит о том, что лисьменно зафиксированный непосредственный опыт человечества в этой области крайне мал.

Изучение и датирование следов крупных извержений вблизи их источников в последние десятилетия активно ведется во многих районах мира. Сравнение каталогов извержений, составленных в 1970-80-ых гг. (например, Гущенко, 1979), с современным каталогом (Simkin, Siebert, 2002-) показывает существенный "прирост" количества активных вулканов и сильных прошлых извержений за последние пару десятилетий. Из примерно 20 сильнейших эксплозивных извержений нашей эры в каталоге 1979 г. присутствуют лишь пять, а из двадцати вулканов-источников сильнейших извержений семи вообще нет в перечне вулканов 1979 г. Это показывает, что летопись крупнейших извержений даже для нашей эры, не говоря уже о позднем плейстоцене и голоцене, создается прямо на наших глазах. Наиболее полные летописи голоценовых эксплозивных извержений имеются для таких районов как Япония (Machida, Arai, 1992), Исландия (Hafliðason et al., 2000), Камчатка (Брайцева, Пономарева и др., 1997; Gusev, Ponomareva et al., 2003, Ponomareva et al., 2007a,b). Тем не менее, до сих пор есть целый ряд районов, даже в развитых странах, в которых установлены лишь некоторые крупные голоценовые извержения (например, Курильские острова, Аляска). Еще больше пробелов в глобальной летописи крупнейших плейстоценовых вулканических извержений.

Таким образом, получение глобальной летописи крупнейших извержений является важнейшей задачей, которую необходимо решить для оценки роли вулканизма в изменениях природной среды. Главным агентом, оказывающим

воздействие на природную среду не только в региональном, но и глобальном масштабах, являются эруптивные облака, нагруженные частицами тефры и аэрозолями, формирующиеся в результате сильнейших эксплозивных извержений. Большая часть исторических наземных вулканических извержений произошла в зонах субдукции. Вдоль них проживает и большая часть населения мира, причем самая быстрорастущая его часть.

Глава 2. Общая характеристика молодого вулканизма Камчатки

В этой главе представлены данные о последнем периоде вулканической активности на Камчатке (50-60 тысяч лет назад (тыс.л.н.) – настоящее время) и рассмотрены те особенности вулканических форм рельефа и отложений Камчатки, которые необходимы для реконструкции крупнейших эксплозивных извержений и характеристики горизонтов их тефры, а также для восстановления этапов формирования вулканических построек.

В разделе 2.1 рассмотрено тектоническое положение и пространственное распределение вулканов Камчатки. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки обязан своим существованием субдукции Тихоокеанской плиты под полуостров. Тридцать семь крупных вулканических центров Камчатки проявляли активность в голоцене. Кроме того, образовалось несколько сотен моногенных центров (шлаковых конусов, мааров, экструзивных куполов и т.п.). Молодые камчатские вулканы принято объединять в два вулканических пояса: Восточный вулканический пояс и Срединный хребет (СР). Восточный пояс можно далее подразделить на фронтальную вулканическую зону и зону Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) (рис. 1). Все три вулканических зоны в плане надстраивают друг друга кулисообразно с юго-востока на северо-запад. В пределах этих зон большинство вулканических построек сконцентрировано в осевых зонах шириной 10-15 км.

В разделе 2.2 приведены данные о возрастном расчленении позднеплейстоценовых вулканических построек Камчатки. Поскольку для них имеется лишь незначительное количество определений возраста радиометрическими методами, оценки их возраста основаны в основном на морфологии и стратиграфическом соотношении их продуктов с ледниковыми отложениями. Вулканы, которые начали формироваться около 50-60 тыс. лет назад, между двумя максимумами позднеплейстоценового оледенения, умеренно затронуты эрозией и окружены моренами (Мелекесцев, 1973). Более молодые позднеплейстоценовые вулканы в основном сохраняют свою первичную морфологию и большинство из них продолжало свою активность и в голоцене (Braitseva,... Ponomareva et al., 1995). Гораздо лучше обстоит дело с определением возраста в пределах возможностей радиоуглеродного метода (последние 40-50 тыс. лет). Ряд кальдер и связанных с ними игнимбритовых полей образовался между 30 и 40 тыс. лет назад (Braitseva,... Ponomareva et al., 1995). Лучше всего датированы голоценовые вулканические отложения и формы рельефа (более 1000 ^{14}C дат).

В разделе 2.3 рассмотрен голоценовый вулканизм Камчатки. Послеледниковые вулканические отложения и формы рельефа хорошо сохранились в условиях Камчатки. Они покрыты так называемым почвенно-пирокластическим чех-

лом, который представляет собой непрерывно накапливающийся "слоеный пирог", состоящий из горизонтов тефры и супесей, в разной степени обогащенных органическим веществом (рис. 2). На Камчатке такой чехол имеет голоценовый возраст: радиоуглеродные даты, полученные для его основания, обычно лежат в пределах ~9.5-10 тысяч ^{14}C лет, иногда до 12 тысяч лет. Более ранние аналогичные отложения были почти нацело уничтожены во время оледенения и встречаются только в отдельных обнажениях.

В течение голоцена на Камчатке образовалось пять кальдер, связанных с эксплозивными извержениями: Карымская, три кальдеры в массиве Ксудач и кальдера Курильского озера (рис. 1). Большинство стратовулканов возникли или в самом конце позднего плейстоцена, или даже в голоцене и активно росли в течение голоцена. Детальное геолого-геоморфологическое картографирование вулканов Камчатки показало, что по меньшей мере 18 из них испытали секторные обрушения построек, некоторые из них неоднократно (Ponomareva et al., 2006). На Камчатке имеется несколько зон многовыходного вулканизма, сложенные лавовыми потоками шлаковых конусов (Седанкинский дол, Толбачинский дол и Толмачев дол). Другим типом моногенных вулканических аппаратов являются крупные кратеры, из которых произошло извержение большого объема риолитовой тефры. Три таких голоценовых кратера расположены на Южной Камчатке: кратер Чаша, расположенный среди шлаковых конусов Толмачева дола, Бараний Амфитеатр на ВЮВ склоне в.Опала и Ходуткинский кратер к северо-западу от в.Ходутка.

Общая масса вулканических пород, изверженных в течение позднего плейстоцена-голоцена, по оценке И.В.Мелекесцева составляет $(18 - 19) \times 10^{12}$ тонн. Самым продуктивным в этот период был вулканический пояс ЦКД (~40% всех изверженных пород). Доля фронтальной зоны составила 35%. Вулканический пояс СХ уступил двум другим поясам (только 25%). Наивысшая продуктивность наблюдалась в ЦКД. Крупнейшие позднплейстоцен-голоценовые стратовулканы достигали объема 320 км^3 или массы $\sim 0.74 \times 10^{12}$ тонн (включая тефру). Самый маленький голоценовый стратовулкан - конус Штюбеля в массиве Ксудач. Он имеет объем $\sim 2 \text{ км}^3$, а масса его пород равна $\sim 0.005 \times 10^{12}$ тонн.

В разделе 2.4 рассмотрен состав позднплейстоцен-голоценовых вулканических пород Камчатки в той мере, какая необходима для привязки горизонтов вулканических пеплов к вулканам-источникам. На Камчатке в целом наблюдаются систематические геохимические вариации состава вулканических продуктов от фронта к тылу вулканической дуги. Низко-калиевые породы встречаются на многих вулканах фронтальной вулканической зоны, расположенных ближе всего к желобу. С остальными вулканами фронтальной вулканической зоны связаны умеренно-калиевые породы. Вулканические продукты Срединного хребта имеют преимущественно высоко-калиевый состав, а породы ЦКД занимают промежуточное положение между фронтальной зоной и Срединным хребтом. Эта общая картина позволяет на основе изучения химического состава какой-либо тефры определять ее вулкан-источник.

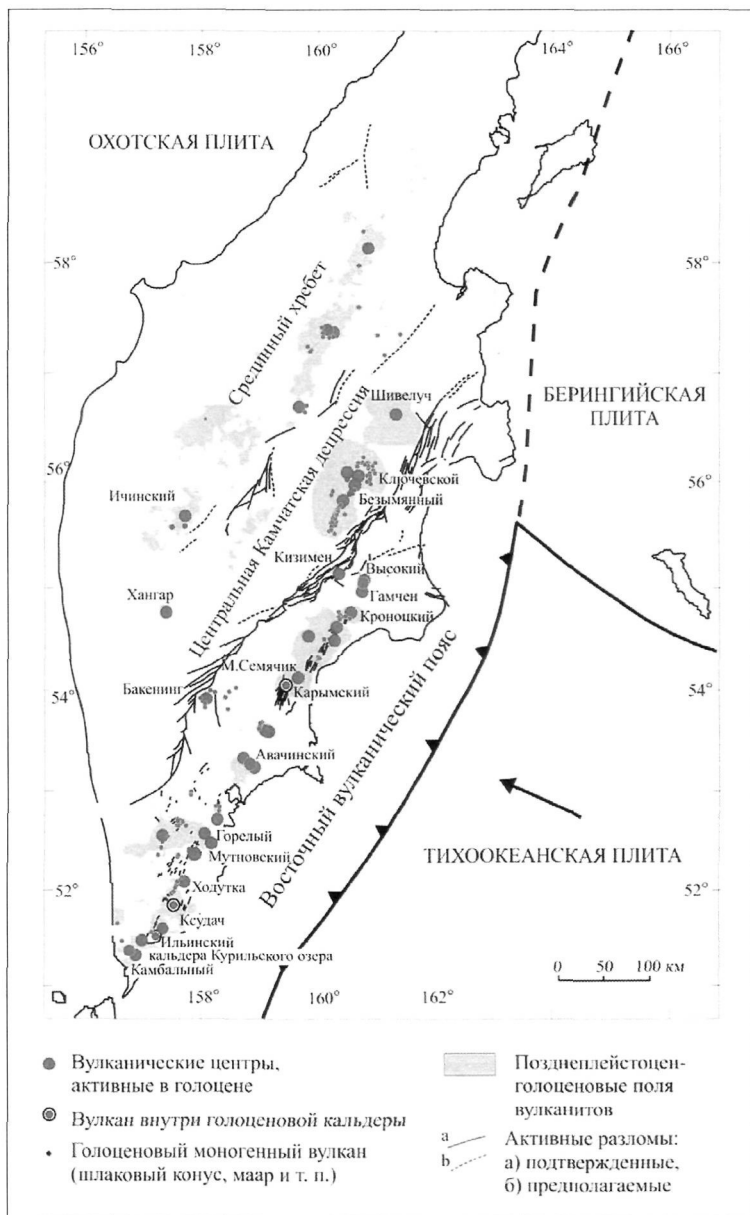


Рис. 1. Вулканы Камчатки, действовавшие в голоцене, и поля вулканогенного рельефа, созданные в позднем плейстоцене-голоцене (согласно работе Ponomareva et al., 2007a). Основные системы активных разломов по работе Kozhurin (2004).

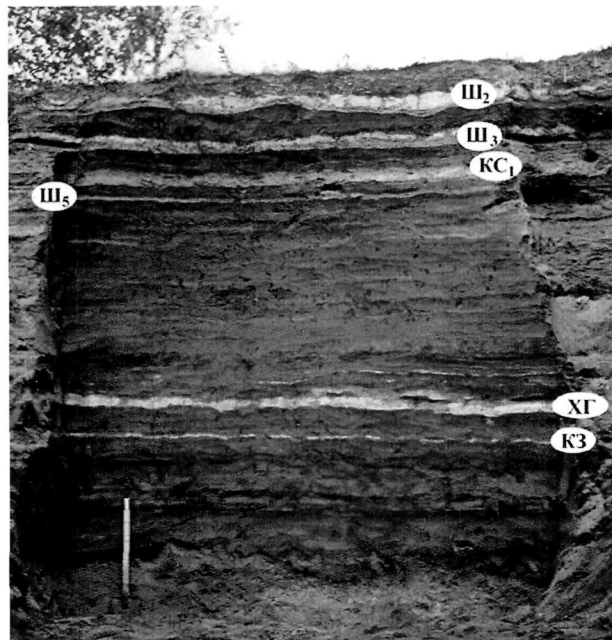
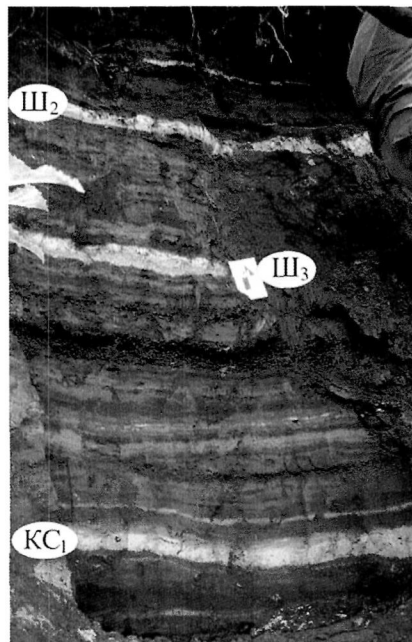


Рис. 2. Разрезы почвенно-пирокластического чехла в Ключевской группе вулканов. Слева: фрагмент чехла на расстоянии 15 км от в. Ключевской, мощность фрагмента около 1м, средняя скорость накопления за голоцен – 1 мм в год. Справа: полный голоценовый чехол, перекрывающий ледниковые отложения в пос. Ключи, в 30 км от в.Ключевского и 45 км от в.Шивелуч, мощность около 3 м, средняя скорость накопления – 0.35 мм в год. Маркированы горизонты тефры крупнейших эксплозивных извержений: Ш₂ (950 ¹⁴С лет); Ш₃ (1400 ¹⁴С лет), КС₁ (1800 ¹⁴С лет), Ш₅ (2550 ¹⁴С лет), ХГ (6850 ¹⁴С лет), КЗ (7550 ¹⁴С лет). Фото автора (слева) и Л.Д.Сулержицкого.

Глава 3. Характер "вулканического сигнала" в различных обстановках осадконакопления и методы реконструкции голоценовых эксплозивных извержений

Подбор методов для реконструкции крупнейших эксплозивных извержений и разработки их глобальной летописи зависят от характера "сигнала" - следа, оставленного извержениями в различных природных обстановках осадконакопления.

В разделе 3.1 рассмотрены вулканические отложения и формы рельефа, образованные крупнейшими эксплозивными извержениями вблизи вулкана. Отложения представлены мощными пачками тефры и отложений пирокластических потоков, а формы рельефа - кальдерами, кратерами и равнинами пирокластических потоков. Установить сам факт крупного эксплозивного извержения на основании находки его продуктов вблизи источника еще недостаточно для оценки его возможного воздействия на природную среду. Поскольку для большинства крупных эксплозивных извержений большую часть объема выброшенной пирокластики составляет тефра, то необходимо установить ее распространение, оценить объем и выяснить содержание в ней летучих.

Раздел 3.2 посвящен рассмотрению особенностей захоронения и сохранности тефры в районах, удаленных от центра извержения. В наземных условиях пеплы сохраняются тем лучше, чем скорее накапливаются перекрывающие их осадки. Одним из лучших "архивов", сохраняющих даже маломощные прослои пеплов, является торф, накапливающийся со скоростью >0.3 мм/год. Прекрасно сохраняются слои тефры в золовых отложениях, даже среди песков береговых дюн. Образованный пеплами и погребенными гумусовыми горизонтами своеобразный "слоеный пирог" у почвоведов получил название слоисто-пепловая вулканическая почва (Соколов, 1973), а у геоморфологов - почвенно-пирокластический чехол (Мелекесцев и др., 19696). Такой чехол представляет собой непрерывную летопись эксплозивных извержений. Мощность чехла возрастает при приближении к активным вулканам.

Так, полный голоценовый разрез на подножии вулкана Ключевского имеет мощность около 12 м и содержит более сотни хорошо различимых по цвету, крупности, стратификации и прочим признакам прослоев тефры как самого в. Ключевского, так и удаленных вулканов. Практически постоянно поступающая тефра слабых извержений Ключевского создает общий темный фон разреза, на котором прекрасно выражены горизонты тефры более сильных извержений и маркирующие горизонты пеплов (рис. 2, левая фотография). Среднюю скорость накопления почвенно-пирокластического чехла в голоcene здесь можно оценить в 1 мм/год. На расстоянии же 30 км от вулкана, в пос. Ключи, полный голоценовый чехол имеет мощность всего 3 м и здесь фон образуют светлые золовые супеси, образованные прежде всего за счет перевевания андезитовых пеплов умеренных извержений в. Шивелуч. Большинство пеплов умеренных извержений в. Ключевского здесь имело незначительные первоначальные мощности и они не выражены в виде отдельных прослоев. Общее количество визуальных различимых прослоев пеплов в разрезе пос.Ключи около 50 (рис. 2, правая

фотография), средняя скорость накопления почвенно-пирокластического чехла - 0.35 мм/год.

Особые условия накопления и залегания пеплов наблюдаются в озерных и морских скважинах. Часто считается, что отложения, вскрытые скважинами в центральной части озер, представляют собой идеальную летопись вулканических извержений, где горизонты пеплов разделяются слоями довольно быстро накапливающихся илов, глин или сапропелей. Однако детальное бурение отложений одного и того же озера показывает, что колонки, полученные в его разных частях, могут сильно отличаться как по набору визуально различных пеплов, так и по мощности и характеру разделяющих их осадков (Boygale, 1999; Takemura et al., 2000). По-видимому, это может происходить вследствие неравномерного накопления озерных осадков в различных частях озера, донных течений, биотурбаций, неодновременного таяния ледяного покрова и т.п. Если пепел опускается на рыхлые водонасыщенные осадки, его различные по удельному весу частицы попадают на разные вертикальные уровни разреза отложений, то есть в буровой колонке скопления пепловых частиц могут встречаться существенно ниже своего истинного стратиграфического уровня.

Горизонты тефры, связанной с крупными эксплозивными извержениями вулканов Камчатки, чаще всего изучались в разрезах почвенно-пирокластического чехла, поскольку он является самым распространенным типом голоценовых субэдральных отложений в пределах полуострова. Ряд эталонных разрезов тефры для разных частей полуострова был получен при исследованиях торфяников (Певзнер, Пономарева и др., 1997, 2006; Zaretskaia, Ponomareva et al., 2001a). Изучение пеплов в кернах озерных отложений начато нами лишь год назад в рамках проектов РФФИ и российско-немецкого проекта КАЛЬМАР. Позднеплейстоцен-голоценовые пеплы камчатских вулканов были изучены в скважинах из Охотского моря (Gorbarenko et al., 2002) и Тихого океана (Cao et al., 1995). Опубликованные и новые полученные нами данные по этим пеплам использованы для наших корреляций. В ледниках, пробуренных на вершинах вулканов Ичинский и Ушковский (Shiraiwa et al., 2001), было обнаружено множество прослоев тефры, но к сожалению, пока не удалось организовать их детальное изучение. До настоящего времени, ни одна камчатская тефра не была идентифицирована в удаленных ледниках, но обнаружение в ледниковом керне из Гренландии тефры кальдеры Аньякчак (Аляска) (Pearce et al., 2004) показывает возможность такой находки в будущем.

В разделе 3.3 рассмотрены методы датирования крупнейших эксплозивных извержений. При наземных исследованиях крупных эксплозивных извержений вулканов Камчатки автором использовался прежде всего радиоуглеродный метод (Braitseva, Ponomareva et al., 1993, 1995, 1997a,b; Ponomareva et al., 1998, 2004, 2007a,b; Zarestkaia, Ponomareva et al., 2001b, 2007 и т.д.). Вулканические отложения сами по себе не содержат органического материала, но они часто ассоциируются с последним. Пирокластические потоки имеют высокую температуру и сжигают растительность, поэтому их отложения часто насыщены углями и подстилаются обугленной почвой, торфом и т.п. Горизонты тефры были датированы радиоуглеродным методом по подстилающим и перекрывающим их от-

ложениям, содержащим органику (палеопочвам, торфам, древесине и т.п.). Датировки по торфам и почвам, подстилающим и перекрывающим пепел, как бы зажимают его в определенный возрастной интервал (рис. 3). На основе полученных дат были рассчитаны средние ^{14}C возраста извержений, а также их калиброванные возраста с помощью калибровочной кривой Incal98 (Stuiver et al., 1998) и программ OxCal v3.8 (Bronk Ramsey, 1995, 2001) и CALIB 5.0 (Stuiver et al., 2005).

В последние годы начато $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование продуктов крупнейших извержений, прежде всего игнимбритов (Леонов и др., 2008; Bindeman, ... Ponomareva et al., 2010). Несколько лет назад начато дендрохронологическое датирование извержений вулкана Шивелуч (Solomina, ... Ponomareva et al., 2008). Этот метод представляется весьма перспективным для датирования молодых (первые сотни лет) извержений и для уточнения ранее полученных для них радиоуглеродных возрастов.

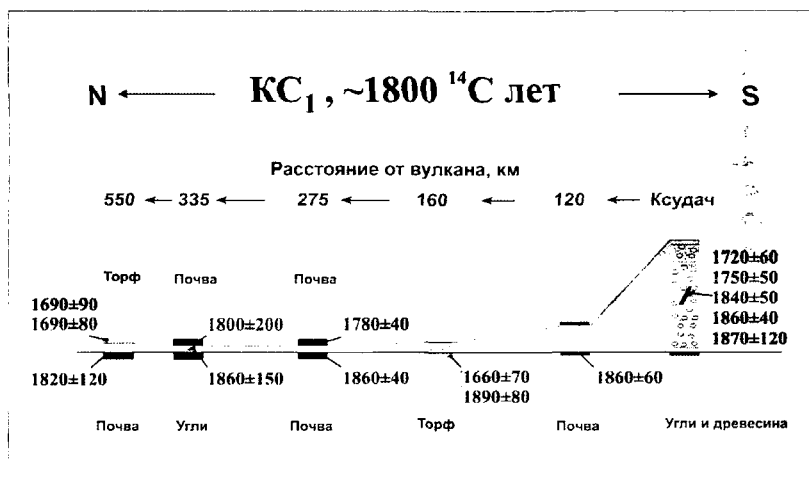


Рис. 3. Радиоуглеродные даты, полученные по разному материалу над и под маркирующим горизонтом тефры в. Ксудач KC_1 на разном расстоянии от вулкана.

В разделе 3.4 рассмотрены методы изучения вещественного состава тефры в целях привязки ее к вулканам-источникам и корреляции в удаленных разрезах. При переносе в эруптивной туче тефры подвергается золотой дифференциации: при выраженной оси пемзопада вблизи вулкана выпадают лапилли пемзы, представляющей собой вспененное вулканическое стекло с включением минеральных зерен, далее по оси пемлопада в тефре размера песка могут преобладать тяжелые темноцветные минералы, а стекло может практически отсутствовать, а еще далее преобладает вулканическое стекло, практически лишенное минералов. Золотая дифференциация приводит к существенным изменениям валового химического состава тефры по простиранию горизонта. Тем не менее, много-

летние исследования на Камчатке позволили автору найти ключ к использованию данных о химическом составе валового образца тефры для корреляции и идентификации ее прослоев (Пономарева, 1988; Braitseva, Ponomareva et al., 1997). Оказалось, что несмотря на существенное изменение химического состава тефры по простиранию горизонта, каждая тефра сохраняет принадлежность к определенной геохимической серии (рис. 4). В целом, геохимические тренды,

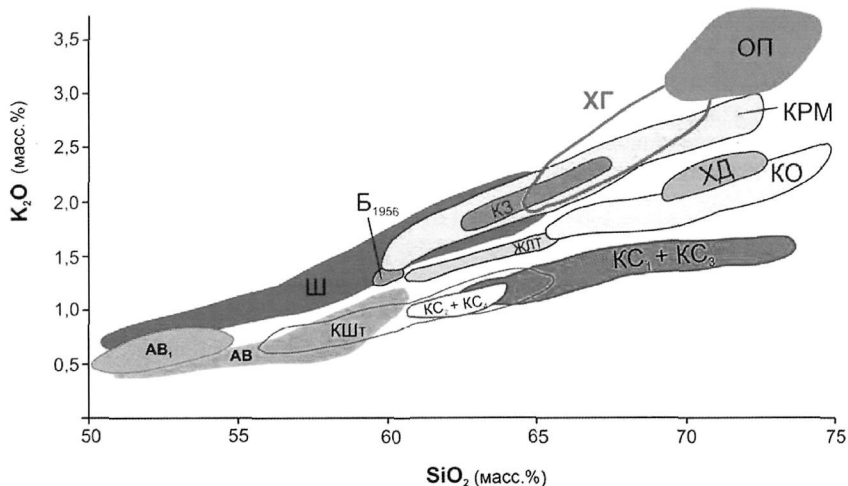


Рис. 4. Соотношение содержаний K_2O и SiO_2 для тефры сильнейших эксплозивных извержений Камчатки. Фигуративные точки, соответствующие образцам, отобраным по простиранию каждого пеплового горизонта, образуют поля-тренды. Буквами обозначены поля составов тефры вулканов Камчатки: АВ - Авачинский, Б - Безымянный, ЖЛТ(ИЛ) - Ильинский, КЗ - Кизимен, КО - кальдера Курильского озера, КРМ - кальдера Карымская, КС - Ксудач, КШТ - конус Штубеля, ОП - Опала, ХГ - Хангар, ХД - Ходуткинский кратер, Ш - Шивелуч.

получаемые при изучении удаленной тефры, аналогичны трендам, получающимся в результате кристаллизационной дифференциации, что указывает на аналогичный механизм, а именно на выпадение из более легкой основной массы (вулканическое стекло) более тяжелых частиц (остальные минералы). Таким образом, изучение валового состава тефры вполне может использоваться для корреляции и идентификации отдельных горизонтов. Распределение по территории вулканических районов пород различных геохимических серий хорошо изучено во многих островных дугах мира, поэтому валовый химический состав тефры сразу указывает на возможные ее источники.

Для корреляции горизонтов тефры автором также был использован минералогический анализ (Гептнер, Пономарева, 1979; Braitseva, Ponomareva et al., 1997). Голоценовые вулканические пеплы Камчатки состоят из довольно ограниченного набора минералов. Практически во всех пеплах доминируют вулканическое стекло и плагиоклаз, дополненные лишь небольшим количеством

темноцветных минералов. Поэтому минералогическое изучение валового состава вулканических пеплов не очень информативно. Изучение же темноцветных минералов позволило выявить минералы-индикаторы, в качестве которых выступают слюда и амфибол (Гептнер, Пономарева, 1979). Присутствие или отсутствие этих минералов позволяет разбить вулканические пеплы на группы, что существенно облегчает их дальнейшую идентификацию. Так, присутствие в каком-либо камчатском пепле биотита однозначно свидетельствует о том, что его источник нужно искать в Срединном хребте, т.е. в тыловой вулканической зоне Камчатки, где распространены породы, содержащие этот минерал.

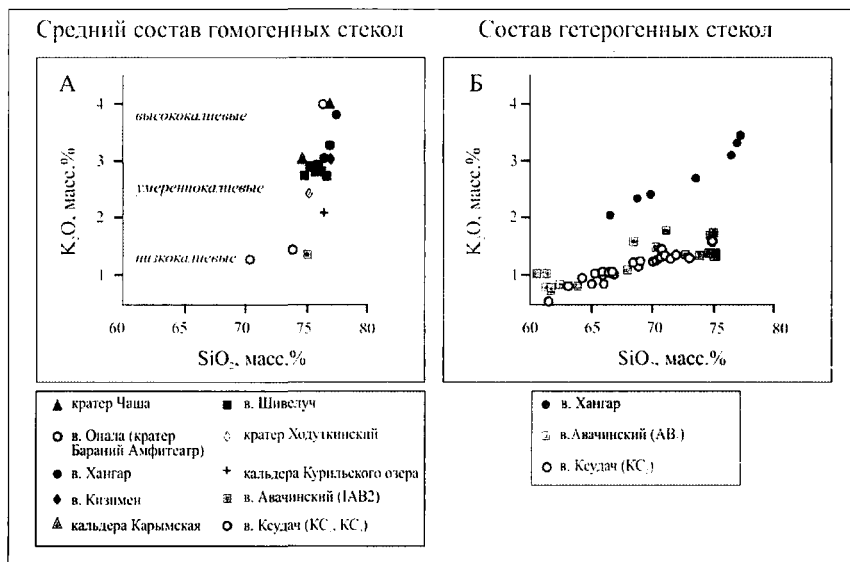


Рис. 5. Соотношение содержаний K_2O и SiO_2 для стекол из тефры сильнейших эксплозивных извержений вулканов Камчатки

Еще более точно можно охарактеризовать и идентифицировать пеплы на основе изучения состава вулканического стекла (рис. 5). Преимущество этого метода заключается в том, что он позволяет охарактеризовать пеплы, подвергнувшиеся золотой дифференциации, и даже пеплы, загрязненные терригенным материалом, разумеется с предварительным отбором именно частиц стекла. Мы проанализировали 89 образцов тефры 24 крупнейших извержений (Kyle, Ponomareva et al., 2010). Анализы показали, что более половины образцов имеют однородный состав стекла. Для таких пеплов оказалось возможным определить средний состав их стекол (рис. 5А). Несколько пеплов содержат гетерогенные стекла (рис. 5Б). Картина, полученная по составам стекол, несколько напоминает диаграмму, которая была нами получена на основе химического анализа валовых образцов (рис. 4). Точно так же выделяются низко-, умеренно-

и высококалийевые пеплы. Автором показано, что идентификация и корреляция горизонтов тефры может производиться только на основании комплекса признаков, включая географическое и стратиграфическое положение, стратификацию, цвет, сортировку, размерность, мощность, минеральный и химический составы и возраст.

Глава 4. Реконструкция параметров крупнейшего голоценового извержения на Камчатке, приведшего к образованию кальдеры Курильского озера

В данной главе рассмотрена выполненная автором реконструкция параметров эксплозивного извержения, приведшего к образованию кальдеры Курильского озера. Для проведения реконструкции необходимо было выполнить следующие задачи: 1) детально изучить отложения извержения вблизи кальдеры, чтобы установить набор и последовательность событий в процессе извержения; 2) изучить распространение пепла дальнего разноса; 3) рассмотреть границы и размеры образовавшейся в результате извержения кальдерной депрессии; 4) оценить объем изверженных продуктов; 5) установить возраст извержения; 6) обобщить все полученные данные для понимания хода извержения и его воздействия на природную среду.

В разделе 4.1 дается общая характеристика района исследований. Курильское озеро расположено на самом юге полуострова Камчатка. Рельеф района исследований по преимуществу имеет вулканическое происхождение. Высоты водоразделов колеблются от 400 до 1000 м. К высокогорному ярусу рельефа можно отнести лишь постройки плейстоцен-голоценовых вулканов с абсолютными отметками вершин до 2161 м (в. Камбальный). Всего в данном районе насчитывается пять активных в голоцене вулканов. Это (с севера на юг) Желтовский, Ильинский, Дикий Гребень, Кошелева и Камбальный, расположенные на расстоянии 12-18 км друг от друга. До высоты около 400 м склоны гор и долин покрыты березовым лесом, выше до отметок 500-700 м располагается субальпийский пояс стланиковых кустарников, еще выше - горная тундра.

Еще Б.И.Пийп (1947) высказал предположение, что широко распространенные в районе Курильского озера пемзовые туфы были связаны с тектонической депрессией с центром в Курильском озере. Эта мысль была развита О.А.Брайцевой с соавторами (1965), которые установили, что толща пемз представляла собой отложения пирокластических потоков кальдерообразующего извержения. Однако, позже некоторые исследователи приписывали пемзовые отложения, обнажающиеся в разных долинах, к независимым трещинным извержениям и отрицали существование кальдеры (Огородов и др., 1980).

Полевые работы, проведенные автором в районе Курильского озера в 1986, 1994 и 1996-1998 гг., позволили собрать новые данные об эруптивной деятельности вулканов этого района, реконструировать кальдерообразующее извержение и показать, что оно было самым крупным на Камчатке и одним из самых крупных в мире в голоцене (Ponomareva et al., 2004). Отложения этого извержения были описаны автором в нескольких сотнях обнажений на территории от оз. Камбального на юге до вулкана Б.Семячик на севере. Для пирокластики извержения было

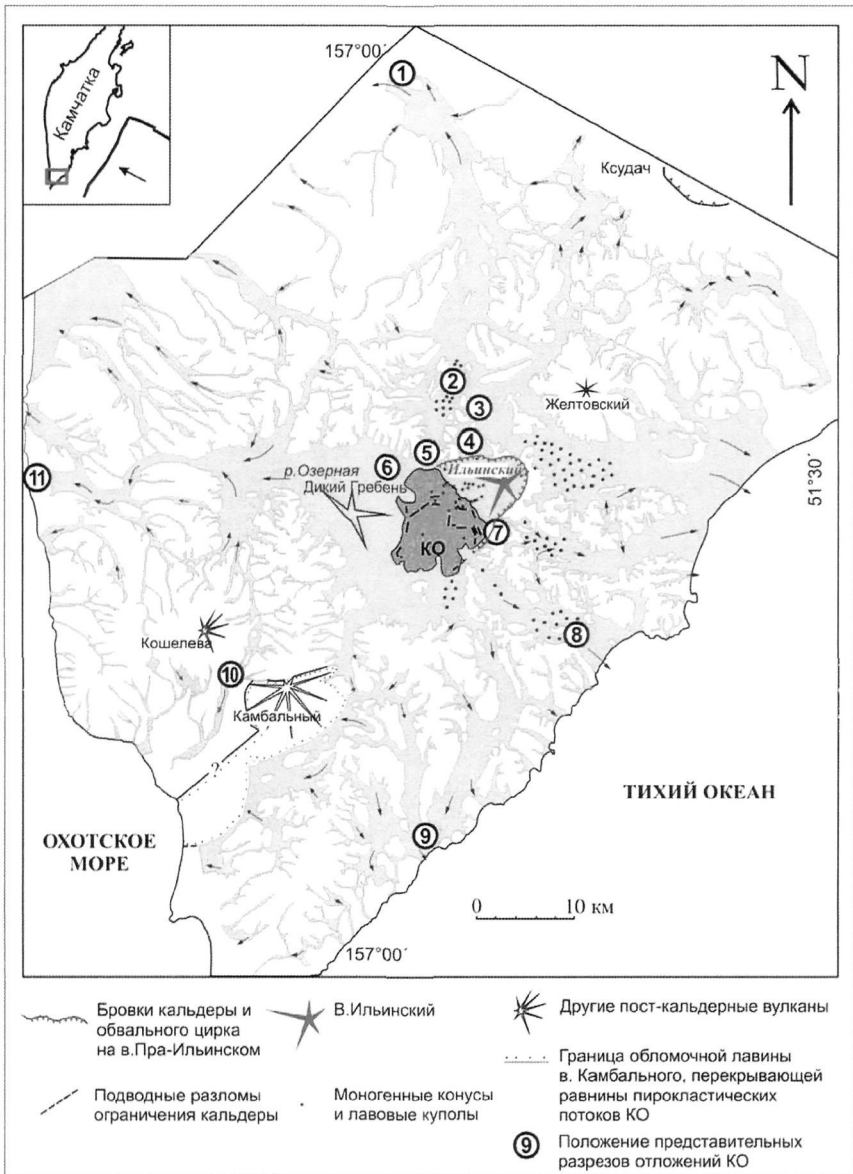


Рис. 6. Распространение пирокластических потоков извержения КО (желтая заливка; стрелки показывают направления движения) (по И.В.Мелекесцеву, с изменениями). Черные точки на желтом фоне показывают распространение темно-серого туфа. Цифры в кружках показывают положение эталонных разрезов отложений КО, приведенных в диссертации.

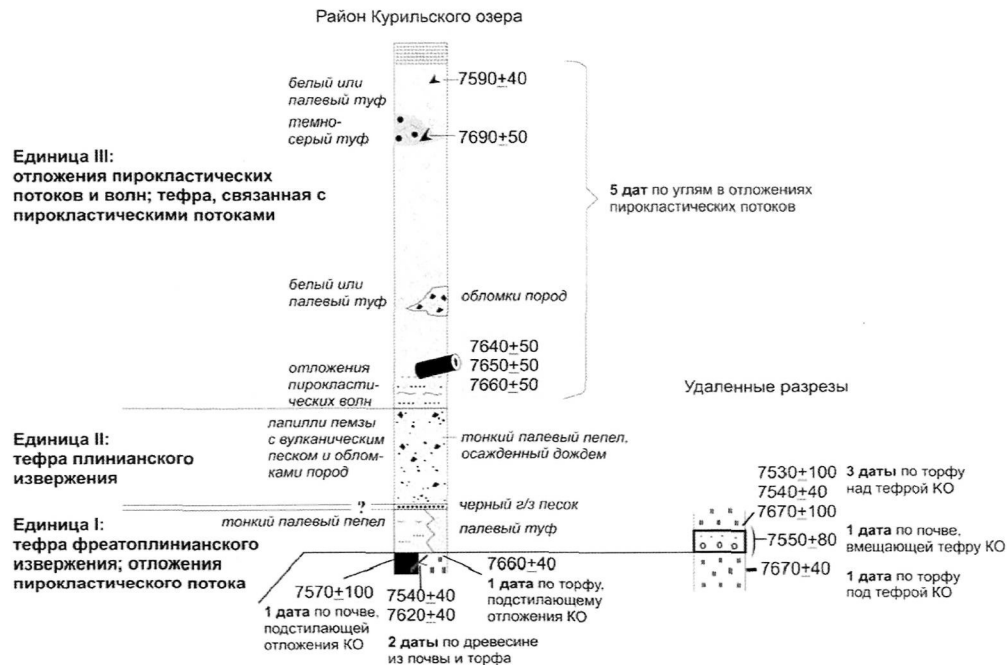


Рис. 7. Сводный разрез пирокластике извержения КО и радиоуглеродные даты, полученные как вблизи кальдеры (слева), так и в удаленных разрезах (справа).

получено около 200 валовых химических анализов, а также проведен микронзондовый анализ вулканического стекла. Для определения возраста извержения было получено около 30 ^{14}C дат. Далее мы будем использовать для обозначения самого извержения и его пирокластики индекс КО. Пачка отложений КО залегают на палеопочве мощностью 5-20 см, которая, судя по полученным по ней датам, регистрирует перерыв в вулканической деятельности на Южной Камчатке длительностью не менее 1500 лет (Ponomareva et al., 2001).

В разделе 4.2 описаны отложения голоценового извержения КО вблизи кальдеры. Положение ряда представительных разрезов отложений КО, описанных автором в разных частях района исследований, показано на рис. 6. Сводный разрез отложений кальдерообразующего извержения, полученный на основе сопоставления около пятидесяти частных разрезов, представлен на рис. 7. Пачка пирокластики КО состоит из трех основных единиц: (I) отложения начального фреатоплинианского извержения; (II) отложения плинианского пеплопада (тефра); и (III) отложения пирокластических потоков и связанные с ними отложения пирокластических волн и пепла пирокластических потоков (рис. 7) (Ponomareva et al., 2004). Не наблюдается никаких перерывов в отложении этих единиц. Отложения начального извержения представлены хорошо сортированным тонкозернистым пеплом или небольшими по объему отложениями пирокластических потоков. Тефра плинианского извержения (единица II) вблизи источника представлена лапилли и бомбами белой и светло-серой пемзы. Общее направление разноса пемзы было на северо-запад (рис. 8). Отсутствие четких границ между отдельными горизонтами пемзы заставляет предположить, что эта фаза извержения была довольно короткой. Большая часть отложений пирокластических потоков (единица III) представлена палевым или светло-серым пемзовым туфом с преобладанием риолитовой пемзы. Отложения пирокластических потоков достигают мощности 150 м вблизи Курильского озера и протягиваются на расстояние более 50 км от источника. Основная их часть заполнила долины рек, образовав равнину. Пирокластические потоки вошли в Тихий океан на восточном и в Охотское море на западном побережье Камчатки. На отложение всех трех единиц пирокластики КО существенно влияла расчлененность рельефа подстилающей поверхности.

В разделе 4.3 реконструирована область распространения пепла дальнего разноса (рис. 8). Тефра КО является важным маркирующим горизонтом для голоценовых отложений региона, поскольку она распространена на большей части п-ова Камчатка, а также в Охотском море и на материковой части Азии (рис. 8). На Камчатке горизонт пепла КО был прослежен в северном направлении почти на 400 км, вплоть до вулкана Б.Семьячик (Kyle, Ponomareva, 2010), где этот пепел залегают над отложениями кальдеры Карымской, независимо датированной 7900 ^{14}C лет (Braitseva et al., 1995). К северо-западу от кальдеры, вдоль основной оси распространения, пепел КО был обнаружен в донных осадках Охотского моря (Gorbarenko et al., 2002) и на материковой части Азии от района г.Магадан до верховьев Индигирки, примерно 1700 км от источника (Мелекесцев и др., 1991а; Андерсон и др., 1998). Идентификация пепла КО подтверждена автором с помощью валового химического анализа и микронзондово-

го анализа стекла (Ponomareva et al., 2004). Валовый состав пепла дальнего раз-
носа варьирует от дацита (грубый пепел, обогащенный минеральными зернами)
до риолита (тонкий пепел с преобладанием вулканического стекла). Пепел КО
характеризуется гомогенным составом стекол. Характерные черты, позволяющие
идентифицировать и коррелировать пепел КО, следующие: (1) содержание
 SiO_2 64-76%; (2) риолитовый состав вулканического стекла с умеренным со-
держанием TiO_2 , FeO , CaO и K_2O ; (3) содержания K_2O и Y и отношение La/Y -
промежуточные между пеплами вулканов Ксудач и кальдеры Карымской; (4)
небольшое количество амфибола. Эти критерии в соединении с возрастом и
стратиграфией достаточны, чтобы отличить тефру КО от близких к ней по воз-
расту пеплов вулканов Ксудач и кальдеры Карымской.

В разделе 4.4 рассмотрено положение и границы кальдеры, образовавшейся
в результате извержения КО. Кальдера находится в южной части Курильского
озера и имеет диаметр ~8 км. Западный борт кальдеры был деформирован во
время роста экструзивных куполов вулкана Дикий Гребень (рис. 6). Кратер,
вмещающий современный в. Ильинский, который ранее считался частью каль-
деры, был скорее всего сформирован в результате обвала, предвалявшего из-
вержение (Ponomareva et al., 2004).

В разделе 4.5 проведен подсчет объема изверженных продуктов. Отложения
пирокластических потоков покрывают площадь 1800-1900 км². Их мощность ме-
няется от 1 до >150 м, среднюю мощность можно оценить в 15-20 м. В результате
детального подсчета объема как наземной, так и подводной частей пирокластиче-
ских отложений, общий объем пирокластического покрова и озерного заполнения
оценен в ~76 км³. Отложения пеплопада были существенным компонентом обще-
го объема изверженных продуктов. Большая часть пепла выпала над Охотским
морем (рис. 8). Тефра КО имеет мощность около 3 см вблизи Эликчанских озер
(1200 км от кальдеры) и 0.1 см в отложениях оз.Смородиновое в 1700 км от каль-
деры (Андерсон и др., 1998). Расчет по полученным нами данным показывает,
что ранее приведенная оценка объема 140-170 км³ (Мелекесцев и др., 1998) - это
минимальное значение. Но даже этот объем дает возможность поставить извер-
жение КО в один ряд с крупнейшими голоценовыми извержениями мира, такими
как Тамбора (Stothers, 1984; Self et al., 1984; Sigurdsson and Carey, 1989), Байто-
ушань (Horn and Schmincke, 2000), Кратерное озеро (Bacon, 1983) и кальдера Кы-
каи (Machida and Arai, 1992).

В разделе 4.6 определен возраст извержения КО. Образцы для радио-
углеродного анализа включали угли из отложений пирокластических потоков,
древесину из-под этих же отложений, а также обугленные почвы и
спрессованный торф из-под пирокластики КО. В настоящее время для
отложений КО имеется 29 ¹⁴C дат (Braitseva,...Ponomareva et al., 1995; Zaretskaia,
Ponomareva et al., 2001), 14 из которых признаны валидными после детального
анализа их происхождения (рис. 7). Средний ¹⁴C возраст, рассчитанный по этим
14 датам, 7618±14 лет, а калиброванный возраст, рассчитанный по
калибровочной кривой Incal98 (Stuiver et al., 1998) с помощью программы
OxCal v3.8 (Bronk Ramsey, 1995, 2001), попадает в интервал 8460-8414 л.н.

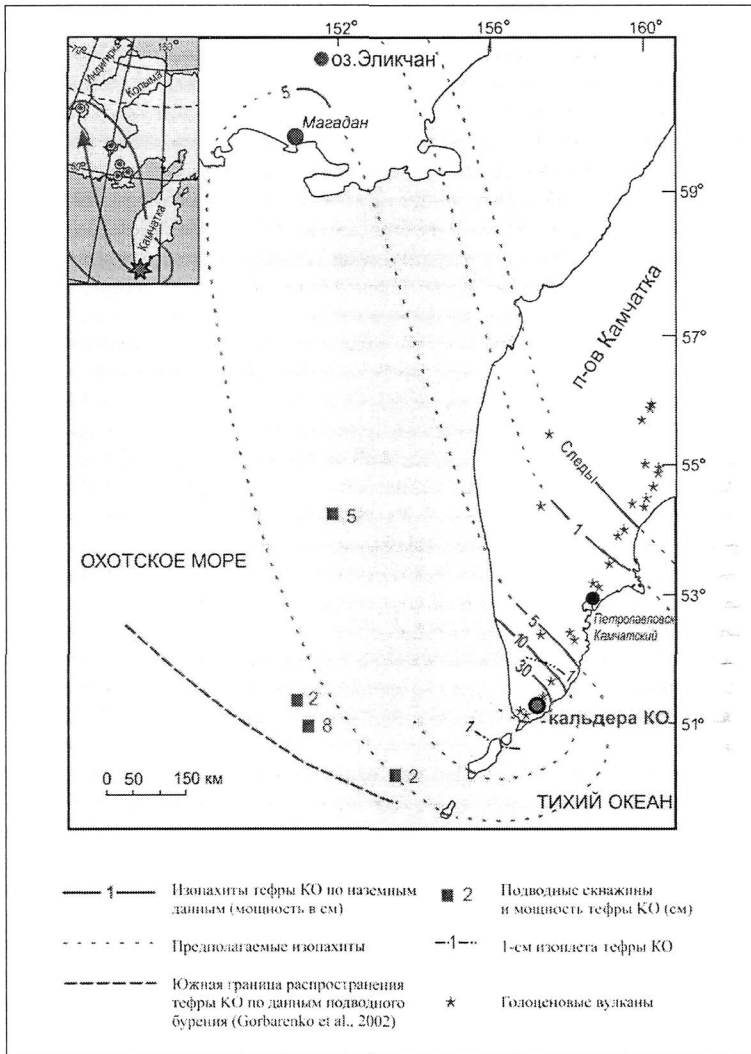


Рис. 8. Распространение тефры КО (мощность в см). Врезка показывает места находок и общее распространение тефры КО на материке.

В разделе 4.7 приводится краткое описание хода и последствий извержения КО. Извержение началось в депрессии, заполненной водой. Пепел начального извержения покрыл площадь более 500 км^2 . Извержение произошло в начале сезона вегетации, во время цветения ольховника, ивы и каменной березы, но еще до массового цветения травянистых растений (Дирксен, Дирксен, 2004). Тефра

плинианского извержения выпала над большей частью п-ова Камчатка (рис. 8), вблизи озера ее мощность превысила 5 м. В заключительную стадию извержения произошло образование пирокластических потоков, которые распространились на расстояние более 50 км от вулкана. Крупные обвалы, отложения которых перекрывают во многих местах пирокластику КО, по-видимому образовались во время обрушения кальдеры или во время образования посткальдерных экструзивных куполов. По большинству долин сошли водно-пемзовые потоки, которые вынесли пемзу за пределы распространения пирокластических потоков. Простой набор фаций в продуктах извержения, отсутствие перерывов в накоплении пирокластики и четко выраженное распространение пеплопада указывают на короткую продолжительность извержения. Судя по объему продуктов, извержение могло воздействовать на погоду в мировом масштабе аналогично извержению Тамбора (Stothers, 1984) и оставить кислотный пик в ледниках северного полушария.

Извержение КО несомненно было экологической катастрофой для Камчатки вследствие распространения больших объемов тefры над полуостровом (рис. 8). Мощные пемзы покрыли площадь 5000-6000 км² на самом юге Камчатки, что привело к полному опустошению этой территории и практически полному уничтожению растительности (при мощности пирокластики более 70-100 см). Палинологические исследования позволили установить, однако, что в некоторых частях этой территории могли сохраняться рефугиумы переживших извержение взрослых, способных цвести растений, поэтому растительность на поверхности отложений КО начала возобновляться довольно быстро (Дирксен, Дирксен, 2004). Лишь за пределами изопакиты 5 см могло наблюдаться положительное воздействие тefры на растительность за счет привноса полезных веществ в почву.

Глава 5. Реконструкция параметров голоценовых эксплозивных извержений вулкана Шивелуч

В этой главе рассмотрена проведенная автором реконструкция эксплозивных извержений самого крупного и часто извергающегося эксплозивного центра Камчатки - вулкана Шивелуч (рис.9). Эти извержения уступают извержению КО по объему выброшенной тefры, но происходят очень часто, иногда с интервалами всего первые десятки лет.

В разделе 5.1 приводится описание вулкана Шивелуч и его исторических извержений. Постройка вулкана Шивелуч состоит из позднеплейстоценового стратовулкана Старый Шивелуч (высота над уровнем моря 3283 м), деформированного обвальным цирком, и голоценового эруптивного центра Молодой Шивелуч (2800 м над уровнем моря), который находится внутри этого цирка. Большая часть голоценовых вулканических отложений распространена в южной части подножия вулкана, в том направлении, в котором открыт обвальный цирк. Отложения пеплопадов распространены во всех направлениях от вулкана в зависимости от направления ветра в момент извержения. Письменные свидетельства об активности вулкана начинаются с 1739 г. (Горшков, Дубик, 1969). Крупные исторические извержения произошли в 1854 и 1964 гг. Набор событий во время извержения 1964 г. включал крупномасштабное обрушение части постройки вулка-



Рис. 9. Схема п-ова Камчатка, показывающая положение вулкана Шивелуч и населенных пунктов Ключи и Усть-Камчатск. Красной линией показан ареал распространения пеплов в. Шивелуч, ограниченный по изопаките 1 см. За основу взята цифровая модель рельефа, полученная NASA/JPL/NIMA.

на с образованием обвального цирка, фреатическое извержение, мощное плининанское извержение с выбросом пемзовой пирокластике, отложившейся в виде тефры и туфов пирокластических потоков, и сход лахаров (Горшков, Дубик, 1969; Belousov, 1995). Лавовый купол растет в кратере с 1980 года до настоящего времени, продуцируя небольшие пирокластические потоки, обвалы и пеплопады (Федотов и др., 2004).

Собранный нами фактический материал включает около 200 разрезов почвенно-пирокластического чехла, около ста радиоуглеродных дат, полученных в основном в лаборатории Геологического института РАН под руководством Л.Д.Сулержицкого, и сотни химических анализов образцов изверженных пород, полученных в лабораториях ИГЕМ РАН, ГИН РАН, ИВиС ДВО РАН и Института горного дела и технологии штата Нью-Мексико, США.

Раздел 5.2 посвящен описанию типов голоценовых вулканических отложений подножия вулкана Шивелуч, которые включают тефру, туфы пирокластических потоков, отложения обломочных лавин и лахаров. Голоценовые отложения подстилаются ледниковыми отложениями и/или толщей доголоценовых обвалных отложений. Самая крупная обломочная лавина на вулкане образовалась в позднем плейстоцене в результате обрушения южного сектора Старого Шивелуча. В результате образовался обвалный цирк диаметром около 9 км. Отложения этой лавины занимают площадь $\sim 400 \text{ км}^2$ в южном секторе подножия и формируют поле холмистого рельефа с высотой отдельных холмов до 130 м. Кроме того, нами документировано 14 голоценовых лавин, пробег которых превышал 20 км, а объемы достигали 3 км^3 (Ponomareva et al., 1998). Большинство отложений обломочных лавин прекрасно выражено в рельефе в виде полей холмистого рельефа. Типичная тефра на подножии вулкана - лапилли андезитовой пемзы. Установлено, что отложения сильных пеплопадов имели объемы около $2-3 \text{ км}^3$, а 1-см изопакхита отложенной ими тефры проходит на расстоянии 350 км от эруптивного центра (рис. 9). Отложения пирокластических потоков вулкана Шивелуч в основном представлены пемзовыми массивными туфами, которые выполняют долины временных водотоков. Реконструированный нами объем отложений единичного пирокластического потока обычно не превышает 0.5 км^3 . Отложения лахаров установлены по всем радиальным долинам временных водотоков и сливаются в кольцевую вулканогенно-пролювиальную равнину на дальнем его подножии.

В разделе 5.3 рассматривается изученная нами стратиграфия отложений вулкана Шивелуч. В результате наших работ на подножии вулкана Шивелуч удалось выделить отложения 60 крупных голоценовых эксплозивных извержений (рис. 10). Кроме того, в разрезах установлены региональные маркирующие прослои пеплов других вулканов Камчатки, которые помогают расчленять и датировать отложения вулкана Шивелуч. На основе изучения стратиграфии отложений был составлен сводный разрез голоценовых отложений на подножии вулкана Шивелуч (рис. 10), который и послужил основой для реконструкции эруптивной активности.

Раздел 5.4 посвящен подсчетам объемов продуктов извержений вулкана Шивелуч. Показано, что многие доисторические извержения существенно превышали по объему отложений извержения 1854 и 1964 г. Объем тефры единичного извержения достигал 3 км^3 .

Раздел 5.5 рассматривает результаты радиоуглеродного датирования. Реконструкция голоценовой эруптивной активности вулкана Шивелуч основана на 101 радиоуглеродной дате по погребенным почвам, углям и древесине, связанной с пирокластическими отложениями (рис. 10) (Ponomareva et al., 2007b). На основании этих дат были рассчитаны возраста каждого извержения. Затем, для оценки продолжительности периодов активности и покоя вулкана (рис. 11), полученные ^{14}C возраста были откалиброваны с помощью программы CALIB 5.0 (Stuiver et al., 2005). При расчете возрастов извержений мы также полагались на установленные маркирующие горизонты пеплов и на скорость накопления межпепловых прослоев между датированными горизонтами.

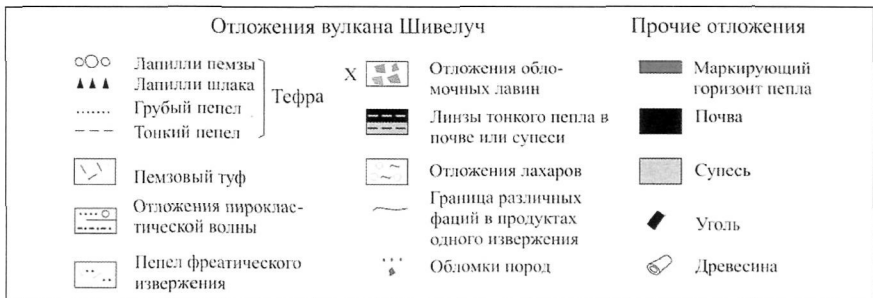
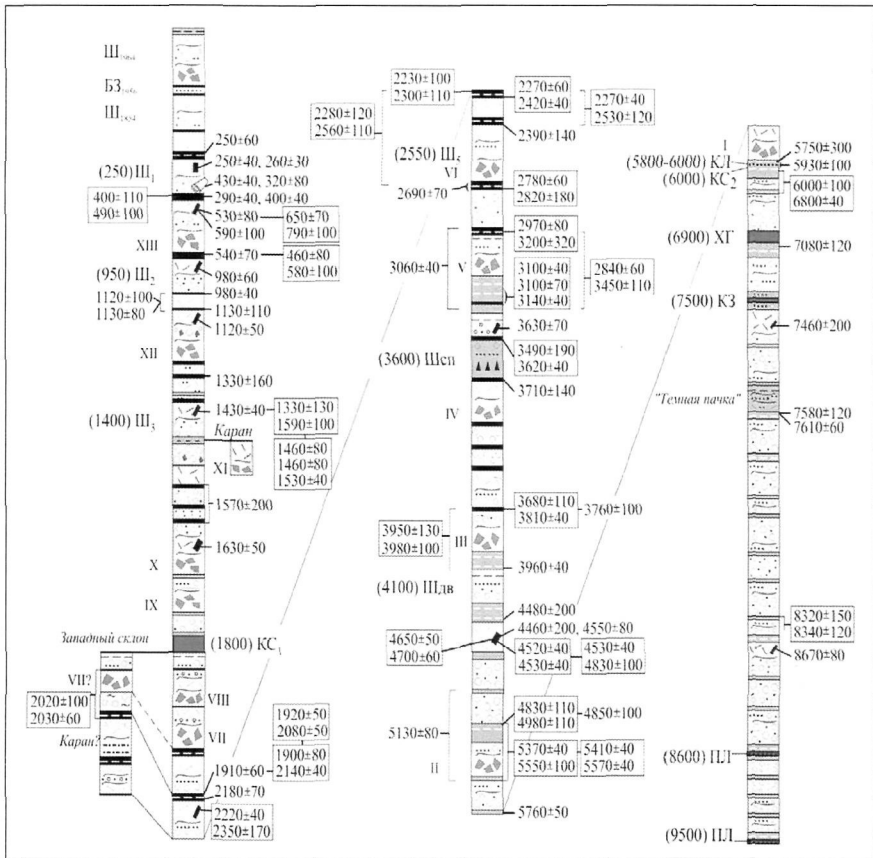


Рис. 10. Сводный разрез голоценовых отложений в Шивелуч. Отложения, связанные с куполами группы Каран, показаны слева и справа от колонки. Зеленым цветом выделены горизонты базальтовых шлаков вулкана Шивелуч. Обозначения маркирующих прослоев тефры согласно Табл. 6. ПЛ – тефра вулкана Плоский Дальний.

Раздел 5.6 посвящен составу изверженных продуктов, изученному нами на основе данных рентгено-флюоресцентного и микронзондового анализов. Установлено, что большинство голоценовых изверженных продуктов по составу отвечают умеренно-калиевым роговообманковым андезитам. От других умеренно-калиевых андезитов на Камчатке андезиты вулкана Шивелуч отличаются более высоким содержанием Mg, Ni, Sr, и Cr и Ni/Co, более высокими Cr/V и Sr/Y отношениями и более низким содержанием Y (Волинец и др., 1999; 2000; Yogodzinski et al., 2001). Эти геохимические характеристики позволили нам идентифицировать горизонты тефры вулкана Шивелуч в удаленных разрезах.

В разделе 5.7 рассмотрены реконструированная нами эруптивная активность вулкана Шивелуч в течение голоцена (рис. 11), которая характеризовалась сильными извержениями, чередующимися с периодами роста куполов или периодами покоя. Мощные извержения с объемом выброшенных продуктов $\geq 0.6-0.8 \text{ км}^3$ происходили по меньшей мере 23 раза за голоцен (т.е. в среднем 2 извержения за 1000 лет). Деятельность вулкана Шивелуч была неравномерной во времени: периоды, когда крупные и умеренные извержения происходили через каждые 50-100 лет, сменялись длительными периодами ослабления активности или даже покоя. В голоценовой истории вулкана Шивелуч можно выделить три отчетливых периода частых сильных извержений. Они имели место 10500–8400 лет назад (л.н.) (16 извержений за 2000 лет); 4600-3700 л.н. (5 извержений за 900 лет) и в последние 2900 лет (16 извержений за ~2900 лет). Внутри этих периодов были пики активности, когда извержения происходили примерно каждые 50 лет (8500-8400 л.н., 4250-4000 л.н. и 1600-1400 л.н.). Периоды активизации сменялись длительными периодами относительного покоя (рис. 11). Самый длительный период ослабления активности имел место между 8400 и 6600 л.н.

Глава 6. Крупнейшие эксплозивные извержения вулканов Камчатки и мира в голоcene

В разделе 6.1 кратко рассмотрена история изучения крупнейших эксплозивных извержений Камчатки. Вначале тефрохронологические исследования на Камчатке проводились на отдельных вулканических центрах (Брайцева и др., 1978 а, б, в, г; 1979, 1980, 1981; Пономарева, 1982). Были изучены и закартированы крупные кратеры и кальдеры, а также ряд других форм рельефа и отложений, связанных с эксплозивными извержениями. Корреляция горизонтов тефры этих извержений на этом этапе проводилась с помощью непосредственного прослеживания отдельных горизонтов тефры и радиоуглеродного датирования.

В разделе 6.2 рассмотрены реконструированные автором или при его участии крупные голоценовые эксплозивные извержения на Камчатке. Изучение вулканических форм рельефа и отложений, связанных с этими извержениями, по изложенной в предыдущих главах методике позволило реконструировать целый ряд крупных извержений и таким образом существенно пополнить глобальную летопись извержений. В постоянно обновляемый каталог "Вулканы мира" (Sim

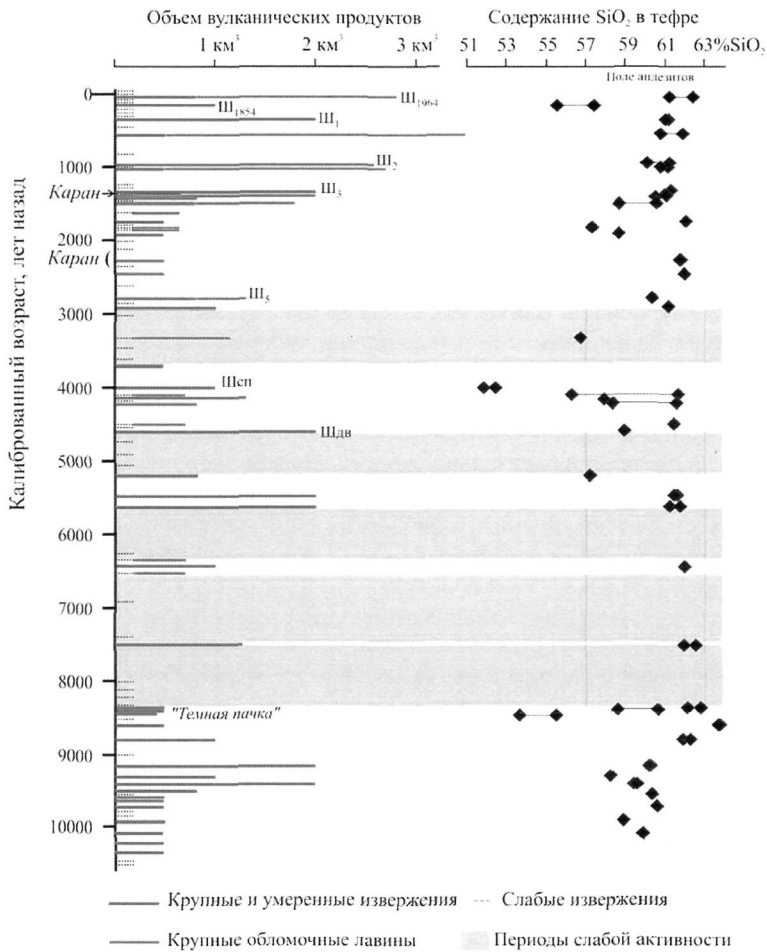


Рис. 11. Голоценовая эруптивная история в. Шивелуч и объемы и состав изверженных продуктов. Показан калиброванный возраст извержений.

kin, Siebert, 2002-) в настоящее время включено 720 эксплозивных извержений с объемом продуктов более 0.1 км^3 , в том числе 100 извержений вулканов Камчатки. Такая высокая доля камчатских извержений в мировой летописи (~14%) говорит как о высокой активности Камчатской вулканической дуги, так и о высокой степени изученности здесь эксплозивного вулканизма. Самое крупное голоценовое эксплозивное извержение на Камчатке, связанное с образованием кальдеры Курильского озера, входит в первую десятку крупнейших голоценовых извержений в мире (Ponomareva et al., 2004). Семь голоценовых извержений имели объем изверженного материала в интервале $8\text{--}19 \text{ км}^3$ (Табл. 2). Пять

голоценовых извержений привели к формированию кальдер: уже упомянутой кальдеры Курильского озера, кальдеры Карымской и трех кальдер в массиве Ксудац. Кальдеры имели диаметр 2-8 км, площади пирокластических равнин варьировали в пределах 150-1900 км². Каждое кальдерообразующее извержение привело к изменению рельефа на огромной территории. Большинство извержений с объемом продуктов около 1-5 км³ не приводили к формированию кальдер, а были связаны с отдельными вулканами, чаще всего с вулканами Шивелуч и Авачинский.

Учитывая объемы выброшенного пирокластического материала и рассчитанные высоты эруптивных колонн (>30 км) (Bursik et al., 1993, 2009), можно полагать, что крупнейшие голоценовые извержения вулканов Камчатки должны были оказать влияние на климат и состояние озонового слоя Земли и найти отражение в виде кислотных пиков в Гренландском ледниковом щите. До настоящего времени ни одна камчатская тефра не была достоверно идентифицирована в Гренландском ледниковом щите, но некоторые кислотные пики в скважине GISP-2 были предположительно скоррелированы с крупнейшими камчатскими извержениями на основе определений их возраста (Брайцева, Пономарева и др., 1997). Обнаружение в гренландском льду тефры кальдеры Аньякчак (Аляска) (Pearce et al., 2004) подтверждает возможность присутствия там и камчатских пеплов.

В разделе 6.3 рассмотрено распределение крупнейших эксплозивных извержений Камчатки во времени (рис. 12). Установлено две крупные вспышки эксплозивного вулканизма, которые имели место 8700-6800 и 1800-1400 л.н. Формальное изучение каталога крупнейших голоценовых эксплозивных извержений Камчатки (Табл. 2) показало, что во время указанных вспышек активности крупнейшие извержения *относительно* более часты, в то время как частота всех извержений с объемом продуктов >1 км³ остается постоянной. Рассматривая общую временную структуру последовательности событий, можно сказать, что в обсуждаемом каталоге эксплозивных извержений крупнейшие извержения оказываются в близком соседстве во времени "слишком часто" по сравнению со случайным распределением. Реальность этой тенденции была успешно проверена с помощью статистического анализа и названа "порядковым группированием" крупнейших эксплозивных извержений (Gusev, Ponomareva et al., 2003). Данные по распределению сильнейших голоценовых эксплозивных извержений Камчатки во времени (рис. 12) вызывают вопрос о причинах пиков эксплозивного вулканизма. Логичным было бы ожидать активного эксплозивного вулканизма в самом начале голоцена в ответ на перераспределение нагрузки в системе суша-океан в связи с таянием ледников. Но первый пик начался несколько позже, около 8700 л.н., а второй пик вряд ли может быть связан с таянием ледников.

В разделе 6.4 рассмотрено временное распределение крупнейших голоценовых эксплозивных извержений некоторых других островных дуг и мира в целом. Для отдельных островных дуг мы включаем все эксплозивные извержения с объемом продуктов более 1 км³ (рис. 12) (по Simkin, Siebert, 2002-). При срав-

Таблица 2. Крупнейшие эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 000 лет

Вулкан-источник	Индекс тефры	Средний С воз- раст, л.н., или год	Объем теф- ры, км ³	Состав тефры	Минералы - индикаторы	
					Амфибол	Слюда
Шивелуч	Ш ₁₉₆₄	1964 г.	0.6-0.8	Андезит	+	-
	Ш ₁₈₅₄	1854 г.	~1	""	+	-
	Ш ₁	250	≥2	""	+	-
	Ш ₂	950	≥2	""	+	-
	Ш ₃	1400	≥2	""	+	-
	Ш ₁₄₅₀	1450	≥2	""	+	-
	Ш ₅	2550	~1	""	+	-
	Ш ₂₈₀₀	2800	≥1	""	+	-
	Шсп	3600	~1	Базальт	+	+
	Ш	3750	≥1	Андезит	+	-
	Шдв	4100	≥2	""	+	-
	Ш ₄₇₀₀	4700	≥2	""	+	-
	Ш ₄₈₀₀	4800	≥2	""	+	-
	Ш ₅₆₀₀	5600	≥1	""	+	-
	Ш ₆₈₅₀	6850	1.2	""	+	-
	Ш	7900	≥1	""	+	-
	Ш	8100	≥2	""	+	-
	Ш	8200	≥1	""	+	-
	Ш	8300	≥2	""	+	-
Безымянный	Б ₁₉₅₆	1956 г.	1.8-2	""	+	-
Кизимен	КЗ	7550	4-5	Дацит	+	-

Таблица 2. Продолжение.

Хангар	ХГ	6850	14-16	Дацит-риодацит	+	+
Карымская кальдера	KPM	7900	13-16	Риодацит	-	-
Авачинский	II AB ₃	3300	>1.2	Андезито-базальт	+	-
	II AB ₁	3500	≥3.6	""	+	-
	(AB ₁)					
	IAв24 (AB ₂)	4000	≥0.6	Андезит	+	-
	IAв20 (AB ₃)	4500	≥1.1	Андезит	+	-
	IAв12 (AB ₄)	5500	≥1.3	""	+	-
	IAв2	7150	≥8-10	""	+	-
Кратер Чаша	ОПтр	4600	0.9-1	Риолит	-	+
Опала, кратер Бараний Амфитеатр	ОП	1500	9-10	""	+	+
Ходуткинский кратер	ХД	2500	1-1.5	Риодацит	+	-
Ксудач, конус Штюбеля	KШT ₃	1907 г.	1.5-2	Андезито-базальт- дацит	-	-
	KШT ₁	950	0.8-1	""	-	-
Ксудач, кальдеры	KC ₁	1800	18-19	Риолит	-	-
	KC ₂	6000	7-8	Андезит	-	-
	KC ₃	6350	0.5-1	Риодацит-андезит	-	-
	KC ₄	8850	1.5-2	Андезит	-	-
Ильинский	ЖЛТ	4850	1.2-1.4	""	+	-
Кальдера Курильского озера	КО	7600	140-170	Риолит-андезито- базальт	+	-

Примечание: Вулканы перечислены с севера на юг. Радиоуглеродные возраста округлены до ближайших 50 лет.

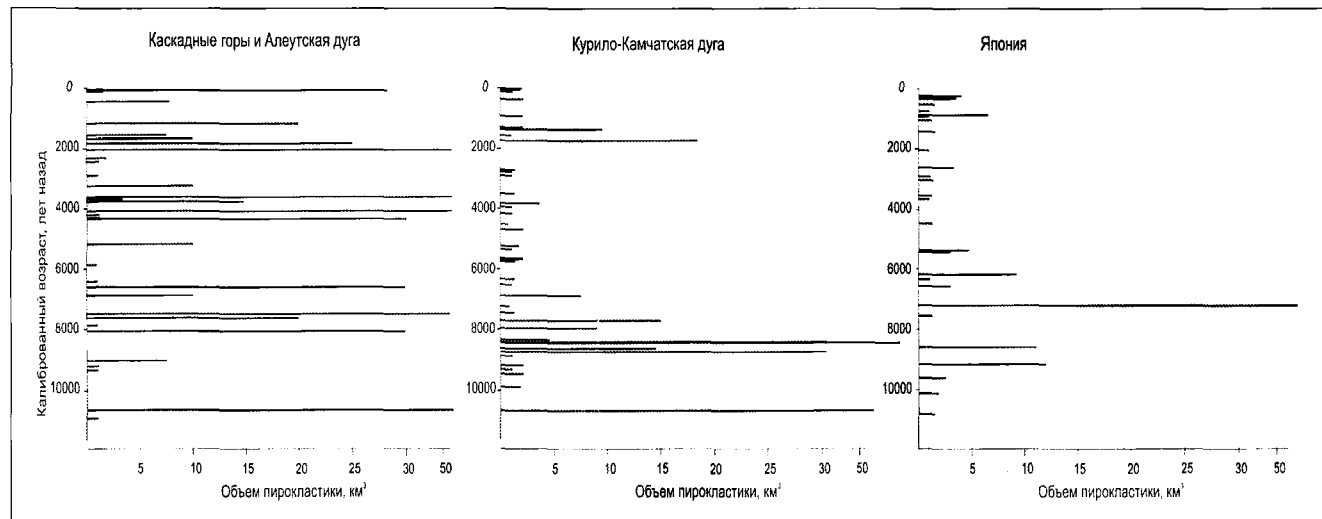


Рис. 12. Временное распределение крупнейших голоценовых эксплозивных извержений в некоторых вулканических дугах Тихого океана. Три известных извержения Курильских островов показаны синим цветом. Извержения Камчатки нанесены в соответствии с работой *Ponomareva et al., 2007a*. Извержения других островных дуг взяты из каталога "Вулканы мира" (*Simkin, Siebert, 2002-*); возраста извержений калиброваны с использованием программы *Calib5.0* (*Stuiver, Reimer, 1986-2005*) <http://calib.qub.ac.uk/calib/>

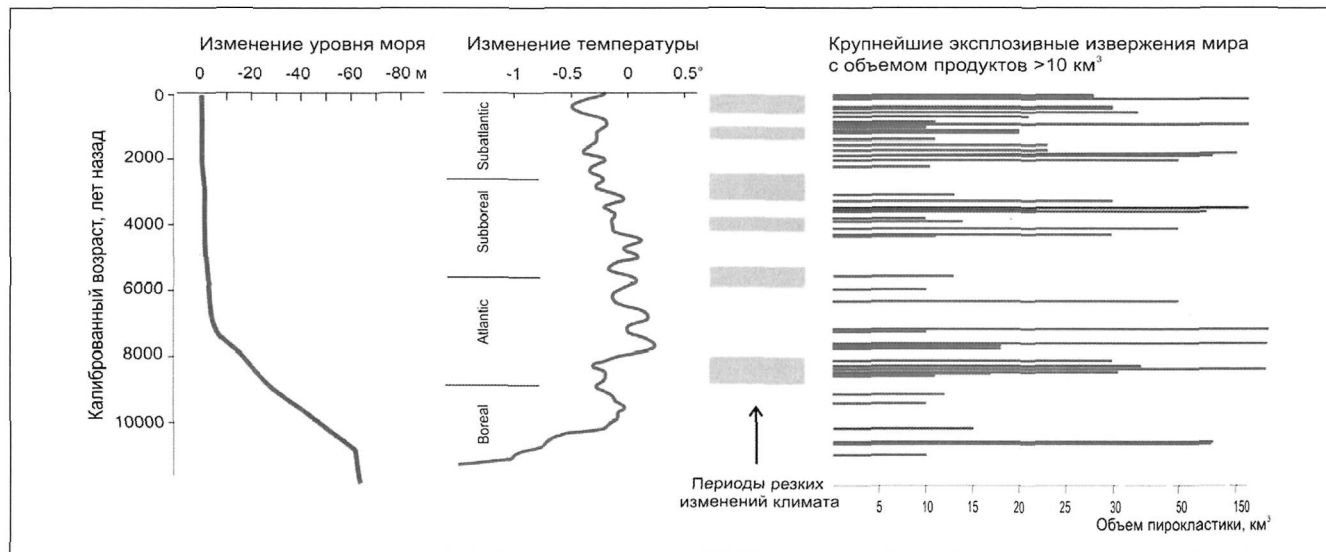


Рис. 13. Сравнение глобальной летописи крупнейших голоценовых извержений с климатическими изменениями. Извержения Камчатки нанесены в соответствии с работой Ponomareva et al., 2007a. Извержения мира взяты из каталога "Вулканы мира" (Simkin, Siebert, 2002-); возраста извержений калиброваны с использованием программы Calib 5.0 (Stuiver, Reimer, 1986-2005) <http://calib.qub.ac.uk/calib/> Зеленым цветом выделены два крупнейших извержения Атлантики: Гримсвотн в Исландии и Санторин в Средиземноморье. Остальные извержения произошли в обрамлении Тихого океана. Периоды резких изменений климата показаны по статье Mayewski et al. (2004). Изменения уровня моря показаны по данным Fleming et al. (1998), Fleming (2000) и Milne et al. (2005). Изменения температуры показаны по отношению к средним значениям температуры середины XX века на основе рисунка, подготовленного Робертом Роде (Robert A. Rohde) по данным различных исследователей, собранным в базе данных NOAA по палеоклиматологии <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/data.html>

нении активности вулканических дуг Тихого океана бросается в глаза как наличие пиков эксплозивной активности во всех из них, так и совпадение этих пиков во времени. Имеются всего два крупных почти одновременных раннеголоценовых извержения, произошедших около 10700 л.н. (кальдера Фишер на Алеутах и кальдера Львиная Пасть на Курилах). На Камчатке и в Японии сильных извержений в это время нет. На Камчатке это время активного построения конусов вулканов за счет умеренных эксплозивных извержений (см. главу 7).

Несомненный период сильных извержений прослеживается во всех дугах примерно между 9000 и 7000 л.н. (рис. 12). За это время в рассматриваемых дугах произошло 15 извержений с объемом продуктов более 10 км^3 . Именно в этот интервал укладывается ряд крупнейших извержений на Камчатке, а также крупнейшее извержение Японии (кальдера Кикай). Следующий пик, лучше всего выраженный на Алеутах, отмечен около 4000 л.н. В частности, попадает в этот период образование кальдеры Аньякчак. Самым крупным из извержений этого периода на Камчатке было начальное извержение Молодого конуса вулкана Авачинский (Базанова и др., 2003). Следующий период сильной эксплозивной активности, приуроченный к началу нашей эры, отлично выражен в Каскадных горах, на Алеутах и на Камчатке. В Японии крупное извержение произошло чуть позже, около 1000 л. н. Несмотря на все несовершенство каталогов и подсчетов объемов, мы видим, во-первых, хорошо выраженные сгущения крупнейших извержений, а во-вторых, определенные совпадения пиков эксплозивного вулканизма в дугах Северной Пацифики.

Для всего мира мы рассматриваем голоценовые извержения с объемом продуктов не менее 10 км^3 ("калибр" Кракатау) (рис. 13). Подавляющее большинство таких извержений произошло в обрамлении Тихого океана и островных дугах Индонезии. Лишь два эксплозивных извержения с объемом продуктов более 10 км^3 произошли вне этой зоны: это извержения Гримсвотн в Исландии (15 км^3) и Санторин в Средиземноморье ($>150 \text{ км}^3$). Отчетливо выделяются сгущения крупнейших извержений в периоды около 8600-7200, 4200-3000 л.н. и на чиная с 2000 л.н. Самый ранний из этих пиков эксплозивного вулканизма совпадает по времени с поднятием моря до современного уровня. Это хорошо вписывается в теорию, объясняющую активизацию вулканизма изменением уровня моря и ледниковой нагрузки (Wallman et al., 1988). При таянии ледников нагрузка перемещается с суши в океаны, что способствует активизации вулканов на суше (Мелекесцев, 1969; Prueher, Rea, 1998). Однако, это объяснение вряд ли применимо к двум более молодым вулканическим пикам. Некоторые исследователи связывают эпизоды вулканической активности в островных дугах с изменениями скорости субдукции (например, Cambray and Cadet, 1996). Однако упомянутые выше глобальные пики эксплозивного вулканизма требуют для своего объяснения привлечения какого-то другого механизма, возможно, увеличения количества субдуцируемых осадков (Sigurdsson, 2000).

Глава 7. Горизонты тефры крупнейших голоценовых извержений как инструмент датирования и корреляции этапов эндогенного рельефообразования

В разделе 7.1 рассмотрены горизонты тефры крупнейших голоценовых извержений Камчатки как основа для создания системы геохронологических реперов для датирования форм рельефа и отложений (рис. 14). Выпадение тефры происходит в течение короткого времени; при этом тефра плащом покрывает огромную территорию и образует маркирующий горизонт, который можно проследживать на огромных территориях. Использование горизонтов тефры в качестве маркеров позволяет создавать сводные летописи таких разных событий, как вулканические извержения, этапы формирования вулканических построек; подвижки по активным разломам, цунами, изменения климата и растительности, изменения уровня моря, миграции древних людей и т.п. Поместив эти компоненты в единую летопись и изучив их распределение во времени, можно установить периоды общей активизации эндогенных и экзогенных процессов и реконструировать многокомпонентные геологические катастрофы. С помощью датированных маркирующих пеплов также можно реконструировать и датировать палеорельеф, изменения климата, рассчитывать скорость осадконакопления озерных, морских, золовых отложений и торфа и т.п.

Созданная нами на базе изученных горизонтов тефры эксплозивных извержений система изохрон для голоцена Камчатки (рис. 14) была использована для датирования форм рельефа и отложений различного генезиса. Датирование вулканических форм рельефа и отложений позволило определить возраст кальдер, крупных кратеров и большинства голоценовых вулканов Камчатки (Braitseva et al., 1995; Ponomareva et al., 2004; Zaretskaya, Ponomareva et al., 2001b, 2007; Дирксен, Пономарева и др., 2002; Певзнер, 2006), а также реконструировать режим активности и историю формирования последних (Базанова, Певзнер, 2001; Базанова и др., 2003; Брайцева и др., 1978а, б, в, г; 1980, 1984, 1985б, 1990, 1998; Брайцева, Мелекесцев, 1990; Мелекесцев и др., 1987, 1993, 1995, 1996; Пономарева, 1987; Пономарева, Брайцева, 1990; Ponomareva et al., 2001, 2007b). Изученные нами маркирующие прослои тефры использовались для датирования подвижек по разломам (Kozhurin...Ponomareva et al., 2006), цунами (Pinegina et al., 2003; Bourgeois...Ponomareva et al., 2006), обвалов (Ponomareva et al., 2006), береговых валов (Martin et al., 2004), наступания ледников (Solomina et al., 1995), дюн, речных и морских террас, археологических культурных горизонтов (Брайцева и др., 1983).

В разделах 7.2-7.5 показаны реконструкции этапов формирования эндогенного рельефа (вулканов и разломных уступов), а также примеры датирования обвалов, озерных террас, цунами и палеоклиматических изменений. Реконструкция периодов формирования вулканического рельефа продемонстрирована на примере в. Крашенинникова. Она была выполнена с помощью геолого-геоморфологического картографирования, тефрохронологического и радиоуглеродного методов. Вулкан расположен внутри позднеплейстоценовой кальдеры и состоит из двух слившихся стратовулканов (рис. 15). Северный конус венчается кальдерой, в которой расположен небольшой стратовулкан с лавовым конусом

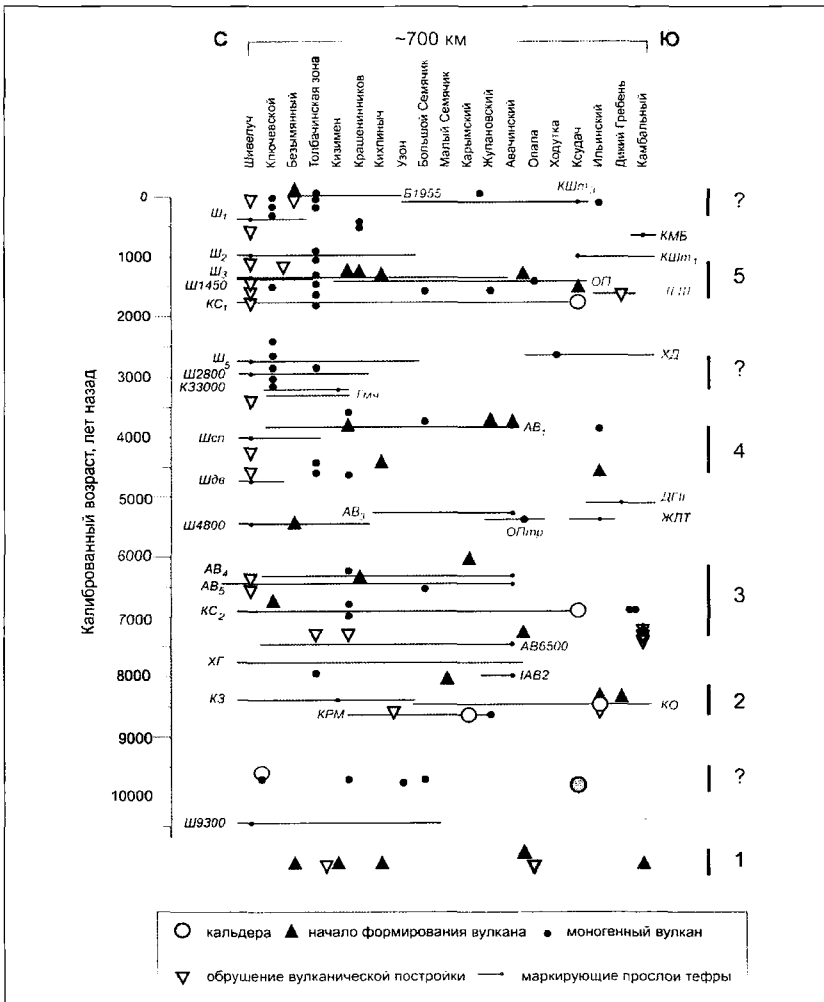


Рис. 14. Схематическая тефростратиграфическая шкала для голоценовых отложений Камчатки и периоды активизации процессов вулканического рельефообразования. На рисунке представлены маркирующие горизонты тефры, выраженные вдоль Восточной вулканической зоны (по работам Ponomareva et al., 2007 a,b). Возраст различных отложений и форм рельефа и их положение по отношению к маркирующим прослоям тефры согласно работ Мелекесцев, Брайцева, 1984, Пономарева, 1987, Braitseva...Ponomareva et al., 1995, Ponomareva et al., 1998, 2007 a, b. Справа цифрами 1-5 показаны основные периоды активизации процессов вулканического рельефообразования. Вопросительные знаки указывают менее активные периоды.

внутри кратера. На склонах вулкана расположены побочные эруптивные центры. На север и юг от плейстоценовой кальдеры расположены цепочки шлаковых конусов. В районе вулкана было описано более ста разрезов почвенно-пирокластического чехла, в которых была выделена тефра в.Крашенинникова, а также установлены маркирующие горизонты тефры других вулканов (Пономарева, 1987). С их помощью было проведено тефрохронологическое датирование лавовых потоков и шлаковых конусов вулкана. Установлено, что активное формирование вулканических конусов за счет извержений происходило в интервалы времени 12-11, 10.3-8.7; 6.4-5.5; 3.3-2.6 и 1.3-1.1 тыс.л.н. В остальное время происходило незначительное моделирование рельефа за счет отдельных лавовых излияний и погребения обвальными отложениями. Разрушение построек также происходило прежде всего за счет вулканических процессов. Так, крупные изменения постройки в.Крашенинникова произошли в результате обрушения вершинной части Северного конуса и образования на нем кальдеры ~2.5 тыс.л.н.

В разделе 7.6 проведено сопоставление этапов формирования эндогенного рельефа Камчатки с помощью разработанной системы изохрон (рис. 14). Первый общекамчатский эпизод вулканической активности начался ранее 11 тысяч л.н. и привел к возникновению новых вулканов (Пра-Безымянный, Кизимен, Крашенинникова, первые конусы Толбачинского и Толмачева долов и пр.). Крупные эксплозивные извержения в это время практически не наблюдаются (рис. 12). Примерно к этому же времени относятся и самые древние из датированных нами голоценовых подвижек по разломам с образованием уступов высотой 1-3 м (а в отдельных случаях до 10-12 м) и длиной первые десятки километров (Кожурин, Пономарева и др., 2008). Во время следующего общекамчатского периода активизации (8600-8100 л.н.) произошел целый ряд крупнейших эксплозивных извержений с образованием кальдерных депрессий и равнин пирокластических потоков, а также начали формироваться вулканы Кайно-Семячик (в массиве Мал. Семячик), Ильинский, Дикий Гребень и произошли крупные обвалы на вулканах Пра-Ильинский и Тауншиц. Во время следующего периода активизации (7300-6100 л.н.) началось формирование новых вулканов в вулканических массивах Крашенинникова, Горелый и Камбальный, а также современных конусов вулканов Ключевской и Карымский. Произошли крупные обвалы на вулканах Гамчен и Острый Толбачик и три обвала на вулкане Камбальный.

Следующий общекамчатский период активизации эндогенного рельефообразования (4700-3800 л.н.) замечателен обилием сильных базальтовых извержений, причем они произошли как на базальтовых, так и на андезитовых вулканах, где были совершенно необычны. Началось формирование новых вулканов в массивах Гамчен, Кихпинич, Жупановский, Авачинский, Ильинский. Примерно к концу этого интервала были приурочены две сближенные во времени подвижки по разлому в хр. Кумроч и ряд крупных обвалов на передовом фазе хр. Кумроч (Kozhurin...Ponomareva et al., 2006). Следующий региональный период активизации имел место примерно между 1800-1000 л.н. и включал в себя как многочисленные извержения вулканов, так и подвижки по разломам в

торные обрушения на вулкане Шивелуч и начало формирования крупных шлаковых конусов на Толбачинском долу, а также возникновение новых вулканов Комарова, Северный средний конус (массив Крашенинникова), Савича в массиве Кихпинич и конус Штюбеля в массиве Ксудач.

В последние 300-500 лет возобновление после длительного перерыва активности вулканов самого юга Камчатки (Ropomareva et al., 2001), а также вулканов Шивелуч, Безымянный, Малый Семячик, Карымский, увеличение продуктивности вулкана Ключевской и возобновление активности его побочных конусов, а также сильные извержения в пределах Толбачинского дола могут говорить о начале нового общекамчатского периода активизации. Таким образом, наши данные показывают, что как вулканическая активность, так и разломообразование имели свои пики и спады, причем оба вида эндогенных процессов по-видимому имели общие тектонические причины и в связи с этим действовали субсинхронно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Воздействие крупнейших эксплозивных извержений на природную среду в региональном и глобальном масштабах происходит прежде всего за счет образующихся при извержениях эруптивных туч, нагруженных частицами тефры и аэрозолями. Это воздействие до настоящего времени недооценено вследствие отсутствия детальной летописи эксплозивных извержений даже для позднего плейстоцена-голоцена, что не дает возможность сопоставления эксплозивной активности с изменениями природной среды и климата. Для изучения воздействия крупнейших извержений на природную среду в региональном и глобальном масштабах необходимо, во-первых, выявить все эти извержения, опираясь на изучение вулканических отложений и форм рельефа, а во-вторых, реконструировать параметры извержений, включая возраст, а также объем и состав вулканических продуктов.

2. Тефрохронология является одним из главных методов составления летописи эксплозивных извержений. На основе тефрохронологических исследований производится выявление эксплозивных извержений, реконструкция их параметров, определение состава и объема пирокластических продуктов. Надежная идентификация и корреляция горизонтов голоценовой тефры проводилась с применением комплекса методов, включающего радиоуглеродное датирование, изучение минерального и химического состава тефры, а также геолого-геоморфологическое картографирование. На основании изучения и корреляции горизонтов тефры создана уникальная система геохронологических реперов для датирования и корреляции голоценовых форм рельефа и отложений Камчатки.

3. Выявлены и датированы крупнейшие эксплозивные извержения вулканов Камчатки, что позволило внести существенный вклад в мировую летопись эксплозивного вулканизма. Установлено, что крупнейшие эксплозивные извержения вулканов Камчатки имели тенденцию к группированию во времени, причем самые крупные вспышки эксплозивного вулканизма имели место между 8700 и 7700 л.н. и между 1800 и 1400 л.н. Сопоставление камчатской летописи голоценового эксплозивного вулканизма с летописями аналогичных извержений дру-

гих островных дуг и мира в целом показало, что изученные нами камчатские извержения составляют ~14% всех установленных к настоящему времени извержений с объемом продуктов $\geq 0.1 \text{ км}^3$. Рассмотрение летописи эксплозивных извержений для ряда вулканических дуг Тихого океана показало наличие в них общих близких по времени периодов усиления эксплозивной активности. Тенденция крупнейших извержений происходить близко друг к другу во времени может увеличивать их воздействие на природную среду.

4. Детальная реконструкция параметров голоценовых эксплозивных извержений вулканов Камчатки позволила установить, что самым крупным из них является катастрофическое извержение на юге Камчатки, приведшее к образованию кальдеры Курильского озера около 8500 (7600 ^{14}C) лет назад. Это извержение также является одним из пяти крупнейших голоценовых извержений мира с объемом продуктов около 200 км^3 . Визуально различимый прослой его тефры выявлен в озерных осадках на расстоянии более 1700 км от центра извержения, а область практически полного уничтожения растительности составила 5000-6000 км^2 . На примере изучения этого извержения показаны возможности детальной реконструкции параметров отдельного крупного вулканического извержения и выявление его геоморфологического эффекта и воздействия на природную среду.

5. Установлено, что самым активным эксплозивным вулканом на Камчатке в голоцене был вулкан Шивелуч. На примере изучения этого вулкана показана возможность детальной реконструкции летописи многочисленных извержений из одного эруптивного центра и их параметров. Эруптивная активность вулкана Шивелуч в течение голоцена характеризовалась плинианскими извержениями, чередующимися с периодами роста куполов или периодами покоя. Мощные плинианские извержения с объемом выброшенных продуктов $\geq 0.6-0.8 \text{ км}^3$ происходили по меньшей мере 23 раза, что в среднем за голоцен дает частоту 2 мощных извержения за 1000 лет. В то же время деятельность вулкана Шивелуч была неравномерной во времени: периоды, когда крупные и умеренные извержения происходили через каждые 50-100 лет, сменялись длительными периодами ослабления активности или даже покоя. В голоценовой истории вулкана Шивелуч можно выделить три отчетливых периода усиления активности: 10500 - 8400 л.н.; 4600 - 3700 л.н. и последние 2900 л.н. Внутри этих периодов были пики активности, когда извержения происходили примерно каждые 50 лет (8500-8400 л.н., 4250-4000 л.н. и 1900-1300 л.н.). Самый ранний и самый поздний из пиков точно попадают в периоды общего усиления вулканической активности на Камчатке. В последние 2900 лет крупные и умеренные извержения следовали друг за другом с интервалами 50-400 лет. Эта постоянная сильная активность сходна с таковой в раннем голоцене. Тефра вулкана распространялась на расстояние более 350 км от его кратера.

6. С помощью разработанной нами на основе горизонтов тефры крупных извержений системы геохронологических реперов удалось датировать и сопоставить между собой этапы формирования эндогенного (вулканического и тектонического) рельефа Камчатки в голоцене. Выделены следующие периоды общекамчатской активизации процессов эндогенного рельефообразования: 1)

раннеголоценовый (ранее 11 000 л.н.); 2) 8600-8100 л.н.; 3) 7300-6100 л.н.; 4) 4700-3800 л.н.; 5) 1800-1000 л.н. Система геохронологических реперов имеет важный потенциал для палеогеографических исследований в пределах Камчатки и прилегающих акваторий и должна быть использована для непосредственного сопоставления палеоклиматических, палеоокеанологических, археологических и других данных.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Главы монографий:

1. Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В. Возрастное расчленение голоценовых вулканических образований Толбачинского дола. В кн.: Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-76 гг. М.: Наука. 1978. С. 64-71
2. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. (1983) Age divisions of the Holocene volcanic formations of the Tolbachik Valley. In: The great Tolbachik fissure eruption: geological and geophysical data 1975-1976, Cambridge Earth Sci. series. P. 83-95
3. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов. В кн.: Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975-1976 гг. Ред. С. А. Федотов. М.: Наука. 1984. С. 177-209.
4. Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Пономарева В.В. Применение радиоуглеродного датирования в практике тефрохронологических исследований. В кн.: Новые данные по геохронологии четвертичного периода. М.: Наука. 1987. С. 179-187.
5. Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V. (1989) Prediction of Volcanic Hazards on the Basis of the Study of Dynamics of Volcanic Activity, Kamchatka. In: Volcanic Hazards Assessment and Monitoring: IAVCEI Proceedings in Volcanology I. Berlin - ...Tokyo. Springer-Verlag. PP. 10-35
6. Пономарева В.В., Волынец О.Н., Флоренский И.В. Вулкан Крашенинникова. В кн.: Действующие вулканы Камчатки. 1991. Т.2. Москва, Наука. Ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П., с. 62-74.
7. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. "Век" вулканических катастроф в раннем голоцене Курило-Камчатской области. В кн.: Глобальные изменения природной среды. Новосибирск. 1998. С. 146-153
8. Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Dirksen O.V., Zaretskaia N.E. (2001) Holocene paleosols as records of intervals of volcanic quiescence in the Kurile Lake region, South Kamchatka. In: E. Juvigné & J.P. Raynal (eds.) "TEPHRAS, chronology, archaeology". Les dossiers de l'Archéo-Logie n° 1. CDERAD ed., pp. 91-100
9. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Сулержицкий Л.Д. Сильные и катастрофические эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тысяч лет. В кн.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. 2001. Петропавловск-Камчатский. С. 235-252.
10. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Новый подход к определению понятия "действующий вулкан". В кн.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 191-203.
11. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. Долгосрочный прогноз извержений и оценка опасности на основе изучения динамики эруптивной активности

вулканов (на примере Камчатки). В кн.: Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 1. Вулканизм. Москва. 2002. С. 161-19

12. Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатиков О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекесцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарева В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В. Новейший и современный вулканизм на территории России. Отв.ред. Н.П. Лаверов. М., Наука, 2005. 604 с.
13. Коваленко В.И., Адушкин В.В., Богатиков О.А., Бондур В.Г., Грачев М.А., Федотов С.А.; Гордеев Е.И., Чернышев И.В., Сахно В.Г., Ярмолюк В.В., Арманд Н.А., Евдокимов А.Н., Ермаков А.Н., Зорин Ю.А., Собисевич А.Л., Ступак Ф.М., Хренов А.П.; Акинин В.В., Гурбанов А.Г., Кораго Е.А., Муравьев Я.Д., Пономарева В.В., Певзнер М.М., Тищенко Ю.Г.; Кудряшова Е.А. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними катастрофы. М.: ИГЕМ РАН. 2007. 200 с. Раздел: Направление 2: Новейший вулканизм: закономерности его активности и сопутствующие катастрофические следствия. С. 35-80.
- 14-16. Монография "Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region ", American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2007, Volume 172
Разделы:
 - Ponomareva V.V., Churikova T.G., Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D. Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific region.: 165-198
 - Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D., Hartman M. Holocene eruptive history of Shiveluch volcano. Kamchatka Peninsula.: 263-282.
 - Andrews B.J., Gardner J.E., Tait S., Ponomareva V., Melekestsev I.V. Dynamics of the 1800 14C yr BP caldera-forming eruption of Ksudach volcano, Kamchatka, Russia: 325-342
17. Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том 2. Новейший вулканизм северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М., Изд-во ИГЕМ, 2008. С. 19-40.

Статьи:

1. Гептнер А.Р., Пономарева В.В. Применение минералогического анализа для корреляции пеплов вулкана Шивелуч. Бюлл вулканол станций. 1979. № 56. С. 126-130
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. Тефрохронологические и геохронологические исследования Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов. Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 14-28.
3. Пономарева В.В. Тephра шлаковых конусов Толбачинского дола (Ключевская группа вулканов, Камчатка). Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 62-72.
4. Брайцева О.А., Флоренский И.В., Пономарева В.В., Литасова С.Н. История активности вулкана Кихпинич в голоцене. Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 3-19.
5. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих

- районов (по тefрохронологическим данным). Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3-18.
6. Пономарева В.В. Вулкан Крашенинникова: история формирования и динамика активности. Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 28-44.
 7. Волюнец О.Н., Пономарева В. В., Цюрупа А.А. Петрологические и тefрохронологические исследования вулкана Крашенинникова на Камчатке. Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 7. С. 15-31.
 8. Пономарева В.В., Брайцева О.А. Вулканическая опасность для района Кроноцкого озера- Узон- Долина Гейзеров. Вулканология и сейсмология. 1990. № 1. С. 27-42.
 9. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области. Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 4. С. 17-31.
 10. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Yu., Litasova S.N., Sulerzhitsky L.D. (1992) Tephra of the largest prehistoric Holocene volcanic eruptions in Kamchatka. *Quaternary International* 13/14: 177-180
 11. Braitseva O.A., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. (1993) Radiocarbon dating and tephrochronology in Kamchatka. *Radiocarbon* 35/3: 463-476
 12. Певзнер М.М., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Раковская Э.М. Воздействие катастрофических эксплозивных извержений на природную среду (на примере вулкана Шивелуч). Известия АН СССР, серия географическая, 1994, №1. С.75-85.
 13. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Кирьянов В.Ю. Последнее кальдерообразующее извержение на Камчатке (вулкан Ксудач) 1700-1800¹⁴С лет назад. Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30-50.
 14. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. (1995) The ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia. *Bull Volcanol* 57/6: 383-402
 15. Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Volynets O.N. (1995) Kizimen volcano (Kamchatka) - future Mt. St.Helens? *J Volcanol Geotherm Res* 65: 205-226
 16. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене. Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 28-53
 17. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Базанова Л.И., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Особый тип катастрофических эксплозивных извержений - голоценовые суб-кальдерные извержения Хангар, Ходуткинский "маар", Бараний Амфитеатр (Камчатка). Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 3-24.
 18. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Yu. (1996) The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240, the greatest explosive event of our era in Kamchatka. *J Volcanol Geotherm Res* 70/1-2, 49-66
 19. Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Пономарева В.В., Мелекесцев И.В. Геохронология крупнейших эксплозивных извержений Камчатки в голоцене и их отражение в Гренландском ледниковом щите. Доклады РАН. 1997. Т. 352. № 4. С. 516-518.
 20. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. (1997) Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia. *Quaternary Res* 47: 125-139
 21. Певзнер М.М., Пономарева В.В., Мелекесцев И.В. Черный Яр - реперный разрез голоценовых маркирующих пеплов северо-восточного побережья Камчатки. Вулканология и сейсмология, 1997, №4, с.3-18.

22. Волюнец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д. Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка. *Петрология*. 1997. Т. 5. № 2. С. 206-221.
23. Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestsev I.V. (1998) Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. *Bull Volcanol* 59/7: 490-505
24. Волюнец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение вулканов. *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 4-5. С. 5-18.
25. Волюнец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород. *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 1. С. 31-45.
26. Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра. *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 2. С. 3-23.
27. Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Chen.Ch.H. (1999) Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber. *J Volcanol Geotherm Res* 91: 23-42
28. Zaretskaia N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Dirksen O.V. (2001b) Radiocarbon dating of the Kurile Lake caldera eruption (South Kamchatka, Russia) *Geochronometria* 20: 95-102
29. Дирксен О.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Кратер Чаша (Южная Камчатка) – уникальный пример массового выброса кислой пирокластики в поле базальтового ареального вулканизма. *Вулканология и сейсмология*. 2002. № 5. С. 3-10
30. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Эндегенные катастрофы в голоцене на Камчатке и Курильских островах. Доклады РАН. 2003. Т. 389. № 5. С. 662-665.
31. Gusev A.A., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Sulerzhitsky L.D. (2003) Great explosive eruptions on Kamchatka during the last 10,000 years: self-similar irregularity of the output of volcanic products. *J Geophys Res* 108/B2: 2126.
32. Tibaldi A., Lagmay A.F.M., Ponomareva V., Garcia M. (2003) Basement-volcano interplay and human activities (IGCP project 455). *Geological Correlation*, 31, 126-132
33. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Пинегина Т.К., Дирксен О.В. 0-650 гг. – этап сильнейшего природного катастрофизма нашей эры на Камчатке. *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 6. С. 3-23.
34. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П., Пономарева В.В., Певзнер М.М. 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX веках). Часть I. 1650-1964 гг. *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 5. С. 3-19.
35. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П., Пономарева В.В., Певзнер М.М. 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX веках). Часть II. 1965-2000 гг. *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 1. С. 5-24.
36. Bindeman I.N., Ponomareva V.V., Bailey J.C., Valley J.W. (2004) Kamchatka Peninsula: a province with high-d¹⁸O magma sources and large ¹⁸O/¹⁶O depletion of the upper crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68/4: 841-865

37. Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., Rinkleff P.G., Dirksen O.V., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaia N.E., Rourke R. (2004) The 7600 (^{14}C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships. *J Volcanol Geotherm Res* 136: 199–222
38. Tibaldi A., Lagmay A.F.A., Ponomareva V.V. (2005) Effects of basement structural and stratigraphic heritages on volcano behaviour and implications for human activities (the UNESCO/IUGS/IGCP project 455). *Episodes. J Int Geoscience* 28/3: 1–13.
39. Bourgeois J., Pinegina T.K., Ponomareva V.V., Zaretskaia N.E. (2006) Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East and their tectonic implications. *The Geol. Soc. Amer. Bull.* 11 (3/4), 449–463; doi: 10.1130/B25726.1.
40. Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R., Lagmay F.M., Melekestsev I.V., Ponomareva V., Rust D., Tibaldi A., Tunesi A., Corazzato C., Rovida A., Sakharov, A., Tengonciang A., and Uy H. (2006) Trenching studies of active faults in Kamchatka, eastern Russia: paleoseismic, tectonic and hazard implications. *Tectonophysics*, 417: 285–304
41. Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. (2006) Голоценовые почвенно-пирокластические чехлы Центральной Камчатской депрессии: возраст, строение, особенности осадконакопления. *Вулканология и сейсмология*, №1, с. 24–38.
42. Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V. (2006) Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene-Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia. *J Volcanol Geotherm Res* 158: 117–138.
43. Лавров Н.П., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А., Акинин В.В., Гурбанов А.Г., Евдокимов А.Н., Кудряшова Е.А., Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сахно В.Г. (2006) Новейший вулканизм Северной Евразии: районирование и обстановки формирования. *Доклады РАН*. т. 410, № 4, с. 498–502.
44. Сахно В. Г., Базанова Л. И., Глушкова О. Ю., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Сурнин А. А., Олаф Ю. (2006) Происхождение плейстоцен-голоценовых пеплов северо-востока России по данным микро- и редкоземельных элементов. *Доклады РАН*, 411 (4): 499–504.
45. Zaretskaya N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. (2007) Radiocarbon dating of large Holocene volcanic events within South Kamchatka (Russian Far East). *Radiocarbon*, 49/2: 1065–1078.
46. Tibaldi A., Corazzato C., Kozhurin A., Lagmay A.F.M., Pasquarè F.A., Ponomareva V.V., Rust D., Tormey D., Vezzoli L. (2008) Influence of substrate tectonic heritage on the evolution of composite volcanoes: Predicting sites of flank eruption, lateral collapse, and erosion. *Global and Planetary Change*, 61: 151–174.
47. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки. “Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле” 2008. № 2. Вып. 12, с. 10–24.
48. Solomina O., Pavlova I., Curtis A., Jacoby G., Ponomareva V., Pevzner M. (2008) Constraining recent Shiveluch volcano eruptions (Kamchatka, Russia) by means of dendrochronology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 8, pp. 1083–1097.
49. Bindeman I.T., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Singer B.S., Jicha B., Schmitt A.K., Chen C.H. (2010) Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar, U-Pb ages and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions. *J Volcanol Geotherm Res*, v. 189 (№ 1–2): 57–80

Подписано в печать 15.05.2009

Печать трафаретная

Усл.п.л. – 2,0

Заказ № 972

Тираж: 150 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru