

*В.В. Пономарева¹, И.В. Мелекесцев¹, Л.И. Базанова¹,
И.Н. Биндеман², В.Л. Леонов¹, Л.Д. Сулержицкий³*

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ КАТАСТРОФЫ НА КАМЧАТКЕ В СРЕДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ

¹ Учреждение Российской академии наук Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

² Department of Geological Sciences, University of Oregon

³ Учреждение Российской академии наук Геологический институт РАН

ВВЕДЕНИЕ

Камчатка, как и все другие звенья системы островных дуг обрамления Тихого океана, отличается максимальным разнообразием, силой и частотой опасных природных событий, ассоциирующихся с интенсивно протекающими здесь эндогенными процессами, в первую очередь с вулканизмом. Неоднократно случавшиеся на Камчатке геологические катастрофы, следы которых нам удалось выявить, были весьма сильными и приводили здесь к существенным (иногда кардинальным) изменениям природной среды на больших территориях или в масштабах всего региона. Как правило, они были многокомпонентными и включали множественные сильные, вплоть до катастрофических, вулканические извержения и землетрясения, гигантские обвалы и оползни, резкие и быстрые значительные деформации земной поверхности, цунами, грязевые и грязекаменные потоки. Не исключены такие катастрофы и в будущем, поскольку геодинамическая обстановка на Камчатке принципиально не изменилась в современную эпоху и вряд ли изменится в ближайшие сотни лет.

Интерес к катастрофическим эксплозивным вулканическим извержениям определяется во многом тем, что с ними связана наибольшая вулканическая опасность. Кроме того, наблюдения над современными извержениями показали, что они могут быть причиной краткосрочных изменений климата, особенно в тех случаях, когда поставляют значительное количество SO_2 для вулканических аэрозолей [Stothers, 1984; Rampino *et al.*, 1988; Rampino, Self, 1993]. Первое описание вулканического извержения было сделано очевидцем еще в 79 г. н. э. (классическое описание катастрофического извержения вулкана Везувий, оставленное Плинием-младшим). Тем не менее, за последние почти 2000 лет, за которые произошло как

минимум 20 крупнейших эксплозивных извержений с объемом пирокластики $\geq 10 \text{ km}^3$ и три с объемом $\geq 100 \text{ km}^3$ (табл. 1), только три таких извержения [Тамбора, 1815; Кракатау, 1883; и Пинатубо, 1991] были внятно описаны очевидцами и только последнее из них было изучено с применением инструментальных методов. Это говорит о том, что письменно зафиксированный опыт человечества в этой области крайне мал.

В то же время следы относительно недавних (плейстоценовых) извержений можно найти практически на любых территориях, удаленных от вулканических областей даже на тысячи километров. Например, на территории Восточной и Южной Европы в позднем плейстоцене неоднократно происходили очень сильные пеплопады, следами которых служат прослои и линзы погребенных вулканических пеплов из разных источников. Эти пеплопады были, как правило, связаны с катастрофическими эксплозивными извержениями, сопровождавшими возникновение кальдер обрушения [Мелекесцев *и др.*, 2002]. Наибольшее площадное распространение здесь имеет тефра кальдерообразующего извержения в районе Флегрейских полей (Апеннинский полуостров), имеющая возраст ~ 39 тыс. лет [Orsi *et al.*, 2004]. Эта тефра является одним из главных маркеров для донных осадков Средиземного моря и для отложений на суше как на территории современной Италии [Allen *et al.*, 1999], так и далее на север и восток более чем на 2.2 тыс. км от источника [Мелекесцев *и др.*, 2002; Pyle *et al.*, 2006]. Именно этот пепел является важнейшим маркером при археологических раскопках на этих территориях, перекрывая самую древнюю известную к настоящему времени культуру Северо-Восточной Евразии, связанную с деятельностью современного человека и обнаруженную в знаменитых стоянках Воронежской области, а в некоторых других стоянках разделяя культуру, связанные с деятельностью неандертальцев и современного человека.

Таблица 1. Крупнейшие эксплозивные извержения нашей эры с объемом изверженных продуктов $>10 \text{ км}^3$

Вулкан	Страна	Год извержения, н.э. (метод)	Число, месяц	Объем пирокластики, км ³
Амбрим	Вануату	50±100 (C)		>10
Черчилль	США, Аляска	60±200 (C)		>10
Таupo	Новая Зеландия	180 (G)		>100
Ксудач	Россия, Камчатка	240±100 (G)		>10
Иlopango	Сальвадор	450±30 (G)		>10
Рабаул	Папуа-Новая Гвинея	540±100 (C)		>10
Черчилль	США, Аляска	700±200 (C)		>10
Паго	Папуа-Новая Гвинея	710±75 (C)		>10
Дакатуа	Папуа-Новая Гвинея	800±50 (C)		>10?
Себоруко	Мексика	930±200 (C)		>10
Байтоушань	Китай	1000±40 (G)		>100?
Куилотоа	Эквадор	1280 (?) (G)		>10
Кубае	Вануату	1452±10 (I)		>10
Билли Митчелл	Папуа-Новая Гвинея	1580±20 (C)		>10
Хуайнапутина	Перу	1600	19.02	>10
Лонг Айленд	Папуа-Новая Гвинея	1660±20 (C)		>10
Тамбора	Индонезия	1815	10.04	>100
Кракатау	Индонезия	1883	27.08	>10
Санта-Мария	Гватемала	1902	24.10	>10
Новарупта	США, Аляска	1912	06.06	>10
Пинатубо	Филиппины	1991	15.06	>10

Примечание: В третьей колонке в скобках указан метод определения возраста. С – радиоуглеродный возраст, G – калиброванный радиоуглеродный возраст, I – счет слоев по ледниковому керну. Если метод не указан, то дата извержения установлена по письменным источникам. Данные взяты из работы [Siebert, Simkin, 2002]

Пепел голоценового кальдерообразующего извержения в районе Курильского озера (Камчатка) был обнаружен в озерных и наземных отложениях на территории от Магадана до верховьев Индигирки на расстоянии до 1.6–1.7 тыс. км от источника [Мелекесцев и др., 1991; Андерсон и др., 1998; Ponomareva et al., 2004], а пепел позднеплейстоценового извержения Тоба был обнаружен за 3 тыс. км от источника [Rose et al., 1990]. Такой дальний перенос пепла объясняется тем, что пепловое облако сильного извержения достигает верхних слоев атмосферы и попадает в так называемые струйные течения, которые и переносят тончайший пепел на огромные расстояния. Самое большое расстояние от источника, на котором пока были идентифицированы частицы какого-либо пепла ~4.5 тыс. км: на этом расстоянии от кальдеры Аньякчак (Аляска) был обнаружен в ледовом керне Гренландии пепел, связанный с голоценовым извержением этого эruptивного центра [Pearce et al., 2004].

Наземное изучение и датирование следов крупных извержений вблизи их источников в последние пару десятилетий активно ведется во многих районах мира. Именно за эти последние десятилетия были открыты, изучены и датированы многие крупные извержения. Так, если мы сравним каталоги извержений, опубликованные в 1970–1980-х гг. (например, [Гущен-

ко, 1979]), с современным каталогом [Siebert, Simkin, 2002], то сможем отметить существенный «прирост» количества активных вулканов и сильных прошлых извержений за последние пару десятилетий. Например, из примерно 20 сильнейших эксплозивных извержений нашей эры (табл. 1) 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 голоцене и позднем плейстоцене, создается прямо на наших глазах. По-видимому, наиболее полные летописи голоценовых эксплозивных извержений имеются для таких районов как Япония [Machida, Arai, 1992], Исландия [Hafaldason et al., 2000], Камчатка [Брайцева и др., 1997; 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 и Алеутские острова). Еще больше пробелов в глобальной летописи крупнейших плейстоценовых вулканических извержений, хотя крупнейшие из них отличались гораздо большими масштабами, чем голоценовые. Об этом можно судить по большим размерам плейстоценовых кальдер, по большим объемам проксиимальных отложений плейстоценовых кальдерообра-

зующих извержений, по большой мощности пеплов из глубоководных морских скважин. 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.

КРУПНОЕ ЭКСПЛОЗИВНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ: СЦЕНАРИЙ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

Перед вулканическим извержением обычно происходят землетрясения, сопровождающие подъем магмы к поверхности. Такие землетрясения могут приводить к крупным обвалам как самих вулканических построек, так и окружающих гор. Кроме того, при продвижении магмы могут происходить значительные деформации земной поверхности. Крупное эксплозивное извержение часто начинается как бы с «пробы сил» – умеренного извержения, роль которого состоит в удалении части магмы из магматического очага, что ведет к уменьшению давления в последнем и способствует образованию газовых пузырьков. Затем происходит плинианское извержение с выбросом тефры и обломков, вылетающих из кратера по баллистической траектории. 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 квадратных километров, может быть погребена и/или сожжена. При контакте пирокластических потоков со снегом и льдом образуются лахары и пемзово-водные потоки. При опустошении корового магматического очага может произойти обрушение его кровли с образованием кальдеры, сопровождающееся землетрясениями и обвалами на прилежащих территориях. Процессы, связанные с извержением островного или прибрежного вулкана, особенно такие, как кальдерообразование или обвалы, могут привести к разрушительным цунами. Например, цунами в Средиземном море, связанное с извержением вулкана Санторин около 1600 г. до н.э., уничтожило флот на расстоянии 105 км вблизи о. Крит и явилось причиной смерти тысяч человек вдоль побережья [LaMoreaux P. E., 1995]. 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 на климат. Считается установленным, что вулканическое извержение может воздействовать на климат в глобальном масштабе. В качестве примеров доказанного глобального воздействия исторических вулканических извержений обычно приводят детально описанный в литературе «год без лета», наступивший в 1816 г., через год после извержения в. Тамбора (апрель 1815 г., >100 км³ пирокластики) [Stothers, 1984]. В 1816 г. вследствие сургового лета погиб урожай не только в Северной Европе, но и на Северо-Востоке США и в Восточной Канаде, а также на Юго-Западе Китая. К косвенным последствиям этого извержения можно отнести следующие вызванные неблагоприятными климатическими условиями события: активное продвижение поселенцев в США с Востока страны на Средний Запад, восстания в Англии и во Франции, объявление чрезвычайного положения в Швейцарии и т. п. Установлено, что смертность в Западной Европе в 1816 г. резко увеличилась. В то же время извержение в. Тамбора далеко не самое сильное из изученных извержений: так, хорошо изученные извержения в вулканических центрах Таупо (26.5 тыс. л. н.) или Тоба (74 тыс. л. н.) выбросили на поверхность на порядок больше материала, чем любое из самых сильных голоценовых извержений.

КРУПНЕЙШИЕ ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В ГОЛОЦЕНЕ

Полуостров Камчатка лежит над северо-западной окраиной Тихоокеанской плиты, пододвигающейся под Камчатку со средней скоростью ~8 см/год [DeMets, 1992]. На севере система ограничена структурами западной части Алеутской дуги. Тридцать семь крупных вулканических центров Камчатки проявляли активность только за последние 10 тыс. лет [Пономарева и др., 2008]. Молодые камчатские вулканы принято объединять в два вулканических пояса: Восточный вулканический пояс и Срединный хребет (СХ). Восточный пояс можно далее подразделить на Восточную фронтальную зону и зону Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) (рис. 1). Общий поперечник зоны вулканизма превышает 250 км, что делает Камчатскую вулканическую дугу одной из самых широких дуг в мире. Распределение позднеплейстоцен-голоценовых вулканических центров в целом соответствует таковому предшествующего позднеплиоцен-среднеплейстоценового этапа (рис. 1). Все три вулканических зоны в плане надстраивают друг друга кулисообразно с юго-востока на северо-запад. Большинство камчатских кальдер и связанные с ними поля игнимбритов, свидетель-

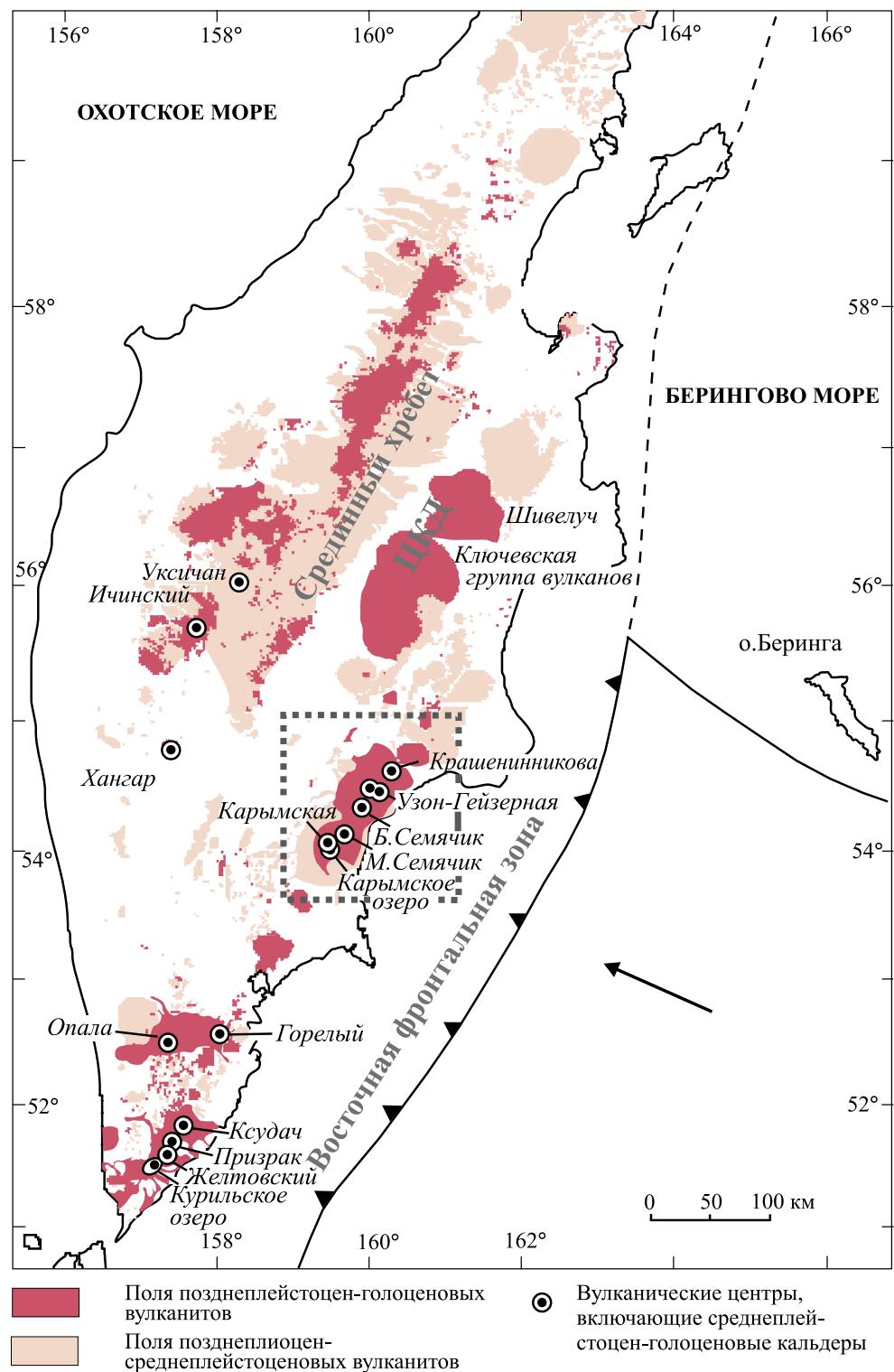


Рис. 1. Схема позднеплиоцен-голоценовых вулканических полей Камчатки. Штриховая линия ограничивает участок, показанный на рис. 2

ствующие о крупнейших извержениях, расположены в пределах Восточной фронтальной вулканической зоны, образуя цепи между Кроноцким и Карымским озерами (рис. 1 и 2) и затем между вулканом Ксудач и Курильским озером. В ЦКД кальдеры, связанные с выбросом пирокластики, не известны. Вершинные кальдеры диаметром 3–5 км на вул-

канах Ушковский (Плоский Дальний) и Плоский Толбачик образовались в результате обрушения в ответ на массовые излияния лав на склонах вулканов [Мелекесцев и др., 1974]. В Срединном хребте расположены связанные с выбросом пирокластики гнездовые кальдеры Уксичан, Ичинская и Хангар (рис. 1, табл. 2).

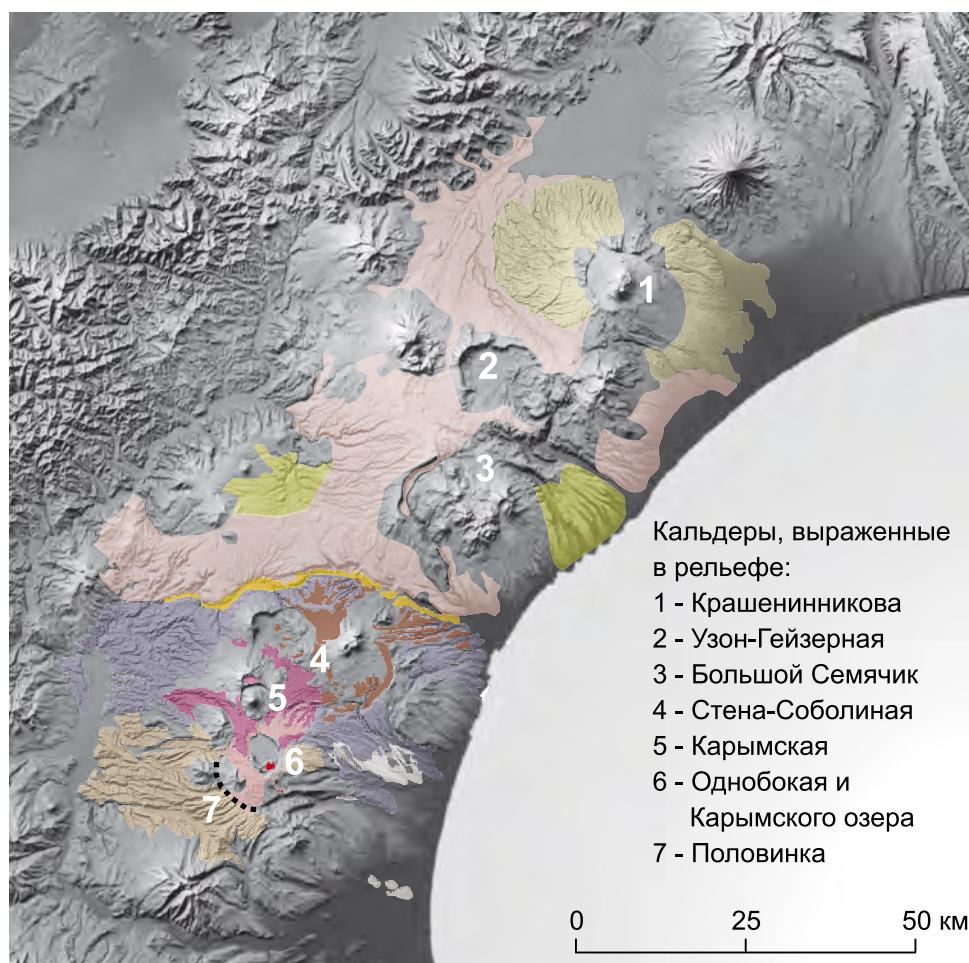


Рис. 2. Кальдеры и игнимбриты центрального участка Восточного вулканического пояса.

Отдельные игнимбритовые покровы показаны разными цветами; их границы показаны в соответствии с картами, приведенными в работах [Вулканический центр..., 1980; Флоренский, Трифонов, 1985; Леонов, Гриб, 2004]. Возрасты покровов см. в табл. 2

В результате многолетних исследований установлено, что за последние 10 тыс. ^{14}C лет на Камчатке произошло более 40 крупных эксплозивных извержений с объемами тефры 0.5–170 km^3 (табл. 3) [Брайцева и др., 1997; Ponomareva *et al.*, 2007a]. Реконструированы параметры этих извержений, включая возраст, объем и состав изверженных пород, ареалы распространения пеплов. В широко известном каталоге «Вулканы мира» [Siebert, Simkin, 1994] отмечается, что «Камчатка, безусловно, лидирует в мире по количеству извержений, датированных с помощью тefрохронологии и/или радиоуглеродного метода, и по количеству крупных (с объемом продуктов более 0.1 km^3) доисторических извержений. Ни один другой регион мира не имеет столько эксплозивных извержений (86 %)». В постоянно обновляемый каталог «Вулканы мира» в настоящее время включено 720 эксплозивных извержений с объемом продуктов более 0.1 km^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.

Наши исследования показали, что самое крупное голоценовое эксплозивное извержение на Камчатке было связано с образованием кальдеры Курильского озера (КО). Объем его тефры достигал 140–170 km^3 , то есть оно входит в первую десятку крупнейших голоценовых извержений в мире [Ponomareva *et al.*, 2004]. Семь голоценовых извержений имели объем изверженного материала в интервале 8–19 km^3 (табл. 3). Пять голоценовых извержений привели к формированию кальдер: уже упомянутой кальдеры Курильского озера, кальдеры Карымской и трех кальдер в массиве Ксудач. Кальдеры имели диаметр 2–8 км, площади равнин пирокластических потоков варьировали в пределах 150–1900 km^2 . Каждое кальдерообразующее извержение привело к существенному изменению рельефа и гидросети на огромной территории.

Извержению КО предшествовал перерыв в вулканической деятельности на юге Камчатки длительностью ~1500 лет, на что указывает почва

Таблица 2. Крупнейшие среднеплейстоцен-голоценовые эксплозивные извержения Камчатки, приведшие к образованию кальдер

Название кальдеры	Возраст, тыс. лет (Метод)	Размеры кальдеры (км)	Вулканическая зона
Уксичан II	Средний плейстоцен (Морфология)	12	СХ
Уксичан I	Средний плейстоцен (Морфология)	12×13	СХ
Ичинская III	Поздний плейстоцен (Стратиграфия)	5×3	СХ
Ичинская II	Средний плейстоцен (Морфология)	~20	СХ
Хангар II	38–40 (^{14}C)	6	СХ
Хангар I	398 ± 8 (Ar-Ar)	12×16	СХ
Крашенинникова	35–38 (^{14}C)	12×10	ВВФ
Узон-Гейзерная II	39 (^{14}C)	18×9	ВВФ
Узон-Гейзерная I	278 ± 17 (Ar-Ar)	16×10	ВВФ
Большой Семячик II	Поздний плейстоцен (Стратиграфия)	10	ВВФ
Большой Семячик I	524 ± 82 (Ar-Ar) 560 ± 45 (Ar-Ar)	10×10	ВВФ
Малый Семячик	~20 (Стратиграфия)	7	ВВФ
Стена-Соболиный II	Средний плейстоцен (Морфология)	20×10	ВВФ
Карымская	7.9 (^{14}C)	5	ВВФ
Академии Наук (Карымского озера)	28–48 (Трековое датирование)	5	ВВФ
Однобокий	69.4 ± 3.3 (Ar-Ar)	4×6	ВВФ
Половинка	432 ± 84 (Ar-Ar)	>42	ВВФ
Горелая II	33–34 (^{14}C)	?	ВВФ
Горелая I	361 ± 8 (Ar-Ar)	13×9	ВВФ
Опала	39–40 (^{14}C)	15	ВВФ
Ксудач I	162 ± 17 (Ar-Ar)	9	ВВФ
Ксудач II	Поздний плейстоцен (Морфология)	8	ВВФ
Ксудач III	8.8 (^{14}C)	?	ВВФ
Ксудач IV	6 (^{14}C)	?	ВВФ
Ксудач V	1.8 (^{14}C)	6×3	ВВФ
Призрак I	Поздний плейстоцен (Морфология)	6	ВВФ
Призрак II	Поздний плейстоцен (Морфология)	?	ВВФ
Желтовская	Поздний плейстоцен (Морфология)	5	ВВФ
Паужетка	443 ± 8 (Ar-Ar)	27×18	ВВФ
Курильского озера-Ильинская	7.6 (^{14}C)	7	ВВФ

Примечание: Кальдеры перечислены с севера на юг. Римские цифры указывают на номер кальдеры в серии четвертичных кальдер данного вулканического центра. Обозначения вулканических зон: СХ – Срединный хребет, ЦКД – Центральная Камчатская депрессия, ВВФ – Восточная фронтальная вулканическая зона. Возрасты и размеры кальдер по работам: [Действующие вулканы..., 1991; Леонов и Гриб, 2004; Леонов и др., 2008; Мелекесцев и др., 1974; Bindeman et al., 2010; Braitscheva et al., 1995; Ponomareva et al., 2004]

мощностью 5–20 см, погребенная продуктами извержения [Ponomareva et al., 2001]. Землетрясения, сопровождавшие подъем магмы к поверхности, по-видимому, спровоцировали обрушение постройки вулкана Пра-Ильинского в сторону депрессии, которая находилась на месте современного Курильского озера [Ponomareva et al., 2004]. Средний радиоуглеродный возраст извержения ~7600 ^{14}C лет – установлен на основании четырнадцати индивидуальных дат (рис. 3; [Zaretskaya et al., 2001]), что позволяет оценить калибранный возраст извержения в 8500 лет.

Извержение КО началось с фреатоплинианской деятельности, скорее всего через воды озера, заполнившего раннеголоценовую депрессию. В результате этой деятельности был отложен риолитовый стекловатый тонкий пепел (рис. 4, a) и серия небольших пирокластических потоков (единица I) (рис. 3). Пепел начального извержения покрыл площадь более 500 км² с максимальными мощностями в долине р. Озерной в З-СЗ направлении от источника. Исследования пыльцы, погребенной пирокластикой, показали, что извержение произошло в начале сезона вегетации, который сейчас на Камчатке наступает

Таблица 3. Крупнейшие эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 000 лет

Вулкан-источник	Индекс тефры	Средний ^{14}C возраст, л.н.	Объем тефры, км ³	Состав тефры
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
Хангар	ХГ	6850	14–16	Дацит-риодакит
Карымская кальдера	КРМ	7900	13–16	Риодакит
Авачинский	II AB ₃	3300	>1.2	Андезито-базальт
	II AB ₁ (AB ₁)	3500	≥3.6	«
	IAB24 (AB ₂)	4000	≥0.6	Андезито-базальт – андезит
	IAB20 (AB ₃)	4500	≥1.1	Андезит
	IAB12 (AB ₄)	5500	≥1.3	«
	IAB2	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	Риодакит
Ксудач, конус Штюбеля	KШt ₃	1907 г.	1.5–2	Андезито-базальт – дацит
	KШt ₁	950	0.8–1	«
Ксудач, кальдеры	KС ₁	1800	18–19	Риолит
	KС ₂	6000	7–8	Андезит
	KС ₃	6350	0.5–1	Риодакит-андезит
	KС 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 возрасты округлены до ближайших 50 лет. Рассчитанные средние возрасты и индивидуальные даты приведены в следующих работах: [Базанова и Певзнер, 2001; Базанова и др., 2004; Брайцева и др., 1997; Дирксен и др., 2002; Певзнер и др., 1997; Braitseva et al., 1997; Ponomareva et al., 2004; Zaretskaya et al., 2007]. Новые индексы горизонтов тефры в Авачинского по работе [Базановой и др., 2004], старые индексы (в скобках) – по работам [Брайцева и др., 1997; Braitseva et al., 1997].

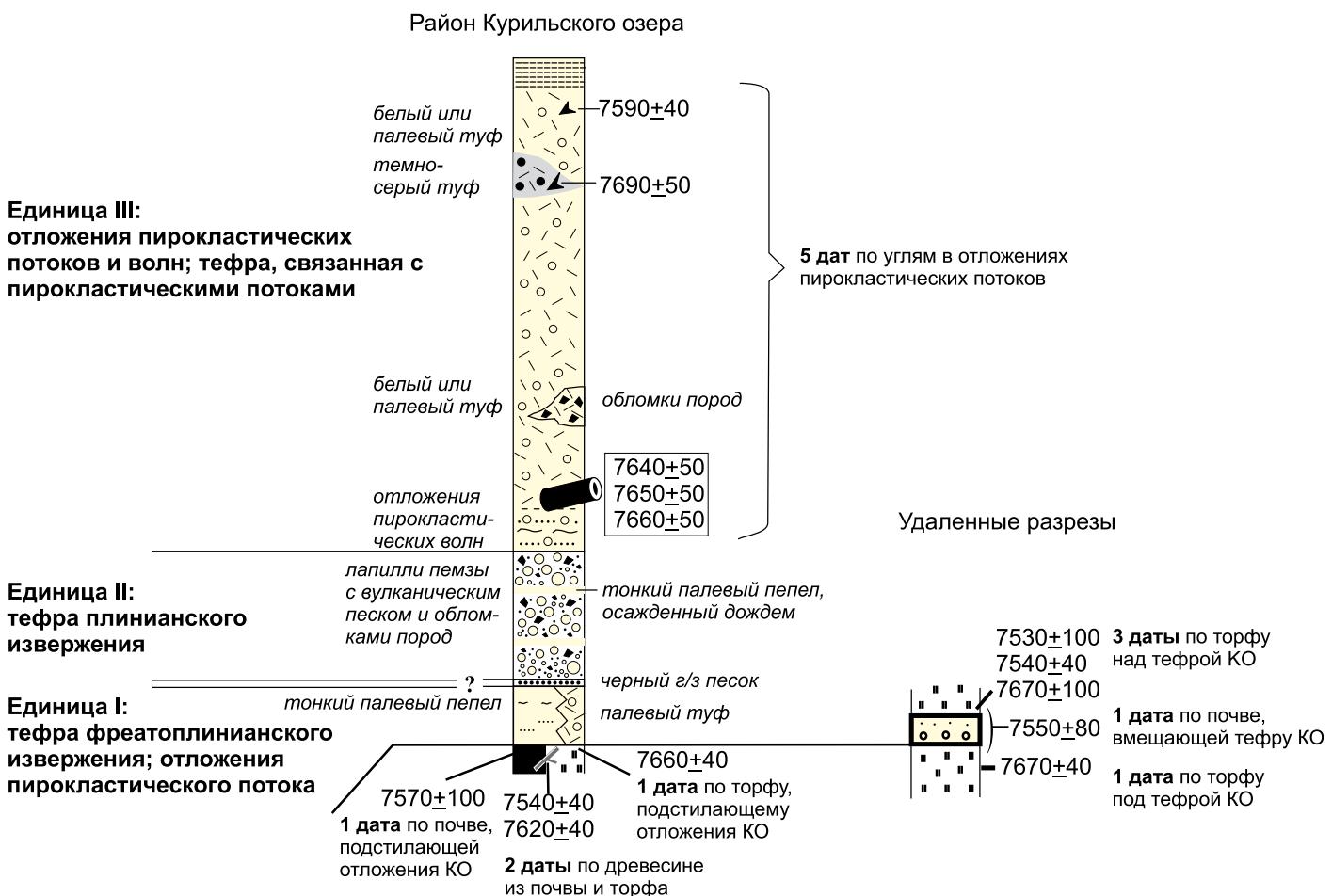
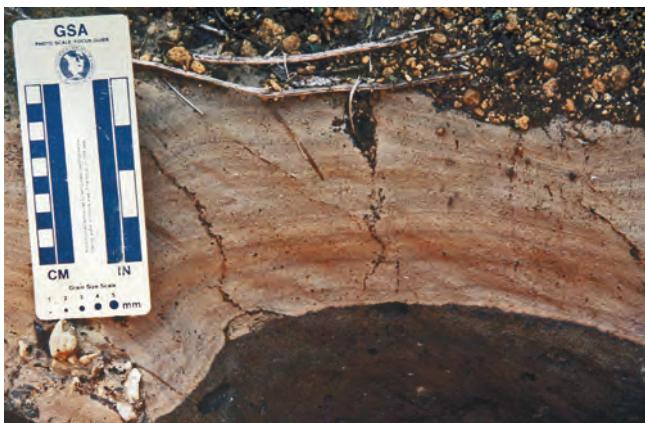


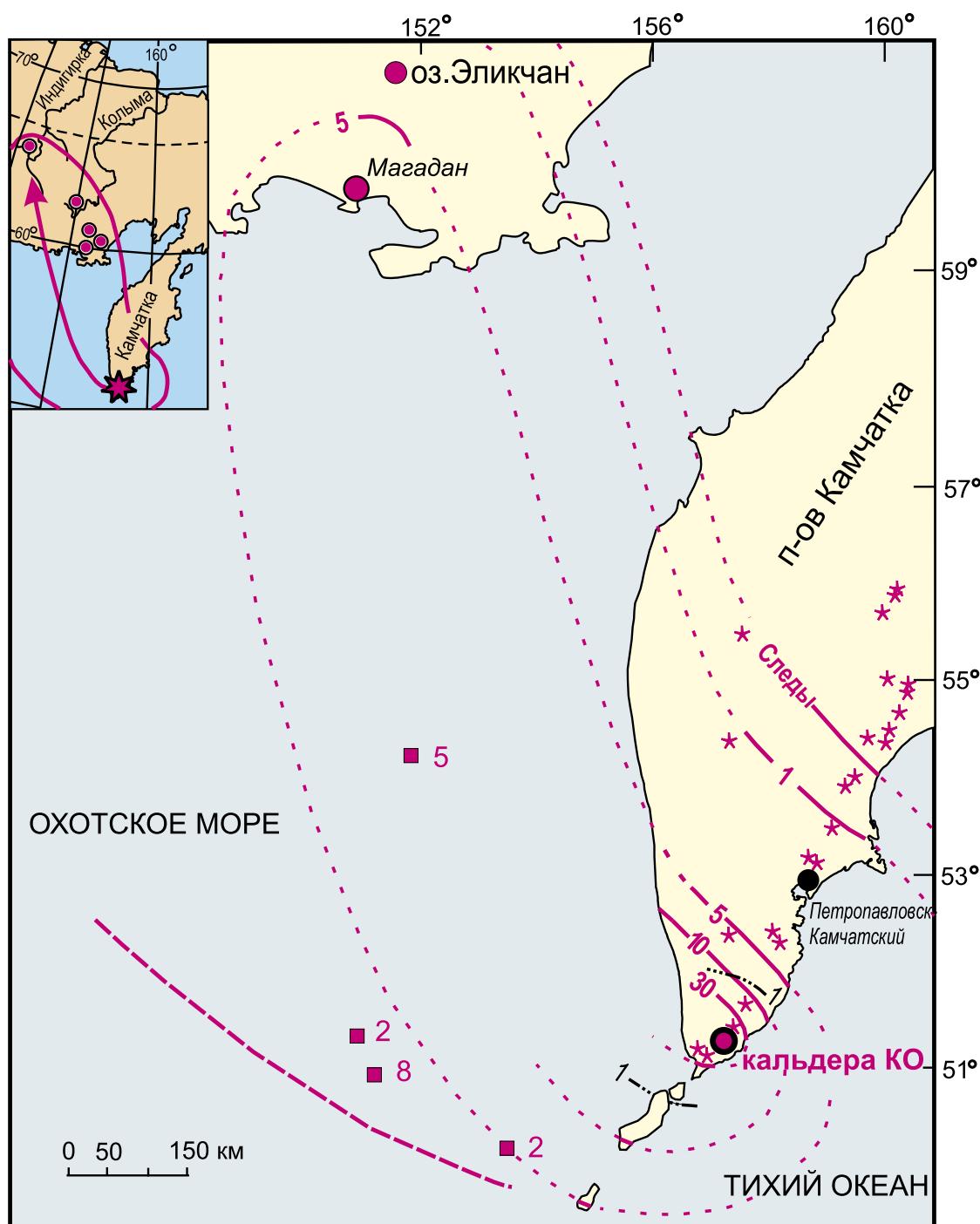
Рис. 3. Сводный разрез пирокластики извержения КО и радиоуглеродные даты, полученные как вблизи кальдеры (слева), так и в удаленных разрезах (справа)

в июне, во время цветения ольховника, ивы и каменой березы, но еще до массового цветения травянистых растений [Дирксен, Дирксен, 2004]. Начальная активность предположительно послужила спусковым крючком катастрофического плинианского извержения путем удаления небольшого объема магмы из очага, что способствовало образованию газовых пузырьков в остальной магме.

Когда жерло показалось над поверхностью воды, извержение изменило свой характер на плинианский, что привело к выбросу пемзовой тефры (единица II). Тефра выпала над большой частью п-ова Камчатка (рис. 5). Близи же озера ее мощность превысила 5 м (рис. 4, б). Единая толща пемзы без каких-либо четких внутренних границ указывает на отложение ее из устойчивой эруптивной колонны. Эруптивная туча

Рис. 4. Различные фации отложений кальдерообразующего извержения КО. Римские цифры обозначают различные единицы отложений. а – Единица I: базальный пепел фреатоплинианского извержения, перекрытый пемзовой тефвой (единица II). Пос. Паужетка, 20 км к западу от оз. Курильского. Фото Ф. Кайла. б – Нижняя часть пачки пирокластики КО вблизи северо-западного берега оз. Курильское. Снизу вверх: I – отложения начальной стадии извержения; II – пемзовая тефра плинианского извержения; III – нижняя часть пемзового туфа (отложений пирокластического потока). Фото О.В. Дирксена. в – Спекшийся туф п-ова Пуломынк, западный берег оз. Курильского. Высота обнажения – около 15 м. Фото Л.Д. Сулержицкого. г – «Кутхины баты» – стометровое обнажение белого пемзового туфа в долине р. Озерной. Фото Л.Д. Сулержицкого. д – Белый пемзовый туф, включающий линзы темно-серого туфа. Долина р. Унканович, 9 км к северу от оз. Курильского. Фото Н.П. Смелова. е – Тефра КО на о. Шумшу, Северные Курилы, 90 км к юго-западу от кальдеры. Сочетание тонкого (верх) и грубого (низ) пепла говорит о том, что тефра дальнего разноса состоит из отложений пемзопада (единица II) и пепла, связанного с пирокластическими потоками (единица III). Фото В.В. Пономаревой

a*б**в**г**д*



- | | | | |
|------------|---|------------|---|
| 1 | Изопахиты тефры КО по наземным данным (мощность в см) | 2 | Подводные скважины и мощность тефры КО (см) |
| -·- | Предполагаемые изопахиты | -1- | 1-см изоплета тефры КО |
| —·— | Южная граница распространения тефры КО по данным подводного бурения (Gorbarenko et al., 2002) | * | Голоценовые вулканы |

Рис. 5. Распространение тефры КО (мощность в см). Врезка показывает места находок и общее распространение тефры КО на материке

сносились к северо-западу в направлении Охотского моря. Пемзовые бомбы и лапиллы отвечали по составу риолитам и дацитам. Обогащение тефры обломками пород указывает на расширение жерла, которое и привело к обрушению эруптивной колонны и образованию пирокластических потоков единицы III (рис. 3 и 4, *г, д*). Пирокластические потоки заполнили

долины и другие понижения рельефа, а также перекрыли возвышенности тонким плащом пирокластики на расстоянии более 50 км от источника (рис. 6). Пирокластические потоки вошли в Тихий океан на восточном и в Охотское море на западном побережье Камчатки. Они имели высокую подвижность, что доказывают находки пемзовых туфов за высокими пре-

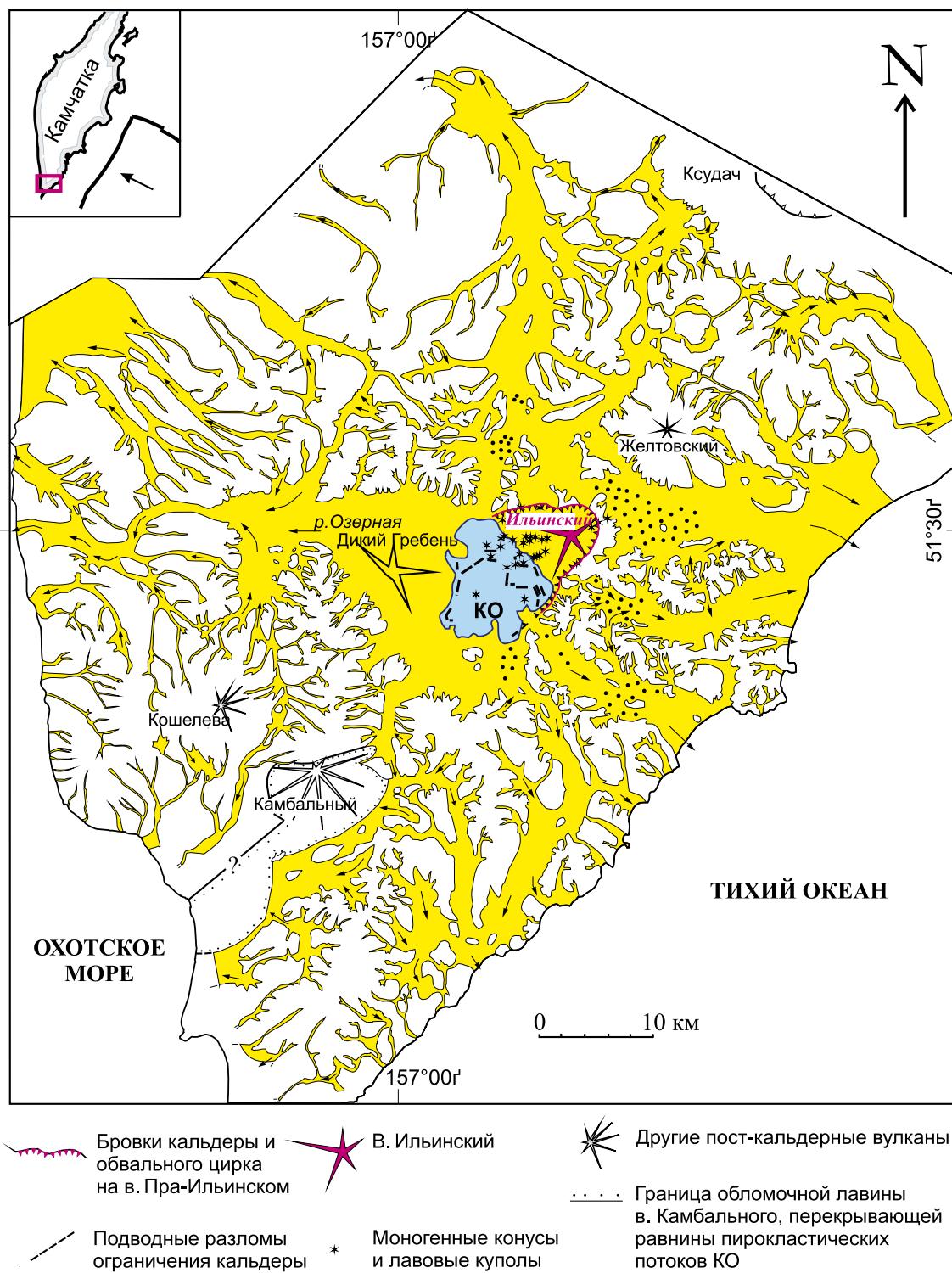


Рис. 6. Распространение пирокластических потоков извержения КО (желтая заливка; стрелки показывают направления движения). Черные точки на желтом фоне показывают распространение темно-серого туфа

пятствиями, такими как уступ древней Паужетской кальдеры с абсолютной отметкой 1000 м.

Отложения пирокластических потоков образуют единую остывшую единицу и демонстрируют переход от светлоокрашенного риолитового пемзового туфа к темно-серому андезито-базальтовому и обратно к риолитовому (рис. 3). В более темных зонах материал представлен темно-серым андезито-базальтовым и андезитовым шлаком и полосчатыми черно-белыми шлаками. Зональные отложения пирокластических потоков, изменяющиеся от светлых риолитов в основании к темноокрашенным и более основным (мафическим) разностям у кровли, широко распространены и детально описаны в районах Кратерного озера, Каскадные горы, США [Bacon, 1983] и кальдеры Аньякчак, Аляска [Miller *et al.*, 1998]. Такая вертикальная зональность, как принято считать, отражает стратификацию магмы в камере [Cas, Wright, 1987]. Однако присутствие риолитового туфа поверх темного более основного туфа является отличительной особенностью отложений кальдеры Курильского озера и, по-видимому, объясняется геометрией магматической камеры. Спекшиеся разности пемзовых туфов обнаружены на западном берегу Курильского озера (рис. 4, *e*).

Взаимодействие пирокластических потоков с водой было значительным. На это указывает присутствие в отложениях аккреционных лапилли, которые скорее всего образовались в результате захвата воды с поверхности, а также фумарольные ходы, которые, возможно, образовались вследствие отложения пирокластики на мокрый грунт или воду рек и озер. Большой объем тонкого пепла, связанного с пирокластическими потоками, образовался, когда они достигли Охотского моря и Тихого океана. Этот пепел наряду с пемзой единицы II стал существенной частью пепла дальнего разноса (рис. 4, *e*).

К северо-западу от кальдеры, вдоль основной оси распространения пепловой тучи, 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 1.7 тыс. км от источника (рис. 5, врезка) [Мелекесцев и др., 1991а; Андерсон и др., 1998; Ponomareva *et al.*, 2004]. Пепел имеет мощность 5–7 см в обнажениях около г. Магадан и 0.1 см в озерных отложениях в верховьях Индигирки (рис. 5, врезка). Пепел КО был также обнаружен на Северных Курилах. В большинстве обнажений на Северных Курилах и на западном берегу Камчатки пепел КО имеет мощность 10–30 см и нормальную градационную сортировку с грубым пеплом в нижней и тонким пеплом в верхней части (рис. 4, *e*). Это строение тефры и огромный объем отложений пирокластических потоков извержения заставляют предположить, что тефра дальнего разноса состоит как из отложений пемзопада, так и пепла пирокластических потоков (phoenix clouds) [Sparks and Walker, 1977; Sigurdsson and Carey, 1989], имеющего то же направление распространения. Горизонт КО имеет

большой тефрохронологический потенциал, так как позволяет коррелировать различные голоценовые отложения в пределах огромной территории. Рисунок изопахит пепла КО показывает, что он также должен быть обнаружен к востоку от Камчатки в осадках Тихого океана (рис. 5).

Простой набор фаций в продуктах извержения, отсутствие перерывов в накоплении пирокластики и четко выраженное распространение пеплопада указывают на короткую продолжительность извержения. В результате извержения произошло обрушение кровли опустошенного магматического очага и образование кальдерной депрессии размером ~8 км. Кальдера занимает южную часть Курильского озера и ограничена почти вертикальными кольцевыми разломами, которые в некоторых местах перекрыты молодыми обвалами и конусами выноса [Бондаренко, 1990]. Крупные обвалы, отложения которых перекрывают во многих местах пирокластику КО, по-видимому, образовались во время обрушения кальдеры. По большинству долин сошли водно-пемзовые потоки, которые вынесли пемзу за пределы распространения пирокластических потоков.

За время извержения КО было выброшено по меньшей мере 140–170 км³ пирокластики. Такой объем дает возможность поставить извержение КО в один ряд с крупнейшими голоценовыми извержениями мира, такими как Тамбора [Stothers, 1984; Self *et al.*, 1984], Байтоушань [Horn and Schmincke, 2000], Кратерное озеро [Bacon, 1983] и кальдера Кикаи [Machida and Arai, 1992]. Извержение КО 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 тефры над полуостровом (рис. 5). 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 растений, поэтому растительность на поверхности отложений КО начала возобновляться довольно быстро [Дирксен, Дирксен, 2004]. Растения, способные к регенерации, в этих условиях могли сохраниться, по-видимому, только под мощными снежниками или на склонах долин, где не задерживалась пирокластика. Лишь за пределами изопахиты 5 см могло наблюдаваться положительное воздействие тефры на растительность за счет привноса полезных веществ в почву.

Грубо оценить время, необходимое для восстановления растительности после извержения КО, можно на основании анализа самых древних радиоуглеродных дат, полученных по органике, залегающей на тефре КО. В удаленных районах, например вблизи

вулканов Авачинский и Карымский [Braitseva *et al.*, 1995] и в районе Магадана [Мелекесцев и др., 1991], даты, полученные под и над пирокластикой, практически идентичны, что указывает на незначительное влияние извержения на растительность. При приближении к кальдере даты над пирокластикой КО становятся все более молодыми: 7200 ^{14}C лет на расстоянии 50–150 км от кальдеры и 6300 ^{14}C лет на расстоянии 30 км от кальдеры [Ponomareva *et al.*, 2001], что в какой-то степени говорит о скорости возобновления растительности на поверхности пирокластики. Палинологические исследования показали, что изменение характера растительности в результате извержения КО сопоставимо со сменами растительности, вызванными климатическими изменениями на глобальном уровне [Дирксен, Дирксен, 2004].

Карымская кальдера сформировалась ~ 7900 ^{14}C л. н., то есть немногим ранее, чем кальдера Курильского озера [Брайцева и др., 1997]. Общий объем пирокластики кальдерообразующего извержения – 13–16 км³, размер кальдеры 5×6.5 км, первоначальный объем полости кальдеры 7–8 км³ [Брайцева, Мелекесцев, 1989]. Извержение включало несколько выбросов тефры и образование серии пирокластических потоков, которые покрыли общую площадь 150 км² и имели длину

10–15 км. Главный сектор рассеяния тефры располагался к востоку от кальдеры и значительная его часть выпала над акваторией Тихого океана. В разрезах на Командорских островах в 450 км от источника пепел этого извержения имеет мощность 3 см [Кирьянов и др., 1986].

С вулканом Ксудач связано три голоценовых кальдерообразующих извержения [Брайцева и др., 1995]. С каждым из них ассоциируются мощные пирокластические отложения. Самым сильным было последнее кальдерообразующее извержение (КС₁), которое произошло ~ 1800 ^{14}C л. н. По характеру и параметрам оно близко к извержению Кракатау 1883 года. Общий объем пирокластики составил 18–19 км³, из них 14–15 км³ пришлось на тефру [Брайцева и др., 1995]. Высота эруптивной колонны во время извержения была 23 км [Bursik *et al.*, 1993]. Ось пеплопада прошла в северо-восточном направлении (рис. 7, *a*), пепел выпадал над всей территорией Восточной и Южной Камчатки, а на удалении 900 км в пос. Оссора его мощность в торфянике составляет 1–2 см. Пирокластические потоки извержения КС₁ достигали длины 20 км. Последствия извержения КС₁ для Камчатки можно оценить как экологическую катастрофу. Так, минимальная площадь уничтожения всего живого составила

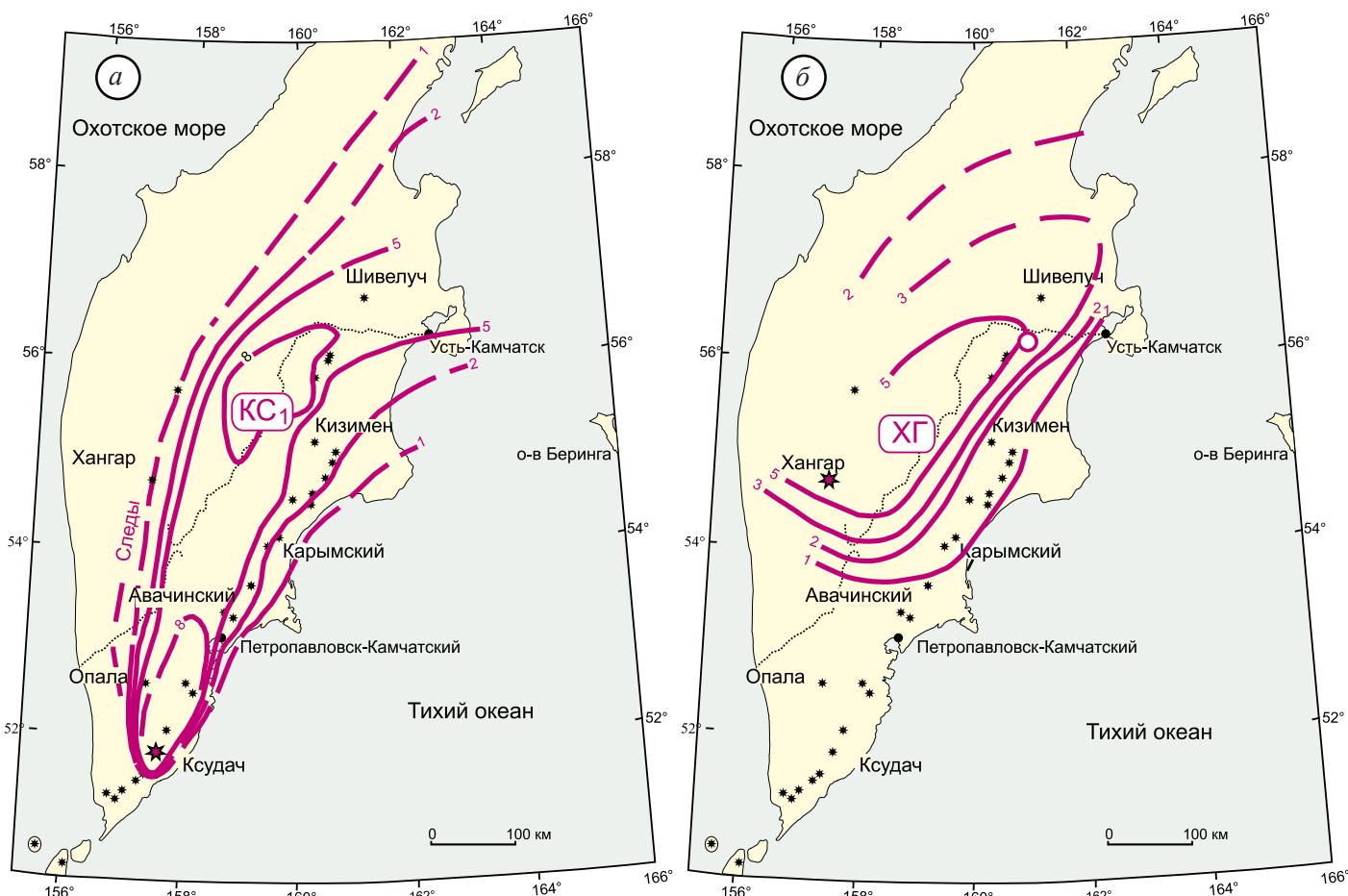


Рис. 7. Изопахиты тефры крупнейших голоценовых извержений КС₁ (~ 1800 ^{14}C лет) и ХГ (6850 ^{14}C лет), мощности в см

около 500 км². Растительность была серьезно повреждена на площади порядка 12000 км² [Braitseva *et al.*, 1996].

Второе по силе извержение вулкана Ксудач в голоцене (КС₂) произошло ~6000 ¹⁴C лет назад и также привело к формированию кальдеры. Пирокластические потоки распространялись по долинам рек северного склона, длина их достигала 10 км [Мелекесцев и др., 1995]. Ось пеплопада была направлена на северо-восток, тефра прослежена на расстояние около 800 км, ее идентификация подтверждена большим количеством анализов вулканического стекла. Поскольку северная часть зоны пеплопада была изучена лишь в последние годы, прежние оценки объема продуктов этого извержения (7–8 км³, [Braitseva *et al.*, 1995]) явно занижены. Вполне возможно, что по объему тефры извержение КС₂ не уступает рассмотренному выше извержению КС₁.

Ряд сильных извержений был связан с крупными эксплозивными кратерами, которые были расположены как на склонах действующих вулканов, так и вдали от них. Крупнейшее из таких извержений произошло ~6850 ¹⁴C л. н. на вулкане Хангар. Объем пирокластики извержения (ХГ) сопоставим с объемом продуктов кальдерообразующих извержений и составляет 14–16 км³. С извержением были связаны мощные пирокластические потоки длиной 15–20 км и тефра [Мелекесцев и др., 1996]. Ось пеплопада была направлена на северо-восток (рис. 7, б). Еще одно крупное извержение было связано с кратером Бараний Амфитеатр на склоне вулкана Опала [Мелекесцев и др., 1996]. Извержение произошло ~1500 ¹⁴C лет назад и продуцировало, по меньшей мере, 9–10 км³ пирокластики, которая распространилась на северо-восток. Извержения из кратеров Ходуткинский и Чаша уступают описанным выше по объему продуктов, но, тем не менее, являются довольно сильными (табл. 3). Объем продуктов первого из них – как минимум 1.5–2 км², а второго – ~1 км³.

Большинство извержений с объемом продуктов около 1–5 км³ не приводили к формированию кальдер, а были связаны с отдельными вулканами. Чаще всего сильные и катастрофические извержения в голоцене происходили на двух вулканах – Шивелуч и Авачинский. С вулканом Шивелуч в голоцене было связано не менее 60 сильных извержений, пеплы которых покрывали большие площади в северной части полуострова. С Авачинским вулканом было связано не менее семи крупных эксплозивных извержений с объемом пирокластики ≥0.5 км³ [Базанова и др., 2004]. Для них были характерны сильные пеплопады, пирокластические волны, а для некоторых извержений также и пирокластические потоки. Высота эруптивных колонн во время извержений колебалась от 16 до 28 км. Пирокластические потоки имели длину до 17 км и не достигали местоположения современных населенных пунктов, однако связанные с ними лахары неоднократно пересекали территорию современного г. Елизово и находящегося здесь главного аэропорта Камчатки. Самое мощное (объем продуктов 8–10 км³) извержение Авачинского вулкана произошло 7150 ¹⁴C л. н. Сильные

эксплозивные извержения происходили также на вулканах Безымянный, Кизимен, конус Штюбеля в кальдере Ксудач, Ильинский. Совершенно ясно, что нами перечислены лишь самые сильные эксплозивные извержения (табл. 3), а общее количество значительных вулканических событий было гораздо больше.

Учитывая объемы выброшенного пирокластического материала и рассчитанные высоты эруптивных колонн [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 и др., 1997]. Обнаружение в гренландском льду тефры кальдеры Аньячак (Аляска) [Pearce *et. al.*, 2004] подтверждает возможность присутствия там и камчатских пеплов.

КРУПНЕЙШИЕ ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ

Для плейстоценовых вулканов и кальдер до недавнего времени имелось лишь незначительное количество определений возраста радиометрическими методами, оценки их возраста основывались в основном на морфологии и стратиграфическом соотношении их продуктов с ледниковых отложениями. Лишь в последние годы было получено около десяти Ar-Ar дат для плейстоценовых игнимбритов Камчатки [Bindeman *et al.*, 2010], что позволило определить возраст целого ряда крупнейших эксплозивных извержений (табл. 2).

В плейстоцене горы Камчатки неоднократно были покрыты ледниками, которые затем оставили морены на окружающих низменностях. Ледниковые отложения, хорошо видные на аэрофото- и космических снимках, указывают на две стадии позднеплейстоценового оледенения, максимумы которых оценены в ~79–65 и 24–18 тыс. лет назад по аналогии с североамериканскими аналогами (ранний и поздний Висконсин) [Braitseva *et al.*, 1995]. Недавно полученные радиоуглеродные даты для отложений, относящихся к последнему максимуму, определяют их возраст примерно в 21 тыс. лет и хорошо согласуются с указанным выше интервалом [Брайцева и др., 2005]. Гораздо лучше обстоит дело с определением возраста в пределах возможностей радиоуглеродного метода (последние 40–50 тыс. лет).

Судя по соотношению пирокластики крупнейших эксплозивных извержений с ледниковыми отложениями и по морфологическому облику кальдерных усту-

пов, ряд кальдер и связанных с ними игнимбритовых полей образовались в позднем плейстоцене (табл. 2). Радиоуглеродное датирование тефры и игнимбритов некоторых позднеплейстоценовых кальдер позволило установить, что пять или шесть из них возникли между 30 и 40 тыс. лет назад [Braitseva *et al.*, 1995]. Датирование горизонтов тефры, содержащихся в разрезах позднеплейстоценовых отложений ЦКД, также указывает на сильную эксплозивную активность около 35–40 тыс. лет назад [Брайцева и др., 2005]. С позднеплейстоценовыми кальдерами были связаны как игнимбриты (спекшиеся туфы), так и неспекшиеся пемзовые туфы, достигающие мощности до 100 м вблизи источников. Из одиннадцати выявленных к настоящему времени среднеплейстоценовых кальдерообразующих извержений семь были недавно датированы Ar-Ar и U-Pb методами (табл. 2; [Bindeman *et al.*, 2010]). Из них шесть попадают в период ~280–550 тыс. л. н., причем три из них зажаты между 400 и 443 тыс. л. н. Это кальдеры Хангар, Половинка и Паужетка, расположенные совершенно в разных районах Камчатки (рис. 1). При этом за период между ~550 тыс. и 1.1 млн лет назад не удалось установить ни одного кальдерообразующего извержения.

Объемы пирокластики поздне- и среднеплейстоценовых кальдерообразующих извержений можно оценить лишь крайне приблизительно. Большая часть плейстоценовых кальдер существенно крупнее, чем голоценовые (табл. 2). Сравнение размеров кальдер, а также сравнение мощности плейстоценовых игнимбритов и пемз с мощностями голоценовой пирокластики заставляет предполагать, что объем продуктов плейстоценовых кальдерообразующих извержений превышал таковой сильнейшего голоценового извержения с образованием кальдеры Курильского озера, то есть был более 200 км³. По размеру камчатские кальдеры превосходят кальдеры соседних островных дуг (Алеутской и Курильской), что, возможно, объясняется более мощной корой на Камчатке. В работе [Hughes and Mahood, 2008] показано, что на Камчатке наблюдается самая высокая плотность кальдер размером >5 км на 1000 км дуги. Эти наблюдения подчеркивают, что вулканическая дуга Камчатки отличается самой высокой эксплозивностью.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРУПНЕЙШИХ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ

Рис. 8 показывает распределение крупнейших голоценовых эксплозивных извержений Камчатки и смежных островных дуг во времени. На нем можно видеть, что в сравнительно коротком интервале 7500–7900 ¹⁴C л. н. (т. е. между 8650 и 8900 л. н.) в Курило-Камчатской области происходила мощная вспышка вулканической активности, названная И.В. Мелекесцевым «веком ка-

тастроф» [Мелекесцев и др., 1998]. За это короткое время произошли крупнейшие эксплозивные извержения, связанные с формированием кальдер Курильское озеро и Карымская, имели место мощные извержения вулканов Кизимен и Шивелуч. Другой голоценовый пик эксплозивной активности приходится на период между 1800 и 1300 л. н., когда произошли последнее на Камчатке кальдерообразующее извержение на вулкане Ксудач, крупнейшее извержение из кратера Бараний Амфитеатр на склоне вулкана Опала и серия крупных извержений вулкана Шивелуч.

Мы решили сравнить камчатские данные с данными для других островных дуг, чтобы посмотреть, присутствуют ли в них пики эксплозивного вулканизма в масштабе голоцена, и если да, то когда они проявляются. Вначале это предприятиеказалось не очень перспективным в связи с крайне неравнозначностью каталогов по различным островным дугам. Эта неравнозначность касается и полноты каталогов (не все крупнейшие извержения еще установлены), и точности определения объемов изверженной тефры, особенно для вулканических центров, расположенных на островах. Например, для вулканической дуги Курильских островов, которая имеет протяженность >1000 км, до недавнего времени было известно всего два крупнейших голоценовых извержения, связанных с кальдерами Львиная Пасть на о. Итуруп и Тао-Русыр на о. Онекотан [Braitseva *et al.*, 1995], причем объемы продуктов этих извержений были оценены весьма условно. Учитывая перечисленные (и многие другие) недостатки региональных и глобального каталогов, мы опасались, что полученные в результате их обработки данные о временном распределении эксплозивных извержений будут не очень внятными. Но оказалось, что при сравнении активности нескольких вулканических дуг Тихого океана (рис. 8) бросается в глаза как наличие пиков эксплозивной активности во всех из них, так и совпадение этих пиков во времени. Во всех этих дугах имеются всего два крупных практически одновременных раннеголоценовых извержения, произошедших ~10 700 л. н. (кальдера Фишер на Алеутах и кальдера Львиная Пасть на Курилах). На Камчатке и Японии сильных извержений в это время не было.

Несомненный период сильных извержений прослеживается во всех дугах примерно между 9000 и 7000 л. н. (рис. 8). За это время здесь произошло 15 извержений с объемом продуктов более 10 км³. Именно в этот интервал укладывается описанный выше «век катастроф» и еще ряд крупнейших извержений на Камчатке, а также крупнейшее извержение Японии (кальдера Кикаи). Следующий интересный пик, лучше всего выраженный на Алеутах, имел место ~4000 л. н. В частности, попадает в этот период образование кальдеры Аньячак. На Камчатке это период скорее базальтовых извержений, которые обычно дают меньшие объемы, нежели извержения более кислых продуктов (риолитов). Самым крупным из эксплозивных извержений этого периода на

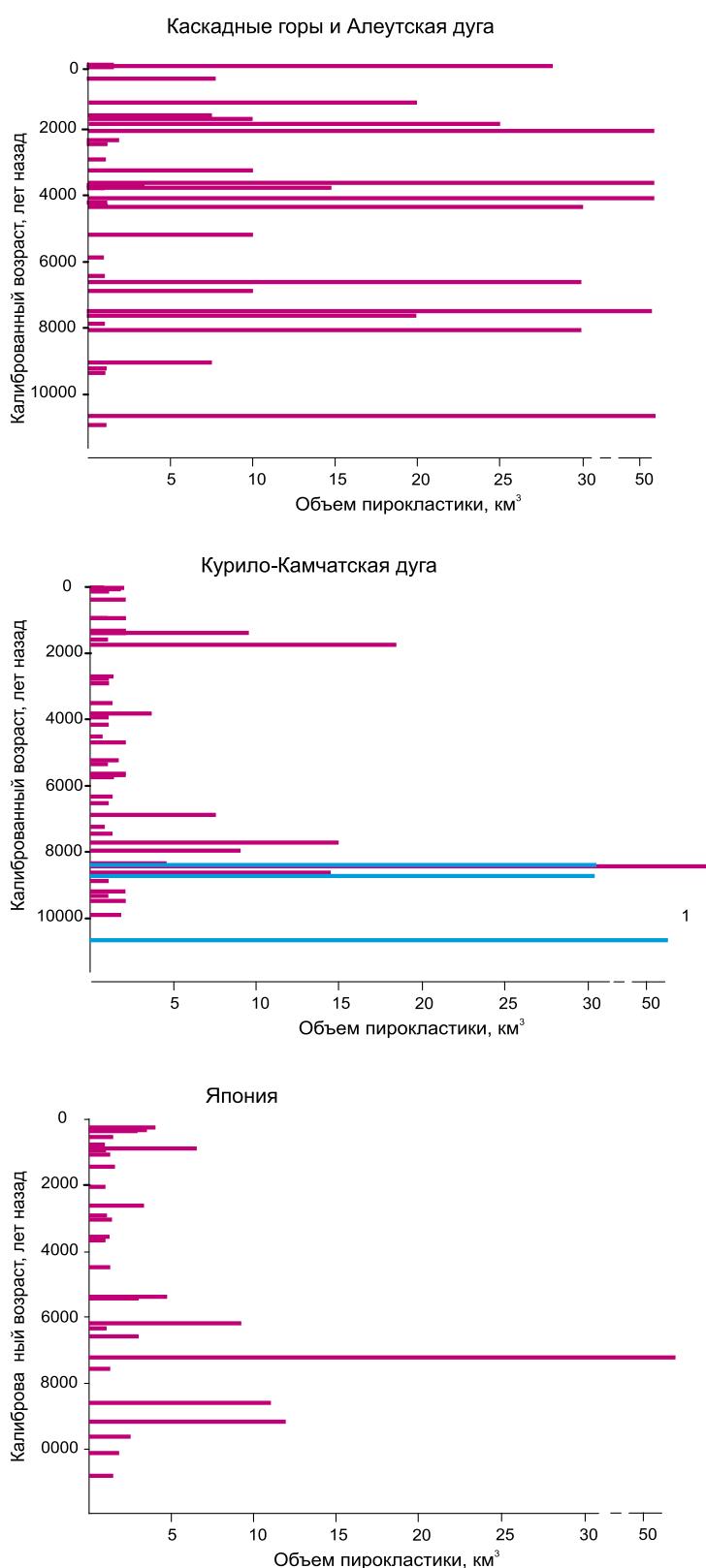


Рис. 8. Временное распределение крупнейших голоценовых эксплозивных извержений в некоторых вулканических дугах Тихого океана. Включены все эксплозивные извержения с объемом продуктов $>1 \text{ км}^3$. Три известных крупных извержения Курильских островов показаны синим цветом. Извержения Камчатки нанесены в соответствии с работой [Ponomareva et al., 2007a]. Извержения других островных дуг взяты из каталога «Вулканы мира» [Siebert, Simkin, 2002]; возрасты извержений калиброваны с использованием программы Calib 5.0 [Stuiver, Reimer, 1986–2005] <http://calib.qub.ac.uk/calib>

Камчатке было начальное извержение Молодого конуса вулкана Авачинский [Базанова и др., 2003]. Интересно, что и извержение с образованием кальдеры Аньякчак также вынесло тефру довольно основного (андезитового) состава, что не очень характерно для крупнейших извержений, которые чаще поставляют риолиты.

Следующий период сильной эксплозивной активности, приуроченный к началу нашей эры, отлично выражен в Каскадных горах, на Алеутах и на Камчатке (рис. 8). В Японии крупное извержение происходит чуть позже, около 1000 г. н. э.

Таким образом, 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). Подавляющее большинство таких извержений произошло в обрамлении Тихого океана и 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 знаменитое извержение вулкана Санторин в Средиземноморье ($>150 \text{ км}^3$). На рис. 9 отчетливо выделяются сгущения крупнейших извержений в периоды 8600–7200, 4200–3000 л. н. и в последний период, начавшийся примерно в начале новой эры и продолжающийся до сих пор. Такая частота извержений в нашей эре, конечно, в какой-то мере может объясняться возможностью более тщательных реконструкций более молодых извержений. Но, как уже было сказано ранее, несмотря на то что в нашей эре произошло как минимум 20 крупнейших эксплозивных извержений с объемом пирокластики $\geq 10 \text{ км}^3$ и три с объемом $\geq 100 \text{ км}^3$ (рис. 9), только три таких извержения были внятно описаны очевидцами, а остальные были восстановлены геологическими методами – так же, как и извержения более раннего времени.

Приведенные данные демонстрируют неравномерное проявление эксплозивного вулканизма во времени, причины которого до сих пор не ясны. Загадочные сгущения вулканических извержений во времени известны и из исторической летописи, например по границам Карибской плиты и на западе дуги Бисмарка [Siebert, Simkin, 2002]. Встает вопрос о причинах наблюдаемых пиков эксплозивного вулканизма. Логичным было бы ожидать проявления активного эксплозивного вулканизма в самом начале голоцена в ответ на перераспределение нагрузки в системе суши – океан в связи с таянием ледников. Но первый пик начался несколько позже, примерно 8500 л. н. Второй пик (1800–1300 л. н.), очевидно, не связан с таянием ледников.

Накапливаются все новые данные подводного бурения, также говорящие об эпизодическом характере вулканизма. Скважина 883, пробуренная на подводной горе Детройт в примерно в 600 км к юго-востоку от Камчатки, вскрыла осадки, отложившиеся за последние пять миллионов лет и включающие 103 макроскопически различных горизонта вулканического пепла мощностью от 0.5 до 18 см [Cao *et al.*, 1995]. Большая часть этих пеплов, по-видимому, связана с крупнейшими извержениями вулканов Камчатки и Курил. Любопытно, что пеплы в скважинах крайне неравномерно распределены по разрезу: сгущения пепловых горизонтов, возможно отвечающие пикам эксплозивной активности, отмечаются в интервалах 0.3–0.5, 0.8–0.9, 1.5–1.7 и 2.4–2.6 млн лет назад, что, учитывая различные методы оценки возраста, в целом совпадает с периодами активности, выделенными на суше [Bindeman *et al.*, 2010]. Первый эпизод эксплозивной вулканической активности, запечатленный в скважине, поразительно близок по времени к началу плейстоценового оледенения Северного полушария 2.95–2.82 млн лет назад. Аналогичные сгущения вулканических пеплов в подводных скважинах выявлены и для других вулканических дуг [Cambray, Cadet, 1996]. Наряду с пиками эксплозивной активности для отдельных островных дуг удалось выделить и три основных глобальных вулканических эпизода на отрезке времени от эоцена до четвертичного периода, которые имели место 0–5, 13–17 и 37–42 млн лет назад [Cambray, Cadet, 1996].

Обычно спусковым крючком (триггером) эксплозивных извержений служит внедрение базальтов в очаги кислых магм [Sparks and Sigurdsson, 1977]. На Камчатке это было показано для большинства крупных эксплозивных извержений (например, [Болынец, 1979; Melekestsev *et al.*, 1995; Volynets *et al.*, 1999; Eichelberger and Izbekov, 2000; Ponomareva *et al.*, 2004]). Таким образом, похоже, что наблюдаемые кластеры крупнейших эксплозивных извержений, проявлявшихся на огромной территории, могли быть вызваны крупномасштабными изменениями коровых напряжений, что привело к подъему более глубоких магматических расплавов по всем вулканическим зонам. Типичным объяснением такого явления обычно считается снятие ледниковой нагрузки [Wallman *et al.*, 1988], но оно вряд ли применимо к двум молодым голоценовым вулканическим пикам. Некоторые исследователи связывают эпизоды вулканической активности в отдельных 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.

Вопрос о влиянии перераспределения нагрузки в системе суша – море на эксплозивную активность пока не решен. Данные по глубоководным скважинам вокруг Камчатки и их интерпретации довольно противоречивы. Так, в скважине, которая вскрыла в Охотском море осадки возрастом до 350 тыс. лет [Nuernberg,

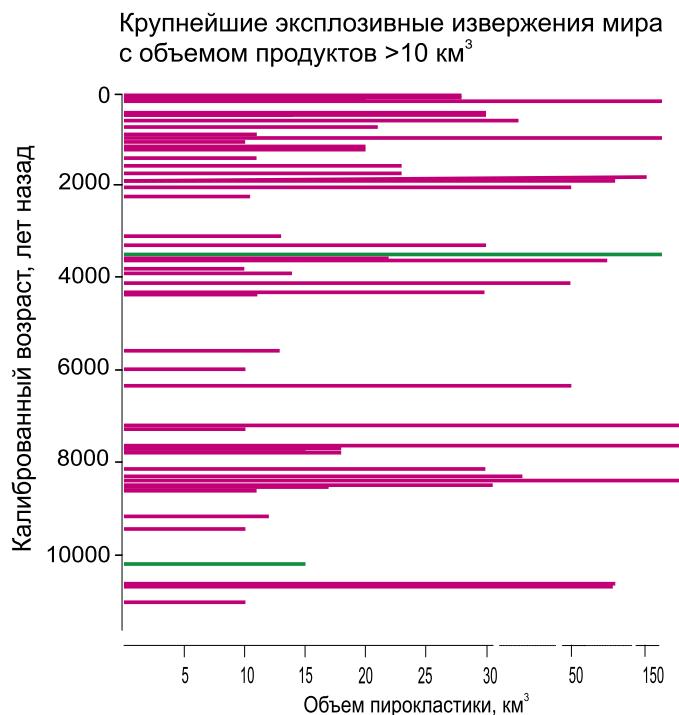


Рис. 9. Временное распределение крупнейших голоценовых эксплозивных извержений мира. Включены все известные эксплозивные извержения с объемом продуктов >10 км³. Извержения Камчатки нанесены в соответствии с работой Ponomareva *et al.*, 2007а. Извержения мира взяты из каталога «Вулканы мира» (Simkin, 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, условно говоря, Атлантики: Гrimsvotn в Исландии и Санторин в Средиземноморье. Остальные извержения произошли в обрамлении Тихого океана

Tiedemann, 2004], видно, что все имеющиеся в ней пеплы точно попадают в межледниковые периоды, хотя не каждый из межледниковых периодов содержит пеплы. Напротив, в уже упоминавшейся скважине 883, пробуренной в Тихом океане на г. Детройт, максимальное количество пепловых частиц в осадках обнаружено в том же интервале (~40 тыс. л. н.), что и максимальное количество терригенного материала, которое, как считается, отложено при таянии айсбергов, то есть свидетельствует о максимуме оледенения [Bigg *et al.*, 2008]. Эти одновременные вулканические и ледниковые пики дают возможность авторам также говорить о том, что вулканизм на суше активизируется в момент снятия с нее ледниковой нагрузки, только снятие нагрузки они связывают не с таянием ледников, а, напротив, с их максимальными размерами, когда ледники достигали побережья и продуцировали айсберги. Сравнение недавно полученных Ar-Ar возрастов для плиоцен-плейстоценовых игнимбритов Камчатки с глобальными изменениями климата позволило заметить, что из шестнадцати датированных извержений три четверти произошли во время оледенения при достижении ~75% от максимальной ледовой нагрузки [Bindeman *et al.*, 2010].

Камчатка, так же, как и другие области, связанные с зонами субдукции, являются ареной проявления не только вулканизма, но и других эндогенных процессов, выражавшихся в землетрясениях, деформациях земной поверхности и других опасных для человека событиях. Установлено, что в голоцене на Камчатке отдельные временные отрезки характеризовались не только сильными извержениями, но и землетрясениями различной природы. Такие эпизоды были охарактеризованы как эндогенные или геологические катастрофы [Мелекесцев и др., 2003]. Вблизи источников эти события могут произвести существенные изменения ландшафта, вызвав гигантские обвалы, значительные деформации земной поверхности и изменения речную сеть. На расстоянии крупные землетрясения и вулканические извержения также оставляют свой след, вызывая цунами и сильные пеплопады и загрязняя атмосферу. Основные активные периоды могут включать все эти близкие и дальние компоненты, которые объединяют свое воздействие и приводят к более значительным и разнообразным последствиям, чем ожидалось бы от вулканической или сейсмической опасности порознь. Мы полагаем, что дальнейший анализ пространственно-временных закономерностей распределения голоценовых камчатских извержений и сопоставление этой геологической летописи с летописью крупнейших коровых и субдукционных землетрясений позволит нам объяснить эпизодический характер эндогенных проявлений и подойти к их долгосрочному прогнозу.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», направление 2 «Новейший вулканизм: закономерности его активности и сопутствующие катастрофические процессы», а также при поддержке грантов РФФИ №09-05-00718, 09-05-00286 и 08-05-00092. Датирование плейстоценовых игнимбритов выполнено благодаря гранту NSF EAR0537872.

ЛИТЕРАТУРА

Андерсон П.М., Ложкин А.В., Белая Б.В. Молодой дриас в западной Берингии (северо-восточная Сибирь) // Изменения природной среды в Берингии в четвертичное время. Магадан : СВКНИИ, 1998. С. 28–44.

Базанова Л.И., Певзнер М.М. Хангар – еще один действующий вулкан на Камчатке // Докл. РАН. 2001. Т. 377, № 6. С. 800–802.

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Пузанков М.Ю., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические плинианские извержения начальной фазы формирования Молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 20–40.

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические извержения Авачинского вулкана (Камчатка)

в голоцене: хронология, динамика, геолого-геоморфологический и экологический эффекты, долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 3–8.

Бондаренко В.И. Сейсмоакустические исследования оз. Курильского // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 97–111.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. Вулкан Карымский: история формирования, динамика активности и долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. 1989а. № 2. С. 14–31.

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 // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 4. С. 516–518.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Новые данные о возрасте плейстоценовых отложений Центральной Камчатской депрессии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13. № 1. С. 106–115.

Волынец О.Н. Гетеротакситовые лавы и пемзы // Проблемы глубинного магматизма. М. : Наука, 1979. С. 181–196.

Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура) / Ред. Ю.П. Масуренков. М. : Наука, 1980. 300 с.

Гущенко И.И. Извержения вулканов мира (каталог). М. : Наука, 1979. 476 с.

Действующие вулканы Камчатки. М. : Наука, 1991. Т. 1. 302 с. Т. 2. 415 с.

Дирксен В.Г., Дирксен О.В. Реконструкция восстановления растительности после катастрофического извержения Курильского озера-Ильинская 7700 ^{14}C лет назад на Южной Камчатке. Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2004. № 3. С. 57–85.

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.

Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М. : Наука, 1980. 172 с.

Кирьянов В.Ю., Егорова И.А., Литасова С.Н. Вулканические пеплы на о-ве Беринга (Командорские острова) от голоценовых извержений Камчатки. Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 18–28.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.

Леонов В.Л., Биндеман И.Н., Рогозин А.Н. Новые данные по Аг-Аг датированию игнимбритов Камчатки // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 187–196.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлик Э.Н., Кожемяка Н.Н. Вулканические горы и равнины // Камчатка, Курильские и Командорские острова. М. : Наука, 1974. С. 162–234.

Мелекесцев И.В., Глушкова О.Ю., Кирьянов В.Ю., Ложкин А.В., Сулержицкий Л.Д. Происхождение и возраст Магаданских вулканических пеплов // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317, № 5. С. 1187–1192.

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.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Базанова Л.И., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д.* Особый тип катастрофических эксплозивных извержений – голоценовые субкальдерные извержения Хангар, Ходуткинский «маар», Бараний Амфитеатр (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 3–24.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д.* «Век» вулканических катастроф в раннем голоцене Курило-Камчатской области. Глобальные изменения природной среды. Новосибирск, 1998. С. 146–153
- Мелекесцев И.В., Гурбанов А.Г., Кирьянов В.Ю. и др.* Вулканические пеплы катастрофических эксплозивных извержений позднего плейстоцена-голоцена на территории Восточной и Южной Европы // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Вулканизм. М., 2002. Т. 1. С. 63–86.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д.* Эндогенные катастрофы в голоцене на Камчатке и Курильских островах // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 5. С. 662–665.
- 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.
- Флоренский И.В.* К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102–106.
- Флоренский И.В., Трифонов В.Г.* Неотектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С. 78–87.
- Allen J., Brandt U., Brauer A. et al.* Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period // Nature. 400, 19 August 1999. P. 740–743.
- Bacon C.R.* Eruptive history of Mount Mazama and Crater Lake caldera, Cascade range, U.S.A // J. Volcanol. Geotherm. Res., 18. 1983. 57–115.
- Bigg G.R., Clark C.D., Hughes A.L.C.* A last glacial ice sheet on the Pacific Russian coast and catastrophic change arising from coupled ice–volcanic interaction // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 265, Issues 3–4. P. 559–570.
- Bindeman I.T., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V. et al.* 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. 2010 Vol. 189, N 1, 2. 57–80.
- Braitseva O.A., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N., Melekestsev I.V. et al.* Radiocarbon dating and tephrochronology in Kamchatka, Radiocarbon. 1993. Vol. 35, N 3. P. 463–476.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D.* The ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // Bull. of Volcanology. 1995. Vol. 57, N 6. P. 383–402.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Yu.* The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240, the greatest explosive event of our era in Kamchatka // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1996. Vol. 70, N 1, 2. P. 49–66.
- Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V. et al.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Res. Vol. 47, N 2. P. 125–139.
- Bursik M.I., Melekestsev I.V., Braitseva O.A.* Most recent fall deposits of Ksudach volcano, Kamchatka, Russia // Geophysical Research Letters. 1993. Vol. 20/17. P. 1815–1818.
- Bursik M.I., Kobs S.E., Burns A., Braitseva O.A. et al.* Volcanic Plumes and Wind: Jetstream Interaction Examples and Implications for Air Traffic // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2009. Vol. 186 N 1, 2. P. 60–67.
- Cambray H. and Cadet J.P.* Synchronisme de l'activite volcanique d'arc: Mythe ou realite? // C. R. Acad. Sci. Paris, 1996. Vol. 322. P. 237–244.
- Cao L.Q., Arculus R.J. and McKelvey B.C.* Geochemistry and petrology of volcanic ashes recovered from Sites 881 through 884: A temporal record of Kamchatka and Kurile volcanism, in Proceedings of the Ocean Drilling Project, Scientific Results, 145, edited by D. K. Rea et al. College Station, Texas. Ocean Drilling Program P. 345–381.
- Cas R.A.F. and Wright J.V.* Volcanic Successions. Chapman and Hall, New York, NY.
- DeMets C.* Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 17615–17625.
- Eichelberger J.C. and Izbekov P.* Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky volcano, Kamchatka and Mount Katmai, Alaska, Royal Soc. London Phil. Trans., ser. A. 2000. Vol. 358. P. 1465–1485.
- Gorbarenko S.A., Nürnberg D., Derkachev A.N., Astakhov A.S. et al.* Magnetostratigraphy and tephrochronology of the upper Quaternary sediments in the Okhotsk sea: implication of terrigenous, volcanogenic and biogenic matter supply. Marine Geol. 2002. Vol. 183. P. 107–129.
- Haflidason H., Eiriksson J. and Kreveld S.V.* The tephrochronology of Iceland and the North Atlantic region during the Middle and Late Quaternary: a review // Journal of Quaternary Science. 2000. Vol. 15. P. 3–22.
- Horn S. and Schmincke H.U.* Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/Korea) ca.969 AD // Bull. Volcanol. 2000. N 61. P. 537–555.
- Hughes G.R., Mahood G.A.* Tectonic controls on the nature of large silicic calderas in volcanic arcs // Geology. 2008. Vol. 36. P. 627–630.
- LaMoreaux P.E.* Worldwide environmental impacts from the eruption of Thera // Environmental Geology. 1995. Vol. 26, N 3. P. 172–181.
- Machida H. and Arai F.* Atlas of tephra in and around Japan. Tokyo Univ. Press, 1992. 276 p.
- Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. and Volynets O.N.* Kizimen volcano (Kamchatka) – future Mt. St.Helens? // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1995. Vol. 65. P. 205–226.
- Miller T.P., McGimsey R.G., Richter D.H., Riehle J.R.* Catalog of the historically active volcanoes of Alaska: U.S. Geological Survey Open-File Report OF 98-0582. 1998. 104 p.
- Nürnberg D., Tiedemann R.* Environmental change in the Sea of Okhotsk during the last 1.1 million years // Paleoceanography. 2004. Vol. 19. 4011 p.

- Orsi G., Di Vito M.A. and Isaia R.* Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera // Bull Volcanol. 2004. Vol. 66. P. 514–530.
- Pearce N.J.G., Westgate J.A., Eastwood W.J. and Perkins W.T.* Identification of Aniakchak (Alaska) tephra in Greenland ice core challenges the 1645 BC date for Minoan eruption of Santorini, Geochemistry, Geophysics, Geosystems G3. 2004. 5(3). doi: 10.1029/2003GC000672.
- Pinto J.R., Turco R.P. and Toon O.B.* Self-Limiting Physical and Chemical Effects in Volcanic Eruption Clouds. // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94. P. 11165–11174.
- Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Dirksen O.V. and Zaretskaia N.E.* Holocene paleosols as records of intervals of volcanic quiescence in the Kurile Lake region, South Kamchatka, in «TEPHRAS, chronology, archaeology», Les dossiers de l'Archéologie, (1). CDERAD, edited by E. Juvigné and J. P. Rayna. 2001. P. 91–100.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., Rinkleff P.G. et al.* The 7600 (^{14}C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships. // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004. Vol. 136. P. 199–222.
- Ponomareva V.V., Churikova T.G., Melekestsev I.V., Braitseva O.A. et al.* Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific region. In: J. Eichelberger, P. Izbekov, N. Ruppert, J. Lees, E. Gordeev (Eds) «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region», American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 2007a. Vol. 172. P. 165–198.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D., Hartman M.* Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula. In: J. Eichelberger, P. Izbekov, N. Ruppert, J. Lees, E. Gordeev (Eds) Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region // American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 2007b. Vol. 172. P. 263–282.
- Pyle D.M., Ricketts G.D., Margari V., van Andel T.H. et al.* Wide dispersal and deposition of distal tephra during the Pleistocene ‘Campanian Ignimbrite/Y5’ eruption. // Italy Quaternary Science Reviews. 2006. Vol. 25 N 21, 22. P. 2713–2728.
- Rampino M.R., Self S., Stothers R.B.* Volcanic winters // Annual Review of Earth and Planetary Science. 1988. Vol. 16. P. 73–99.
- Rampino M.R., Self S.* Climate-volcanism feedback and the Toba eruption of ~74,000 years ago. Quaternary Res. 1993. Vol. 40. P. 269–280.
- Rose W.I., Chesner C.A.* Worldwide dispersal of ash and gases from earth’s largest known eruption: Toba, Sumatra, 75 ka // Palaeogeog, Palaeoclimat, Palaeoecol. 1990. Vol. 89. P. 269–275.
- Self S., Rampino M.R., Newton M.S. and Wolff J.A.* Volcanological study of the great Tambora eruption of 1815 // Geology. 1984. Vol. 12, N 11. P. 659–663.
- Siebert L., Simkin T.* Volcanoes of the World. 2002. URL: <http://www.volcano.si.edu/gvp/world/>
- Sigurdsson H., Carey S.* Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano // Bulletin of Volcanology. 1989. N 51. P. 243–270.
- Sparks S.R.J. and Sigurdsson H.* Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions // Nature. 1977. Vol. 267. P. 315–318.
- Sparks R.S.J., Walker G.P.L.* The significance of vitric-enriched air fall ashes associated with crystal enriched ignimbrites // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1977. Vol. 2. P. 329–341.
- Stothers R.B.* The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath // Science. Vol. 224, N 4654. P. 1191–1198.
- Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V. et al.* Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber. // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1999. Vol. 91. P. 23–42.
- Wallman P.C., Mahood G.A. and Pollard D.D.* Mechanical models for correlation of ring-fracture eruptions at Pantelleria, Strait of Sicily, with glacial sea-level drawdown // Bull. Volcanol. N 50. P. 327–339.
- Zaretskaya N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Dirksen O.V.* Radiocarbon dating of the Kurile Lake caldera eruption (South Kamchatka, Russia) // Geochronometria. 2001. Vol. 20. P. 95–102.
- Zaretskaya N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D.* Radiocarbon dating of large Holocene volcanic events within South Kamchatka (Russian Far East) // Radiocarbon. Vol. 49/2. P. 1065–1078.