

УДК 551.21

СЕЙСМИЧНОСТЬ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА КАК ОТРАЖЕНИЕ ЕГО СОВРЕМЕННОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

(хроника событий 1987 - 1996 гг. и особенности связанной с ними сейсмичности)

В.И. Горельчик, В.Т. Гарбузова

Опубликовано: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск -Камчатский, 2001 г., 428с.; УДК 551.21+552+550.34

В статье изложены результаты исследования сейсмичности Ключевского вулкана в зависимости от его состояния за период с марта 1987 г. по 1996 г. включительно. Используются данные нового, созданного авторами, машиночитаемого каталога землетрясений района Северной группы вулканов, содержащего сведения о землетрясениях с глубиной очага менее 40 км. Для локализации землетрясений применялся местный годограф сейсмических волн. Анализ данных имеющегося в настоящее время длинного временного ряда сейсмологических наблюдений (1978-1996 гг.) позволяет уточнить и дополнить сведения о магматической деятельности Ключевского вулкана в пределах земной коры. В земной коре под вулканом выделены четыре горизонта с различным уровнем и характером сейсмичности -4-5 км; 5-12 км; 12-20 км; 20-40 км. В первых трех горизонтах происходят, главным образом, вулcano-тектонические землетрясения, возникающие в твердой среде под действием непрерывно меняющегося поля напряжений, создаваемого вокруг магматических каналов, очагов, систем даек и силлов, внедряющихся в вулканическую постройку. В нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое (интервал глубин 20-40 км) выявлена зона с аномальными физическими свойствами, в которой генерируется множество глубоких длиннопериодных землетрясений. Предполагается, что природа этих землетрясений связана с процессами, происходящими в магме.

Введение

Предыдущими исследованиями [8,9,14,26,29] было показано, что сейсмичность Ключевского вулкана, связанная с его магматической деятельностью в последние десятилетия (1977 - 1987 гг.), сосредоточена в Центральной сейсмоактивной области. Эта область представляет собой зону трещиноватости, круто уходящую вниз от дневной поверхности до переходного от коры к мантии слоя до глубин не менее 20 - 30 км, отождествляемую с питающей магматической системой. Диаметр зоны в наиболее широкой части около 20 км, центр ее несколько смещен относительно кратера на северо-восток (рис.1, А,Б). Предполагалось, что все происходящие в этой зоне землетрясения возникают в упругой среде при изменении в ней поля напряжений [26].

Внутри зоны не было обнаружено значительных асейсмичных областей диаметром более 3 км, которые могли бы свидетельствовать о наличии крупных магматических тел в земной коре под вулканом. В ряде случаев отмечалась миграция очагов землетрясений с глубин ~ 25 км до дневной поверхности перед усилениями активности центрального кратера или побочными извержениями, что свидетельствует о существовании в земной коре под вулканом непрерывного магмоподводящего канала (или системы каналов).

В настоящей работе продолжено детальное изучение коровой сейсмичности питающей магматической системы Ключевского вулкана. В статье приводятся неопубликованные данные о сейсмической активности вулкана в зависимости от его состояния в период с 14 марта 1987 г. (после завершения побочного извержения 22.02.-13.03.1987 г.) до 1997 г. Анализируются результаты исследования данных длинного ряда сейсмологических наблюдений за период 1977 - 1996 гг. В отличие от предыдущих работ [19,20,29], нами использовались данные нового машиночитаемого каталога землетрясений района Северной группы вулканов, являющегося составной частью базы данных "Вулканические землетрясения Северной группы вулканов Камчатки" (база данных создавалась под руководством О.С.Чубаровой при участии В.Т.Гарбузовой, В.И.Горельчик и М.Я.Малкиной). Каталог содержит сведения о землетрясениях с глубиной очага менее 40 км, координаты которых можно было определить. Для локализации землетрясений применялся местный годограф сейсмических волн [11], рассчитанный для шестислойной скоростной модели земной коры, полученной по данным ГСЗ [1]. Рутинная обработка землетрясений (1993 - сент.1996 гг.) проводилась по модернизированной программе MINIMALM [22] на PC IBM. Для получения однородного фактического материала по этой программе было выполнено переопределение координат гипоцентров и энергетических характеристик землетрясений, обработка которых ранее производилась вручную (1977 - 1992 гг.). За период с конца сентября 1996 г. по 1 января 1997 г. использовались данные каталога землетрясений [района Северной группы вулканов](#), составленного при обработке цифровых сейсмограмм в лаборатории телеметрических станций Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (ОМСП) Геофизической службы РАН (заведующий лабораторией В.В.Яшук.). Самые общие (в том числе и предварительные) представления о сейсмичности Ключевского вулкана за 1997 - 2000 гг. также почерпнуты из каталога КОМСП. Приводимые в статье сведения об уровне вулканического дрожания получены из бюллетеней, составленных при обработке сейсмограмм радиотелеметрических сейсмических (РТС) станций PDK и ZLN.

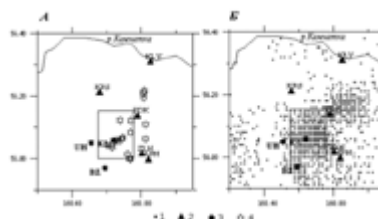


Рис.1

Район исследований (Центральная сейсмоактивная зона), в котором за последние десятилетия произошло большинство вулканических землетрясений, связанных с деятельностью Ключевского вулкана, мы ограничили координатами: $56,00^{\circ}$ - $56,155^{\circ}$ с.ш. и $160,55^{\circ}$ - $160,755^{\circ}$ в.д. (прямоугольник на [рис.1](#)). Все последующие рисунки и оценки параметров сейсмичности выполнены для землетрясений, заключенных внутри Центральной сейсмоактивной зоны в обозначенных выше границах в интервале глубин от 4 км выше уровня моря (-4 км) до 40 км. В пределах этой зоны расположено около 75% всех известных с 1932 г. современных центров побочных извержений ([рис.1, А](#)). За период 1977 - 1996 гг. в земной коре под Ключевским вулканом в пределах показанного на [рис.1](#) прямоугольника были определены координаты более 3700 землетрясений. Из них около 72% событий, зарегистрированных четырьмя и более сейсмическими станциями, локализованы с ошибкой, не превышающей 5 км по эпицентру и глубине, при этом координаты примерно 45% землетрясений из числа последних (или 33% от общего числа) определены с ошибкой 3 и менее км.

Использованные для сопоставления с сейсмичностью сведения о деятельности вулкана за 1987 - 1996 гг. получены из соответствующих публикаций (см. ссылки в тексте), а также из отчетов группы KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), объединяющих сообщения сотрудников КОМСП, Камчатской вулканологической обсерватории ИВГиГ и Камчатской вулканологической станции ИВ РАН.

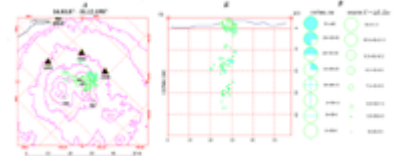
Состояние и сейсмичность Ключевского вулкана в 1987-1996 гг.

1987 г. 14.03. - 27.07.1987 г. Заметная эксплозивная деятельность центрального кратера Ключевского вулкана прекратилась одновременно с окончанием извержения побочного прорыва Предвиденный 13 марта 1987 г. Состояние "затишья" продолжалось до конца июля [19]. В этот период на вершине внутрикратерного шлакового конуса образовался колодецеобразный провал диаметром около 260 м [16].

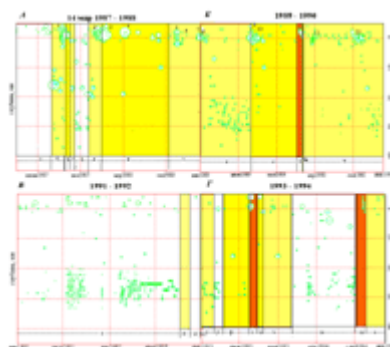
В течение всего этого времени вокруг вершинного кратера Ключевского вулкана происходили единичные неглубокие (с глубиной очага не более 3 - 5 км) слабые ($K_s \leq 7,0$) вулкано-тектонические (ВТ) землетрясения и тоже единичные еще более слабые ($K_s \leq 5,0$) сейсмические события, координаты которых определить было невозможно, но которые по виду записи, на основании опыта работ, были отнесены нами к средним (10 - 20 км) и нижним (20 - 40 км) горизонтам земной коры. В это же время на ближайших сейсмостанциях (на удалении 12 - 14 км от вершинного кратера) отмечались очень слабое ($A^{\max} < 0,2$ мкм) непрерывное низкочастотное вулканическое дрожание (в.д.) и другие поверхностные длиннопериодные (ПДП) сигналы [19], связанные с процессами в магме. По-видимому, уровень стояния магмы в питающем канале вулкана оставался достаточно высоким, несмотря на образование провала в шлаковом конусе внутри кратера².

28.07. - 11.10.1987 г. происходило вершинное [эксплозивно-эффузивное извержение](#) Ключевского вулкана, носившее в основном стромболианский характер [19]. До 10 августа над кратером наблюдалось только пульсирующее зарево и слабая парогозовая деятельность. Затем из кратера стали выбрасываться бомбы, увеличилась высота парогозовых выбросов, в начале сентября эксплозивная активность усилилась. После излияния лавы 11 - 12 сентября извержение стало ослабевать, и 11 октября оно прекратилось.

Вершинное извержение этого периода сопровождалось сейсмической активизацией на всех интервалах глубин в земной коре под Ключевским вулканом. Карта эпицентров и распределение очагов землетрясений в вертикальных плоскостях, проходящих через вершинный кратер в направлениях СВ-ЮЗ и СЗ-ЮВ за 1987 г., представлены на [рис.2, А-Г](#). Подобные рисунки типичны для всех последующих лет. Для остальных периодов мы будем приводить лишь распределение очагов землетрясений в земной коре под Ключевским вулканом по глубине и во времени ([рис.3, А-Д](#)). Как видно на [рис.2, А](#), землетрясения с глубиной очага менее 5 км располагались вокруг центрального кратера, образуя область протяженностью порядка 12 - 14 км, вытянутую в направлении ССЗ - ЮЮВ. В начальную фазу извержения в этой области происходили слабые единичные неглубокие землетрясения. За неделю до усиления эксплозивной деятельности вершинного кратера, с **24.08. до 1.09.1987 г.**, в постройке Ключевского вулкана и непосредственно под ней возник рой (1)3([рис.3, А](#)) ВТ землетрясений ($K_s^{\max} = 8,2$), после которого лава начала изливаться через край кратера в северо-восточный желоб.



[Рис. 2](#)



[Рис. 3](#)

Более глубокие землетрясения происходили в течение всего вершинного извержения в виде единичных событий ($H = 5 - 20$ км) и небольших групп ($H = 20 - 40$ км), которые располагались под юго-восточной частью эпицентральной области неглубоких землетрясений (см. [рис.2, А](#)). Землетрясения в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое (глубины 20 - 40 км) характеризовались низким предельным энергетическим классом (6,5), одинаковой формой записи и более длинными видимыми периодами колебаний (0,6 - 0,8 с) при максимальной амплитуде. Будем называть в дальнейшем такие землетрясения глубокими длиннопериодными (ГДП) землетрясениями. Увеличение сейсмической активности на глубинах 5 - 20 км отмечалось в начале извержения (самое сильное с 1978 г. землетрясение зарегистрировано 28.07.1987 г., $K_s=9,3$, $H=16$ км), а также после его окончания 11 октября, когда, как и в предыдущие годы в подобных случаях [26], сейсмичность под

Ключевским вулканом стала перемещаться с глубин 3 - 5 км к подошве земной коры, на глубины 20 - 30 и более км (см. интервалы времени "б" и "д" на [рис.3, А](#)).

12.10. - 31.12.1987 г. С 12 октября до конца ноября в деятельности вершинного кратера Ключевского вулкана наблюдалось "затишье", во время которого сейсмическая активность под вулканом проявлялась преимущественно в самых нижних горизонтах коры (25 - 40 км, см. [рис.3, А](#), период "д"). Однако уже в последней декаде ноября в Центральной зоне наметилась тенденция к уменьшению глубины очагов землетрясений (см. вторую половину интервала "д" на [рис.3, А](#)). С 1 декабря над вершинным кратером появились пепловые выбросы, затем бомбы, 13 - 26 декабря на склоны вулкана излились короткие лавовые потоки [19]. С возобновлением эксплозивно-эффузивного извержения центрального кратера подъем сейсмической активности в средние и верхние горизонты земной коры продолжался ("е", [рис.3, А](#)). С конца декабря 1987 г. на вулкане преобладала поверхностная сейсмичность (ВТ землетрясения в постройке, ПДП сигналы: взрывные землетрясения, в.д. и др.).

В целом, в марте-декабре 1987 г. эпицентральная область неглубоких (до 5 км) землетрясений располагалась вокруг вершинного кратера и центров будущих побочных извержений, более глубокие события локализовались под восточным-юго-восточным склоном приблизительно в 5 км от кратера (см. [рис.2, А](#)).

1988 - 1990 гг. Эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера, возобновившееся в декабре 1987 г., положило начало продолжительной и многообразной деятельности Ключевского вулкана в 1988 - 1990 гг. Особенности этой деятельности явились сочетание почти непрерывных эксплозивно-эффузивных извержений и продолжительных побочных прорывов на склонах вулкана, а также интенсивное растрескивание вулканической постройки в восточном-юго-восточном секторе на абсолютных отметках от 2000 м выше уровня моря до вершины вулкана с образованием на трещинах локализованных эруптивных центров [20]. Пестрая картина вулканической активности сопровождалась разнообразными сейсмическими сигналами, общая характеристика которых дана в работе [20]. В настоящей статье основное внимание уделено детальному описанию особенностей пространственно-временного развития сейсмичности в Центральной зоне в этот период.

1988 г. Вершинный кратер Ключевского вулкана не прекращал эксплозивную деятельность практически в течение всего года. Почти постоянно, с перерывами от 2-3 до 10-20 дней, происходило излияние лавы [20]. Наиболее интенсивная эффузивная деятельность вершинного кратера наблюдалась в октябре 1988г., когда лава стекала по трем желобам одновременно. Усиление эксплозивных явлений отмечалось в январе-феврале на фоне слабой, а в апреле-мае и сентябре-октябре на фоне усилившейся эффузивной деятельности. С 28 января по 14 сентября 1988 г., на фоне эксплозивно-эффузивного вершинного извержения, на юго-восточном склоне вулкана в диапазоне абсолютных отметок 4000-4300 м происходило *побочное извержение имени XXV-летия ИВ* (Института вулканологии) [20], период "ж" на [рис.3, А](#).

Несмотря на продолжительные побочное и вершинное извержения, с ноября 1988 г. *процессы трещинообразования* на склонах вулкана возобновились. *Образование системы радиальных трещин* на северо-восточном склоне в интервале высот 2200-4000 м наблюдалось 20 ноября, 14, 17, и 22 декабря. Из трещин в течение непродолжительного времени выжималась лава, вытекали грязевые потоки [20].

Кроме почти постоянно регистрировавшихся ПДП сигналов (непрерывное в.д., взрывные землетрясения [20]), сейсмическая активность в Центральной зоне под Ключевским вулканом в течение 1988 г. была сосредоточена, главным образом, в самых верхних горизонтах земной коры и вулканической постройке (выше 3 - 5 км), где происходило большое количество ВТ землетрясений, образывавших группы и рои (периоды "ж" и "з" на [рис.3, А](#)). Продолжительность роев землетрясений колебалась от нескольких суток до 4-5 недель, число событий с $K_s > 5$ в роях - от 2-3 десятков до нескольких сотен (включая землетрясения, зарегистрированные одной станцией).

Наиболее сильным в энергетическом отношении роем был *рой 19.01. - 2.02.1988 г.*, до 28.01 предварявший, а затем сопровождавший *побочный прорыв им. XXV-летия ИВ*, порядковый номер роя (3) на [рис.3, А](#). Большинство землетрясений роя происходило в постройке вулкана, ($K_s^{\max} = 9,0$, $H = -1$ км, 21.01.1988 г.). Эпицентральная область вначале охватывала район вершинного кратера, а затем распространилась на юго-юго-западный склон и место будущего прорыва.

В 2-3 раза слабее роя, предварявшего побочное извержение им. XXV-летия ИВ, были *рои*, предварявшие и/или сопровождавшие *усиление эксплозивно-эффузивной деятельности вершинного кратера*: 27.12. 1987 г. - 7.01.1988 г. (2); 6. - 8.04.1988 г. (4); 7. - 13.10.1988 г. (5), см. [рис.3, А](#). Максимальный энергетический класс K_s землетрясений в этих роях составлял 8,2 - 8,9, эпицентральные области располагались вокруг кратера Ключевского вулкана и на его северном склоне.

Энергия каждого из роев ВТ землетрясений 25.10 - 31.10.1988 г. (6) ; 25.12 - 30.12.1988 г. (7) (см. [рис.3, А](#)), связанных с растрескиванием склонов Ключевского вулкана, была приблизительно на порядок слабее энергии перечисленных выше, максимальный энергетический класс K_s^{\max} не превышал 7,5. В этих роях происходило множество слабых событий, координаты большинства которых определить существующей сетью наблюдений было невозможно. Пространственно эпицентральные области роев практически совпадали с зонами растрескивания. Время возникновения землетрясений и периоды появления трещин на склонах вулкана совпадали с разбросом несколько дней или недель (необходимо учитывать сложность проведения визуальных наблюдений).

В средних и нижних горизонтах земной коры под Ключевским вулканом в 1988 г. произошло всего несколько землетрясений (см. [рис.3, А](#)).

1989 г. Высокий уровень эксплозивно-эффузивной активности вершинного кратера Ключевского вулкана сохранялся до конца июля 1989 г. [20]. Периоды усиления стромболианской деятельности вершинного кратера наблюдались в марте - апреле и июле - августе. Продолжалось *растрескивание вулканической постройки с образованием эруптивных центров на возникающих трещинах*. Излияние лавы из трещины на восточном склоне на высоте 3500 м, начавшееся в конце декабря 1988 г., наблюдалось до середины января 1989 г. Субтерминальные эруптивные центры действовали 6 - 22 февраля на юго-юго-восточном склоне и 23 февраля - 15 марта - из бокки в северо-западном основании внутрикратерного шлакового конуса. Сразу после прекращения привершинных извержений возросла эксплозивно-эффузивная активность центрального кратера. На фоне этой усилившейся **стромболианской деятельности с 26 июля до конца августа 1989 г. происходило развитие нового побочного прорыва имени Скуридина**. В течение месяца вдоль магистральной трещины восточного простирания от абсолютных отметок 4400-4300 м до высоты 4000 м происходило образование и перемещение сверху вниз цепочки небольших конусов, последний из которых действовал до конца извержения. Побочное извержение продолжалось 200 дней, до 10 февраля 1990 г.

После того, как последний эруптивный центр побочного извержения сформировался, с сентября по декабрь 1989 г. включительно, эксплозивная деятельность вершинного кратера Ключевского вулкана снизилась, а эффузивная прекратилась совсем.

Извержения Ключевского вулкана в 1989 г. сопровождалось многочисленными ПДП сигналами, число и интенсивность которых возрастали во время усиления эксплозивной активности, и непрерывным в.д., средний уровень которого по сравнению с 1988 г. увеличился в 2 раза [20]. Особенно резкие колебания в изменении амплитуды в.д. (от 1 до 3 - 5 и более мкм) отмечались в периоды смены режимов эффузивной деятельности вершинного кратера или побочных центров.

Кроме поверхностной низкочастотной сейсмической активности, в 1989 г. практически на всех горизонтах земной коры под Ключевским вулканом происходили землетрясения с $K_s \geq 5,5$, координаты большинства из которых были определены по данным сети станций (см. [рис.3, Б](#)). Наибольшее число землетрясений регистрировалось в вулканической постройке и непосредственно под ней ($H = -4 - 5$ км), а также в низах коры (интервал глубин 20 - 40 км).

Рой неглубоких ВТ землетрясений 1.01. - 16.01.1989 г., (рой (8) на [рис.3, Б](#)), предвещал и сопровождал образование системы трещин на восточном склоне вулкана и был подобен аналогичным роям 1988 г. ($K_s^{\max} = 6,7$). Эпицентральная зона землетрясений роя охватывала центральный кратер и восточный склон вулкана. Распространение очагов отмечалось с запада (от кратера) на восток, по-видимому, в направлении развития трещин, из которых 13 - 15 января происходило излияние лавы.

Эксплозивно-эффузивная деятельность субтерминальных эруптивных центров, действовавших 6 - 22.02 и 23.02 - 15.03.1989 г., предвещалась и сопровождалась слабыми ($K_s < 5$) неглубокими ВТ землетрясениями в постройке вулкана и вулканогенно-осадочной толще, большинство этих землетрясений регистрировалось одной-двумя сейсмостанциями. Относительно более сильные ($K_s = 5 - 7$) сейсмические события 23.01. - 2.02, координаты которых удалось определить, происходили несколько восточнее вершинного кратера, в окрестности субтерминального эруптивного центра, начавшего извергаться 6 февраля. Приблизительно с середины января 1989 г., во время прекращения излияния лавы из трещины на восточном склоне вулкана, появились первые ГДП в нижних, а со второй половины февраля и ВТ землетрясения в средних горизонтах земной коры под Ключевским вулканом (начало периода "и" на [рис.3, Б](#)), что практически совпало по времени с началом излияния лавы из бокки в северо-западном основании внутрикратерного шлакового конуса (впервые излияние лавы было замечено 23 февраля, [20]) и предшествовало усилению эксплозивно-эффузивной активности вершинного кратера. Группы, или растянутые во времени рои слабых ($K_s = 5 - 6$) ГДП землетрясений с глубиной очага 20 - 40 км, происходившие под Ключевским вулканом до середины июля, и единичные ВТ землетрясения в интервале глубин 5 - 20 км, регистрировавшиеся в апреле и мае, образовали эпицентральную область, общей протяженностью 10 - 12 км, вытянутую по обе стороны от центрального кратера в направлении с северо-запада на юго-восток.

После 15 - 16 июля уровень сейсмичности в низах коры под Ключевским вулканом упал, несмотря на неизменяющуюся интенсивность в.д., взрывных землетрясений и прочих ПДП сейсмических сигналов [20]. С 22 по 30 июля в вулканической постройке и вулканогенно-осадочном слое был зарегистрирован *рой ВТ землетрясений*, предвещавший начало, а с 26 июля сопровождавший развитие побочного прорыва имени Скуридина (рой (9) на [рис.3, Б](#)). В целом этот рой был подобен рою, предвещавшему побочное извержение 1988 г. Эпицентры землетрясений роя располагались вокруг вершинного кратера и на северном, северо-западном (здесь произошли самые сильные землетрясения, $K_s^{\max} = 8,7$), восточном и юго-восточном склонах. 02 - 16.08, на тех же глубинах, был зафиксирован следующий *рой* ((10), см. [рис.3, Б](#)), более слабый, чем предыдущий ($K_s^{\max} = 7,4$), сопровождавший дальнейшее развитие побочного извержения - формирование вдоль трещины на восточном склоне вулкана цепочки новых эруптивных центров [20]. Во время возникновения неглубоких землетрясений роя (10) вновь появились единичные землетрясения в средних и нижних горизонтах земной коры ($K_s^{\max} = 6,0$), эпицентры которых располагались на северо-северо-западном, юго-юго-восточном склонах вулкана и вблизи центрального кратера. С конца августа до начала декабря 1989 г. на Ключевском вулкане резко усилилось в.д. (до 5 и более мкм) и в два-три раза возросли число и интенсивность ПДП сигналов,

связанных с взрывной деятельностью вершинного кратера и с explosивно-эффузивной активностью побочного прорыва. В декабре 1989 г. поверхностная низкочастотная сейсмическая активность на вулкане снизилась, ВТ и ГДП землетрясений на уровне энергетического класса 5,5 и выше зарегистрировано не было.

1990 г. В начале января 1990 г., как и в конце декабря 1989 г., вершинный кратер Ключевского вулкана был слабо активен. На побочном прорыве продолжалось излияние лавы с редкими выбросами раскаленных бомб над истоком. С 8 января высота парогазовых выбросов из вершинного кратера стала увеличиваться с одновременным увеличением расхода лавы на побочном прорыве [4]. 23.01. - 6.02.1990 г. произошло сильное explosивное извержение вершинного кратера (период "л" на [рис.3, Б](#)). Извержение характеризовалось выбросом раскаленных бомб и пепла на высоту до 1,5 и 6 км соответственно и образованием нового колодецеобразного кратера на месте внутрикратерных шлаковых конусов, возникших ранее в ходе предшествующих относительно слабых извержений. Диаметр нового кратера оценивался ~ 500 м, глубина превышала 300 м [4]. По опубликованным В.Н. Двигало данным аэрофотосъемки от 4 апреля 1993 г., глубина провала, сформировавшегося в вершинном кратере после извержений 1988 - 1990 гг., составляла 186 м [17].

Деятельность побочного прорыва во время вершинного извержения 1990 г. заметно активизировалась (увеличение расхода лавы, выбросы бомб, фонтанирование лавы), а после прекращения вершинного извержения снизилась. 9 февраля побочное извержение им. Скуридина закончилось. После окончания вершинного извержения 6 февраля до конца 1990 г. центральный кратер Ключевского вулкана находился в состоянии относительно слабого, растянутого во времени explosивного извержения вулканского типа [4].

Несмотря на ослабление внешней активности, в начале января 1990 г. на вулкане Ключевской продолжали регистрироваться длиннопериодное в.д. и другие ПДП сигналы, связанные с физико-химическими процессами в магме. По сравнению с декабрем 1989 г. суммарная продолжительность в.д. в начале 1990 г. была меньше, но амплитуда колебаний изменялась более резко, от 0,2 до 4 - 5 мкм (спазматическое в.д.), а ПДП сигналы были многочисленны (до 100 и более событий в сутки) и зачастую сливались с в.д.. К началу интенсивной стромболианской деятельности вершинного кратера 23 января 1990 г. средний уровень в.д. увеличился практически вдвое, максимальная амплитуда колебаний достигла почти 8 мкм. Пароксимальная стадия извержения характеризовалась очень сильным спазматическим в.д. (средняя амплитуда до 7 мкм, A^{\max} до 22,5 мкм, включая взрывные землетрясения), которое продолжалось с 28 января по 1 февраля. После 2 - 3 февраля амплитуда в.д. постепенно убывала. С 3 марта величина A^{\max} была менее 1 мкм и, за редкими исключениями, оставалась таковой до конца года.

В январе - феврале 1990 г. в Центральной зоне под Ключевским вулканом из-за сильного в.д. были определены координаты всего 8 ВТ землетрясений 6 - 7 энергетических классов с глубиной очага не более 1-2 км ниже уровня моря (см. периоды "л" и "м" на [рис.3, Б](#)).

После окончания вершинного извержения, с марта по декабрь 1990 г., на Ключевском вулкане регистрировались неглубокие (Н менее 5 км) слабые ВТ землетрясения, которые происходили почти ежедневно в виде одиночных событий, небольших групп (до 8 - 10 событий) и роев, и сопровождали вяло текущее слабое explosивное вершинное извержение (период "н", [рис.3, Б](#)). Наиболее значительные рои были отмечены 13.03 - 3.04.1990 г. (рой (11), в котором, по данным одной станции, зарегистрировано более 500 землетрясений сильнее 5 энергетического класса, $K_s^{\max} = 7,0$) и 19.09 - 4.10.1990 г. (рой (12), около 100 событий, $K_s^{\max} = 6,5$). Эпицентральная область, образованная ВТ землетрясениями вокруг центрального кратера в 1990 г., по-прежнему была вытянута на 10 - 15 км с северо-запада на юго-восток.

Сразу после окончания роя ВТ землетрясений 13.03 - 3.04.1990 г. (рой (11) на [рис.3, Б](#)) под северо-восточным склоном Ключевского вулкана на глубине около 10 км было зафиксировано землетрясение с $K_s = 6,3$, а в конце апреля - начале мая наметилось слабое оживление сейсмической деятельности в нижних горизонтах земной коры и в переходном от коры к мантии слое. За сутки до окончания роя ВТ землетрясений 19.09 - 4.10.1990 г. (рой (12)) началось постепенное перемещение сейсмической активности с приповерхностных глубин в средние и нижние горизонты земной коры под Центральной зоной (окончание периода "н", [рис.3, Б](#)). Очень слабые ($K_s^{\max} = 5,8$) похожие друг на друга по форме записи ГДП землетрясения регистрировались под Ключевским вулканом в течение ноября - декабря 1990 г.

1991 - 1992 гг. В период с 1991 г. по сентябрь 1992 г. состояние вершинного кратера Ключевского вулкана характеризовалось редкими пепловыми выбросами и фумарольной деятельностью. Усиление explosивной стромболианской активности отмечалось в течение 12 - 29.10.1992 г. (период "п", [рис.3, В](#)): пульсирующая подсветка в кратере, парогазовые, с небольшим количеством пепла выбросы, редкие раскаленные бомбы над кромкой кратера [4]. Судя по не снижающемуся и даже возросшему уровню в.д., Ключевской вулкан оставался активен, по-видимому, до конца первой декады декабря 1992 г. Последовавшая затем пауза в извержении продолжалась до конца декабря. С 30.12.1992 г. слабое стромболианское извержение вершинного кратера возобновилось.

Слабая эруптивная деятельность вершинного кратера Ключевского вулкана в 1991 - 1992 гг. сопровождалась неглубокими ВТ землетрясениями ($K_s^{\max} = 6,8$), редкими взрывными землетрясениями и периодически возникавшим низкочастотным в.д. Максимальная амплитуда в.д. во время небольшого усиления стромболианской деятельности вершинного кратера в период 10 - 29. 10.1992 г. не превышала 1,5 - 1,9 мкм, с ноября по первую декаду декабря 1992 г. достигала 2,5 - 2,9 мкм, а в остальное время составляла менее 0,7 - 0,8 мкм. Очаги ВТ землетрясений, зарегистрированных в 1991 - 1992 гг. в Центральной сейсмоактивной зоне на глубинах менее 5 км, располагались в полосе, протянувшейся от

вершинного кратера и прилегающего к нему юго-восточного склона на север, северо-запад и запад вплоть до вулкана Ушковский (общая длина порядка 20 км).

Во второй половине января 1991 г. под Ключевским вулканом, наряду с неглубокими ВТ землетрясениями, возобновилась сейсмическая активность на глубинах 20 - 35 км, в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое. Слабые ГДП землетрясения ($K_s = 5 - 5,5$) регистрировались под центральным кратером и к северо-западу, востоку и юго-востоку от него с 19 января до конца мая 1991 г. После полуторамесячного перерыва, с 15 июля 1991 г. началось новое усиление сейсмичности на глубинах 20 - 35 км ($K_s = 4,9 - 5,7$), продолжавшееся до начала октября 1991 г. Землетрясения происходили почти ежедневно, образуя рои продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель и насчитывавшие от 20 до 100 и более событий. В период с октября 1991 г. до середины февраля 1992 г. сейсмичность на глубинах более 20 км под Ключевским вулканом практически отсутствовала. И только в первой декаде декабря 1991 г. в интервале глубин 20 - 40 км была зафиксирована небольшая группа слабых ГДП землетрясений. После 10 - 15 февраля 1992 г. сейсмическая активность в нижних горизонтах коры и переходном от коры к мантии слое снова усилилась. Землетрясения происходили до начала октября 1992 г. (см. вторую половину периода "о" на [рис.3, В](#)), причем число событий с $K_s \geq 5,5$ в этом интервале глубин в 1992 г. в несколько раз превысило количество аналогичных землетрясений в 1991 г. Эпицентральная область ГДП землетрясений в 1991 - 1992 гг. представляла собой почти изометричную территорию с радиусом порядка 12 - 15 км.

В конце сентября 1992 г, вскоре после окончания периода усиления ГДП сейсмичности в низах коры, было замечено учащение вылета светящихся бомб и пепловых выбросов из центрального кратера [4]. На сейсмограммах ближайших сейсмических станций стали регистрироваться вначале отдельные цуги в.д. с $A^{\max} = 0,3 - 0,4$ мкм. (в конце сентября), а затем непрерывное низкочастотное в.д. с A^{\max} до 1,5 - 1,9 мкм (в октябре) и до 2,5 - 2,8 мкм (в середине ноября - начале декабря), сопровождавшее слабое стромболианское вершинное извержение (период "п", [рис.3, В](#)). С 8 до 30 декабря 1992, во время паузы в вершинном извержении, в.д. прекратилось.

1993 г. Извержение вершинного кратера Ключевского вулкана, возобновившееся 30 декабря 1992 г., продолжалось до начала февраля 1993 г. и сопровождалось умеренным в.д. (A^{\max} до 1, иногда до 2 мкм) и слабыми неглубокими ВТ и ГДП землетрясениями (период "т", [рис.3, Г](#)). До середины марта на вулкане отмечалась лишь фумарольная деятельность. 10 марта на ближайших к вулкану РТС вновь стало регистрироваться в.д., а фумарольная деятельность вершинного кратера резко усилилась. С 15 марта до начала сентября 1993 г. происходило новое сильное эксплозивно-эффузивное извержение, в результате которого был полностью заполнен провал, образовавшийся в вершинном кратере в 1990 г. Объем извергнутой магмы составил около 30 млн. т [27]. В ходе извержения было выделено три этапа (А.Ю.Озеров, устное сообщение, 1998): эксплозивный (15.03 - 18.07, период "ф" на [рис.3, Г](#)), кульминационный эффузивно-эксплозивный (19.07 - середина августа, период "х"), во время которого высота фонтанирования лавы и выброса бомб достигала 1000 м над кромкой кратера, пепловые облака поднимались на высоту до 5 - 6 км, и эксплозивный (середина августа - начало сентября, период "ц"). В деятельности вулкана наблюдалась четко выраженная периодичность: каждые 5 - 6 часов интервалы усиления извержения сменялись интервалами ослабления. К 3 - 4 августа в кратере на месте двухсотметрового провала сформировался шлаковый конус высотой 86 м (А.Ю.Озеров, устное сообщение, 1998). 8 - 9 августа интенсивность излияния лавы снизилась, а к 20 августа эффузивная деятельность полностью прекратилась. С начала сентября до конца 1993 г. вулкан находился в состоянии слабой и умеренной эксплозивной деятельности (период "ч").

По мере развития вершинного извержения, которое до конца июня 1993 г. носило умеренный вулканский характер, регистрировавшееся на Ключевском вулкане непрерывное в.д. постепенно возрастало. С 10 мая максимальная амплитуда в.д. в большинстве случаев превышала 1 мкм, а с 23-25 июня, когда извержение приобрело стромболианский характер, амплитуда в.д. стала быстро расти. К 5 - 9 июля она достигала 8 - 10 мкм, а к 19 июля - 22 мкм. Многие сейсмограммы при этом были настолько "забиты", что никакие измерения были невозможны. Именно в это время происходило быстрое заполнение кратера продуктами извержения. Во время кульминационной стадии извержения, 19-31.07, максимальная амплитуда в.д. превышала 30 мкм. В августе в.д. стало ослабевать, после 13 сентября до конца года амплитуда в.д. составляла 0,5 - 0,2 мкм ("ч", [рис.3, Г](#)). Отмечавшееся в июле-августе 1993 г. чередование периодов усиления и ослабления в.д. отражало аналогичную периодичность в ходе эксплозивно-эффузивного извержения.

В течение 1993 г. землетрясения под Ключевским вулканом регистрировались на трех интервалах глубин: -4 - 5 км, 11 - 20 км и 20 - 40 км. Слабые (меньше 6 энергетического класса) ГДП землетрясения преобладали с января до начала марта 1993 г. (см. периоды "т" и "у", [рис.3, Г](#)). 2 марта, за неделю до возобновления в.д., под северным склоном вулкана, приблизительно в 5 км от вершинного кратера, на глубине около 18 км, произошло землетрясение с $K_s = 5,5$, а 5 мая, когда извержение продолжало набирать силу, приближаясь к кульминационной фазе, было зафиксировано более сильное ($K_s = 6,8$) событие на глубине 15 - 16 км в 2 - 3 км к северу от центрального кратера (см. период "ф", [рис.3, Г](#)). В начале-середине июня на фоне умеренного в.д. прошла еще одна группа ГДП землетрясений. В конце июня - в июле 1993 г. из-за перегруженности сейсмограмм в.д. и другими ПДП сигналами, сопровождавшими кульминационную фазу вершинного извержения, многие землетрясения (и ВТ и ГДП), если они происходили под вулканом, не могли быть выделены и тем более локализованы. В ноябре - декабре сейсмичность в районе Ключевского вулкана практически отсутствовала (исключение составляют два слабых землетрясения в постройке). В целом эпицентральные области ВТ и ГДП землетрясений под Ключевским вулканом, координаты которых удалось определить, в 1993 г. охватывали приблизительно те же территории, что и в 1992 г.

1994 г. С января до начала сентября 1994 г. Ключевской вулкан внешне был относительно спокоен. С 7.09 по 2.10.1994 г. произошло сильное вершинное эффузивно-эксплозивное извержение, имевшее в основном стромболианский, а на заключительном этапе субплинианский характер (период "щ" на [рис.3, Г](#)). Извержение 1994 г. относится к числу наиболее мощных исторических проявлений активности Ключевского вулкана [21]. В октябре-декабре 1994 г. слабая эксплозивная деятельность вулкана носила прерывистый характер (период "ъ", [рис.3, Г](#)).

Начало извержения центрального кратера Ключевского вулкана в 1994 г. сопровождалось быстрым ростом в.д. Уже 5 - сентября максимальная амплитуда в.д. на порядок превысила фоновые значения, а с 9 сентября сейсмограммы были буквально "забиты" непрерывным в.д., максимальная амплитуда которого 29 - 30 сентября, накануне пароксизмальной стадии извержения, составила 16 - 20 более мкм. К полудню 1 октября уровень в.д. упал до 4 мкм так же резко, как произошло ослабление извержения. После 4 октября и до конца года максимальная амплитуда в.д. не превышала 0,2 мкм, при этом периоды генерации слабого в.д. чередовались с периодами его полного исчезновения.

За исключением периода с 9.09 по 1.10.1993 г., когда выделение землетрясений из-за сильного в.д. было невозможным, сейсмичность в земной коре под Ключевским вулканом в 1994 г. проявлялась практически на всех интервалах глубин, при этом максимальное число землетрясений происходило в низах коры и переходном от коры к мантии слое. Увеличение частоты землетрясений на глубине 20 - 40 км в 1994 г. наблюдалось трижды: в конце февраля - начале марта, в мае - июне и в августе. Наибольшая скорость возникновения ГДП событий отмечалась с конца первой декады августа до 2 сентября, то-есть самое значительное усиление сейсмичности в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое под Ключевским вулканом закончилось за несколько дней до начала усиления в.д. и менее чем за две недели до появления первых видимых признаков активизации вулкана. Во время каждого "всплеска" ГДП сейсмичности под Ключевским вулканом фиксировались отдельные землетрясения на глубинах 5 - 20 км (см. [рис.3, Г](#)). Эпицентральная область ГДП землетрясений в 1994 г. протягивалась десятикилометровой полосой на северо-запад и юго-восток от центрального кратера.

После окончания вершинного извержения, в октябре-декабре 1994 г. на Ключевском вулкане происходили только неглубокие ВТ землетрясения, располагавшиеся в области радиусом примерно 5 - 7 км вокруг кратера.

1995 - 1996 гг. Сообщения о состоянии Ключевского вулкана, поступавшие в эти годы, главным образом, из г.Ключи и пос.Козыревск, то-есть с расстояния более 30 км, не претендуют на полноту, из-за отсутствия видимости какие-то эпизоды вулканической деятельности могли остаться незамеченными или, наоборот, быть истолкованными ошибочно.

После сильных эксплозивно-эффузивных вершинных извержений 1993 -1994 гг. в 1995-1996 гг. наступил период спада активности Ключевского вулкана. По данным наблюдателей из г.Ключи и пос.Козыревск, слабая фумарольная и парогазовая деятельность вершинного кратера время от времени усиливалась, сменяясь пепловыми выбросами высотой до 1500-2000 м и взрывами (март-начало июля 1995 г. - период "э"; ноябрь-декабрь 1996 г. - период "я", [рис.3, Д](#)). В ряде случаев наблюдались пеплопады в г.Ключи (например, 17 марта 1995 г.). Относительно состояния Ключевского вулкана после 1994 г. существует и несколько иная точка зрения. Как считают авторы работы [18], после пароксизмального вершинного извержения Ключевской вулкан, "выплеснув накопленную энергию, должен был надолго прекратить проявления заметной эруптивной активности". Формирование провала "сопровождается обвалами в кратере, пыль от которых иногда ошибочно принимается за пепловые выбросы". При облете вулкана в августе 1995 г. в вершинном кратере был зафиксирован провал, глубина которого, по данным аэронаблюдений во второй половине 2000 г, составила ~ 800 м.

В 1995 - 1996 гг. сейсмичность вулкана была представлена в.д. и другими ПДП сигналами, ВТ землетрясениями в вулканической постройке и вулканогенно-осадочном слое, а также землетрясениями в средних и нижних горизонтах земной коры (см. [рис.3, Д](#)).

Более или менее заметное в.д. появлялось на Ключевском вулкане в январе - начале июля 1995 г., середине августа - декабре 1996 г. Характерно появление на фоне очень слабого и умеренного (~ 0,15 - 0,4 мкм) в.д. периодов регистрации более интенсивных колебаний с A^{\max} порядка 2 - 6 мкм. Длительность таких "полос" менялась от нескольких минут до нескольких часов, по характеру изменения амплитуды колебаний в.д. часто приближалось к спазматическому.

Самое большое число землетрясений под Ключевским вулканом (от нескольких десятков до нескольких сотен событий в год) регистрировалось в 1995 - 1996 гг. в интервале глубин 20 - 40 км. Величина K_s^{\max} не превышала 6,5. Размеры и ориентация эпицентральной области в основном совпадали с аналогичными параметрами эпицентральных областей ГДП событий в предыдущие годы. На глубинах менее 5 км, кроме единичных событий, в 1995 - 1996 гг. было зарегистрировано несколько слабых длительностью от 3 - 4 суток до двух - трех. недель роев землетрясений: 21 - 23.04, 9 - 12.05 и 22 - 24.05. 1995 г., и 9 - 20.10 и 17 - 31.12 1996 г. ($K_s^{\max} = 7,0 - 75$ порядковые номера роев 13 - 17 на [рис.3, Д](#)), которые иногда совпадали по времени с визуально наблюдаемыми усилениями паро-газовой деятельности вершинного кратера. В средних горизонтах земной коры происходили единичные слабые события, во время или сразу после которых в ряде случаев наблюдалось появление "полос" усиливающегося в.д. Землетрясения с глубиной очага 5 - 20 км, в свою очередь, происходили либо на фоне сейсмической активности в интервале глубин 20 - 40 км (например, в марте - июне 1995 г.), либо после ее прекращения (в августе - декабре 1996 г.). Таким образом, сейсмическая обстановка на Ключевском вулкане в первые два года после извержения 1994 г. оставалась возмущенной, что продолжалось, как, следует из каталога ОМСП, еще более двух лет.

Анализ фактических данных, обсуждение результатов

За истекшие 10 лет (1987 - 1996 гг.) Ключевской вулкан был активен около 50% времени. В этот период произошли три достаточно крупных побочных, несколько мини-прорывов и множество терминальных и субтерминальных извержений различной интенсивности и продолжительности. Вершинное и побочное извержения 1989 - 1990 гг. были наиболее значительными вулканическими событиями, начиная с 1978 г. [26], но последовавшие в 1993 и 1994 гг. новые вершинные извержения характеризовались еще более мощными эруптивными явлениями. На отдельных этапах этих извержений расход лавы более чем на порядок превышал долговременный средний расход вулкана. [А.Ю.Озеров и др., готовится к печати]. После пароксизмального вершинного извержения 1994 г. каких-либо значительных проявлений эруптивной деятельности на Ключевском вулкане не отмечалось (сведения на конец 2000 г.). Формирующийся в настоящее время в кратере огромный провал - "один из признаков пассивного состояния вулкана, свидетельствующий об опустошении магмоподводящего канала"[18].

Общая характеристика сейсмичности Центральной зоны под Ключевским вулканом. Фактические данные, рассмотренные в настоящей статье, вместе с опубликованными ранее [19,20,26], представляют длинный ряд результатов детальных сейсмологических наблюдений (1978 - 1996 гг.), охватывающих период разнообразной деятельности Ключевского вулкана. Анализ этих результатов позволяет уточнить и существенно дополнить сведения о сейсмичности и магматической деятельности вулкана в земной коре. Центральная сейсмоактивная зона, в которой течение последних трех десятилетий проявлялась эта деятельность, располагается вокруг Ключевского вулкана, уходя практически вертикально от вершинного кратера до переходного от коры к мантии слоя на глубины 35 - 40 км.

Исследование распределения числа и энергии землетрясений по глубине (рис.4) за двадцатилетний отрезок времени показало, что происходящие в Центральной зоне под Ключевским вулканом землетрясения из года в год приурочены к определенным интервалам глубин, активизирующимся на различных стадиях вулканической деятельности. По уровню сейсмической активности под вулканом были выделены четыре горизонта (или области, или слоя), в которых заключена проходящая через земную кору питающая магматическая система. Границы между слоями проведены достаточно условно и с учетом ошибок в определении координат очагов могут колебаться в ту или иную сторону в пределах, по меньшей мере 2 - 3 км.

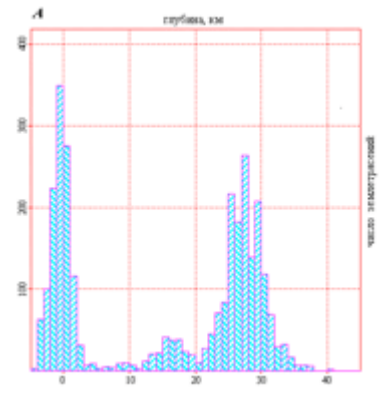


Рис. 4

Горизонт 1 (интервал глубин - 4 - 5 км) представлен слагающими вулканическую постройку рыхлыми лавово-пирокластическими четвертичными отложениями и более плотными вулканогенно-осадочными породами палеоген-неогенового возраста (вулканогенно-осадочный фундамент), залегающими на сильно метаморфизованных меловых породах (меловой фундамент). Слой 1 отличается максимальной суммарной сейсмической энергией и максимальным энергетическим классом возникающих здесь землетрясений, $K_s^{\max} = 9,3$ ($M \sim 3.1$). Кроме в.д., взрывных землетрясений и др. сейсмических сигналов, характеризующих динамику извержений, здесь происходят наиболее сильные рои землетрясений, являющиеся краткосрочными предвестниками побочных прорывов [34], относительно более слабые рои, связанные с усилением эксплозивно-эффузивной деятельности вершинного кратера, субтерминальной активностью, а также с растрескиванием вулканической постройки и возникновением на трещинах короткоживущих эруптивных центров (по сути, побочных мини-прорывов). Всего за 1978 - 1996 гг. в вулканической постройке и вулканогенно-осадочной толще под Ключевским вулканом зарегистрировано более 20 роев землетрясений, координаты которых были определены сетью сейсмических станций. Изучение особенностей роев землетрясений Ключевского вулкана является предметом отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей статьи.

В целом эпицентральная область землетрясений слоя 1 в период 1978 - 1996 гг. имела площадь около 150 - 170 км², наиболее удаленные землетрясения с $K_s > 5,5$ располагались в исследуемые годы на северном склоне Ключевского вулкана на расстояниях до 10 - 12 км от вершинного кратера. Максимум сейсмичности фиксируется в диапазоне глубин от 2 км выше до 2 км ниже уровня моря, наибольшее количество землетрясений и самые сильные события отмечались в 1978 - 1996 гг. в радиусе около 5 - 6 км от центрального кратера. Среднегодовое количество землетрясений с $K_s > 6,0$ за этот же период составило примерно 30 соб./год. Долговременное значение параметра в распределении $\log N = a - y \log E$ равно приблизительно 0,75 (для 730 землетрясений).

Сейсмоактивный горизонт 2 (глубины 5 - 12 км), расположен в метаморфизованных породах мелового фундамента, которые, согласно геолого-геофизическим данным [2,3], в районе Ключевской группы вулканов сменяются отложениями гранитно-метаморфического слоя приблизительно на глубине около 6 км. Слой 2 слабосейсмичный, в нем происходит менее 5 % от общего числа возникающих в Центральной зоне землетрясений, суммарная сейсмическая энергия которых более чем на два порядка ниже, чем в слое 1, за период 1978 - 1996 гг. $K_s^{\max} = 7.5$ ($M \sim 2$). Среднегодовое количество землетрясений с $K_s > 6,0$, определенное за 19 лет, составляет порядка 1 - 2 событий в год.

Глубины 12 - 20 км (горизонт 3), по общим представлениям о геологическом строении района Ключевской группы вулканов [2,3], соответствуют "гранитному" слою, имеющему на глубине 18 - 20 км нечетко выраженную границу с нижним горизонтом земной коры, так называемым "базальтовым" слоем. Горизонту 3 присущи более высокая сейсмическая активность и большие поперечные размеры по сравнению со слоем 2. Максимальный энергетический класс

землетрясений в период 1978 - 1996 гг. достигал 9,3 ($M = 3,1$). Максимум сейсмичности приурочен к глубинам $\sim 15 - 18$ км. Долговременное значение параметра $\gamma \sim 0,86$ (для 125 событий с $K_s > 6,0$). Примерно такой же величиной оценивается параметр γ для объединенных в один слоев 2 и 3 (164 землетрясения).

Слой 4 расположен на глубинах 20 - 35 (40) км, в низах земной коры и зоне перехода от коры к мантии, которая повсеместно в районе Ключевской группы вулканов характеризуется сложным распределением скоростей [2]. В слое 4 наблюдается наибольшее число землетрясений, но суммарная сейсмическая энергия их более чем на порядок ниже, чем в слое 1 (см. [рис.4, Б](#)). Максимальный энергетический класс землетрясений, происходящих в этом слое, за период с 1978 по 1996 гг. не превышал 6,5 - 6,7 ($M \sim 1,3$). Площадь эпицентральной области, образованной этими землетрясениями в 1978 - 1996 гг., занимает приблизительно 110 км². Максимум сейсмичности фиксируется в интервале глубин 25 - 30 км, в средней части переходной зоны. Область вытянута с северо-запада на юго-восток на 10 - 12 км, центр ее смещен относительно вершинного кратера к северо-востоку. Среднегодовое количество ГДП землетрясений с $K_s \geq 5,5$, подсчитанное за 19 лет, достигает ~ 80 событий в год, Долговременное значение величины γ , определенное для 1450 землетрясений, составило $\sim 2,6$.

Временные соотношения между сейсмической и вулканической активностью на Ключевском вулкане. Данные, опубликованные в многочисленных литературных источниках, начиная с монографии П.И. Токарева [23], а также приведенные в настоящей статье, демонстрируют непосредственную прямую связь между вулканической активностью и сейсмичностью под Ключевским вулканом на глубинах менее 5 км. Именно в вулканической постройке и вулканогенно-осадочном слое регистрируются краткосрочные предвестники извержений - рои землетрясений, предваряющие побочные, а иногда и вершинные извержения. Мы не будем останавливаться на этом вопросе, а перейдем к дополнительному исследованию интересной особенности сейсмичности питающей магматической системы Ключевского вулкана, расположенной в земной коре, которая была отмечена впервые в работе [26]. Суть этой особенности сводится к следующему. В течение двадцати с лишним лет детальных сейсмологических наблюдений в Центральной зоне под Ключевским вулканом неоднократно наблюдалась миграция очагов землетрясений снизу вверх, с глубин 20 - 35 (40) км до самых верхних частей вулканической постройки в периоды усиления вулканической активности, а также сверху вниз - в периоды ее ослабления. В интервале времени с 1978 - до середины марта 1987 гг. перемещение очагов землетрясений отмечалось практически перед всеми побочными и вершинными извержениями и сразу или вскоре после их окончания (см. [рис.13](#) в [26]). Приведенные в настоящей статье данные за март 1987 - 1996 гг. отражают, хотя и более сложную, но в общем ту же картину. Достаточно выразительные эпизоды уменьшения или увеличения глубины очагов землетрясений наблюдались перед вершинным извержением в конце декабря 1987 г. и последовавшим за ним побочным извержением им. XXV-летия ИВ в конце января 1988 г. (периоды "д" и "е" на [рис.3, А](#)); приблизительно за 10 суток до начала побочного прорыва им. Скуридина 26 июля 1989 г. (конец периода "и", начало "к" на [рис.3, Б](#)); во время затухания вершинного извержения, которое началось с первых чисел октября 1990 г. (конец периода "н" на [рис.3, Б](#)); перед и после сильных вершинных извержений 1993 и 1994 гг. (периоды "у", "ф", "ш" на [рис.3, Г](#)). По грубым оценкам, за минувшие 20 лет максимальная скорость миграции сейсмической энергии достигала $\sim 1 - 2$ км/сутки. Длительность периодов появления землетрясений в интервале глубин 20 - 40 км составляла от нескольких недель до 5 - 10 месяцев, при этом тенденция к более продолжительной (более 5 месяцев) сейсмической активизации в слое 4 наблюдалась в 1989 - 1994 гг., когда происходили наиболее значительные вершинные и побочные извержения Ключевского вулкана. Усиление сейсмичности внутри этих периодов отмечалось в среднем за 0,5 - 4 месяца до начала, а также спустя несколько дней или несколько недель после окончания эруптивных событий. Во время вулканической активности землетрясения в слое 4 нередко исчезали, но иногда продолжали происходить небольшими группами или в виде одиночных событий. Не исключено, что это может свидетельствовать о непрекращающихся процессах в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое под вулканом, которые как бы "подпитывают" уже развивающиеся извержения, обуславливая продолжительность и мощность последних. В качестве примера можно привести период 1989 - 1990 гг. За усилением сейсмичности в слое 4 (миграция очагов землетрясений вниз), которое наступило с середины января 1989 г. на фоне прекращения излияния лавы из трещины на восточном склоне вулкана, последовало не ослабление вулканической деятельности, как можно было бы ожидать после эруптивных событий 1988 г. (вершинные и субтерминальные, побочное и мини-побочные извержения), а перемещение землетрясений вновь в средние и верхние горизонты земной коры и новое усиление активности вулкана - побочный прорыв им. Скуридина, крупное вершинное извержение 23.01 - 6.02. 1990 г. (см. период "и" на [рис.3, Б](#)). После этих сильных извержений, в течение апреля - августа 1990 г., на глубинах 20 - 30 км происходили отдельные слабые землетрясения, в это же время продолжалось образование трещин на склонах вулкана, сопровождавшееся роями неглубоких землетрясений. И только после окончания последнего такого роя (12), 15 - 16 августа началось перемещение сейсмической активности в нижние горизонты земной коры (см. конец периода "к" на [рис.3, Б](#)), за которым последовало почти полное прекращение вершинного извержения.

Землетрясения во втором и третьем слоях Центральной зоны, возникающие в виде редких одиночных событий, в целом подобны. Разделение интервала глубин 5 - 20 км на два слоя основано на различии уровней сейсмичности, которая в слое 2 на порядок ниже, чем в слое 3. В зависимости от скорости и направления миграции сейсмической энергии, о чем говорилось выше, землетрясения в средних горизонтах земной коры под Ключевским вулканом чаще происходят за время от 2 - 3 месяцев до нескольких дней - нескольких недель до начала или после окончания вулканической активности. В ряде случаев наблюдалась непосредственная связь между появлением землетрясений в 3 или 2 слоях и извержениями Ключевского вулкана. Так, сразу после землетрясения 28 февраля 1983 г. с $K_s = 8,3$ и $H = 13$ км (слой 3) произошло резкое ослабление вершинного извержения, а еще спустя 32 ч на том же восточном склоне начал развиваться рой неглубоких землетрясений, предварявший побочное извержение. Предсказанное [7] Самое сильное землетрясение в рое ($K_s = 8,7$, $H =$

0 км), предвращавшем побочное извержение им. Скуридина в июле 1989 г., произошло через 5 ч после землетрясения с глубиной порядка 8 - 10 км (слой 2) непосредственно под вершинным кратером Ключевского вулкана.

На [рис.5](#) показано изменение среднегодовых значений числа и энергии землетрясений с $K_s \geq 5,5$ в слоях Центральной зоны (в 1, объединенных 2, 3 слоях и в 4 слое), определенных по трехлетним интервалам времени за период 1977 - 2000 гг. (для 1997 - 2000 гг. использованы данные каталога ОМСП). Первое, что заметно на приведенных графиках, это то, что увеличение числа и энергии землетрясений в 4 и 3 - 2 слоях в 1983 - 1984 гг. в среднем происходило на 1 - 2 года раньше, чем в вулканогенно-осадочном слое и в вулканической постройке. По-видимому, после провала в вершинном кратере Ключевского вулкана, развившемся в 1980 - 1982 гг. [17], вследствие нового поступления магмы в питающую систему из глубинного источника и роста давления в вышележащих горизонтах происходила "проработка" магмоподводящего канала или каналов Ключевского вулкана. На глубинах от 5 до 20 км наиболее высокий уровень сейсмичности наблюдался в промежутки времени, включавшие вершинные и побочные извержения 1983 - 1990 гг., после чего сейсмическая активность в средних горизонтах коры в Центральной зоне снизилась. В нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое среднегодовые значения числа и энергии землетрясений возрастали по мере усиления вулканической деятельности, начиная с извержений 1984 - 1988 гг. и заканчивая пароксизмом 1994 г. и последовавшим вслед за ним периодом 1995 - 1997 гг., в течение которого в вершинном кратере Ключевского вулкана был обнаружен провал (первые данные аэросъемки получены в августе 1995 г.). Глубина провала во время облета в сентябре 2000 г. составила ~ 800 м. Согласно данным каталога ОМСП, в 1997 - 2000 гг. происходило постепенное снижение сейсмичности на всех уровнях глубин, при этом, начиная с марта 1999 г. по настоящее время землетрясения с глубиной очага 20 - 40 км под вулканом на уровне приблизительно третьего энергетического класса отсутствуют.

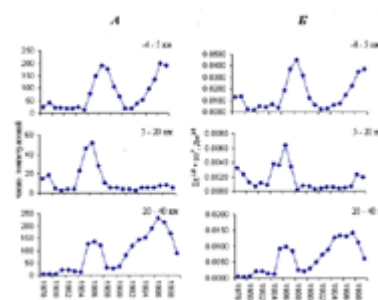


Рис. 5

О природе землетрясений в земной коре под Ключевским вулканом. Согласно классификации, предлагаемой в настоящее время рядом исследователей сейсмических сигналов на вулканах мира [5,30, и др.], большинство землетрясений, регистрируемых под Ключевским вулканом в слоях 1, 2 и 3, по природе их возникновения, относятся к вулcano-тектоническим (ВТ) землетрясениям, которые возникают под действием непрерывно меняющегося поля напряжений, создаваемого вокруг магматических каналов, очагов, систем даек и силлов, внедряющихся в вулканическую постройку и/или в результате перераспределения давления в питающей магматической системе. В слое 1 регистрируются также низкочастотное вулканическое дрожание, взрывные и другие низкочастотные сигналы, связанные с процессами дегазации в магме [5] и представляющие т.н. поверхностную длиннопериодную (ПДП) сейсмичность.

В слоях 1 - 3 могут происходить низкочастотные вулканические землетрясения, возникающие при образовании трещин, заполняемых продвигающейся магмой, например, в роях, предвращающих побочные прорывы на склонах Ключевского вулкана [10,23], а также т.н. гибридные землетрясения, являющиеся, суперпозицией вулcano-тектонических и низкочастотных землетрясений [6,30]. Вследствие технических трудностей выделение подобных землетрясений по аналоговым записям не производилось.

Как уже упоминалось, землетрясения на глубинах 20 - 40 км под Ключевским вулканом по целому ряду характеристик отнесены нами к разряду глубоких длиннопериодных (ГДП) землетрясений (подробнее об этом см. статью В.И.Горельчик и А.В.Сторчеуса в настоящем сборнике [13]). Отдельные ГДП землетрясения регистрируются иногда на глубинах 18 - 20 км и формально попадают в слой 3. Это связано с естественной непрямолинейностью и условностью проведения границ между слоями, а также с ошибками в определении координат очагов.

ГДП землетрясения под Ключевским вулканом, как отмечалось выше, часто образуют группы и рои, состоящие из событий, однотипных по форме записи, которая в значительной степени отличается от записей землетрясений в вышележащих слоях и от записей обычных тектонических землетрясений, возникающих в нижних горизонтах земной коры за пределами Центральной сейсмоактивной зоны. Для ГДП землетрясений под Ключевским вулканом характерны узкий диапазон энергетических классов, в 1978 - 1996 гг. не превышавших величину 6,5 - 6,7, более длинный видимый период колебаний в S-волнах максимальной амплитуды, аномально высокие значения угла наклона графика повторяемости [12]. Имеются данные томографии об уменьшении скоростей сейсмических волн в слое 4 (устное сообщение профессора Йельского университета США Дж. Лиса, 1998 г.). По предварительным оценкам, сделанным А.В. Сторчеусом [31], эффективная вязкость среды в слое 4 на несколько порядков ниже, чем в астеносфере. Все это дает основание предполагать, что среда под Ключевским вулканом в диапазоне глубин ~ 20 - 40 км отличается по физическим свойствам от окружающей среды на более высоких горизонтах земной коры и в самом переходном слое вне Центральной зоны. Происходящие в слое 4 ГДП землетрясения имеют иную генетическую природу, чем обычные ВТ землетрясения, вызываемые реализацией напряжений в твердой среде. Это предположение подтверждается также отмеченным выше различием тенденций в поведении сейсмической активности на глубинах 5 - 20 км и 20 - 40 км под Ключевским вулканом во времени (см. рис.5) в связи с его деятельностью в течение цикла 1977 - 2000 гг. (за начало цикла мы условно приняли время после Большого трещинного Толбачинского извержения 1975 - 1976 гг., когда вследствие появления новых пунктов наблюдения увеличилось количество обрабатываемых землетрясений). Землетрясения в слоях 2 и 3, как уже упоминалось выше, отражают перераспределение напряжений в районе вулкана, которые возникают в связи с движением магмы в магматической системе и изменением давления в последней. На более ранних стадиях вулканического цикла (в нашем случае в 1977 - 1987 гг.), когда пути движения магмы и флюидов были менее "проработаны", в средних горизонтах земной

коры под Ключевским вулканом возникали относительно более сильные землетрясения. В дальнейшем, по мере накопления магмы в питающей системе вулкана, и, как следствие, усиления эруптивной деятельности, "проницаемость" магматического канала увеличивается, землетрясений в интервале глубин 5 - 20 км становится меньше и их энергия снижается, что и наблюдалось в 1990 --1994 гг. Сейсмическая активность на глубинах 20 - 40 км достигала наивысшего уровня на наиболее активной стадии эруптивного цикла, в период самых сильных извержений вулкана (1990, 1993, 1994 гг.) и наступившего затем процесса проседания магматической колонны и формирования провала в вершинном кратере.

Таким образом, землетрясения в слое 4, по нашему предположению, являются отражением процессов, управляющих состоянием вулкана. На основании данных, имеющихся в литературе [5,30] и полученных нами при исследовании сейсмичности Ключевского вулкана, представляется, что в генерации ГДП землетрясений важная роль должна принадлежать флюидам. Длительно действующий источник генерации ГДП землетрясений фиксирует положение питающей магматической системы в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое. Более подробно вопросы, касающиеся свойств и природы ГДП землетрясений под Ключевским вулканом, обсуждаются в работе [13].

Усиление сейсмической активности в нижних горизонтах коры и переходном от коры к мантии слое, как правило, на несколько недель или месяцев опережает возникновение краткосрочных предвестников эруптивных событий - роев неглубоких ВТ землетрясений, что делает целесообразным включение слежения за поведением ГДП землетрясений в методику комплексного прогноза извержений Ключевского вулкана [28]. В качестве ближайших задач предстоит выработать количественные критерии выделения аномалий ГДП сейсмичности и исследовать связь ГДП землетрясений с геодинамической обстановкой в Курило-Камчатском регионе. Необходимым, на наш взгляд, является исследование скорости возникновения ГДП землетрясений и более детальное изучение пространственного распределения землетрясений в средних горизонтах земной коры как индикаторов изменения и перераспределения напряжений в питающей магматической системе.

Замечание. После пароксизмального извержения 1994 г. до настоящего времени (февраль - март 2001 г.) Ключевской вулкан не проявляет заметной активности. Провал, образовавшийся в вершинном кратере, имеет глубину ~ 800 м. По данным ОМСП, сейсмичность на глубинах 20 - 40 км стала резко уменьшаться во второй половине 1998 г., с конца марта 1999 г. ГДП землетрясения с $K_s \geq 3,5$ в слое 4 не регистрируются. В 2000 г. на уровне $K_s \geq 5,5$ отсутствуют землетрясения в средних горизонтах земной коры и существенно снизилась поверхностная сейсмичность. Все это, по-видимому, свидетельствует о замедлении или прекращении процессов проседания магматической колонны и формирования провала. По мнению В.Н. Двигало [17], прекращение процесса просадок может быть сигналом к возможной новой активизации вулкана. Разделяя такую точку зрения и учитывая масштабы опустошения магматического канала [18], мы высказываем предположение, что следующий цикл активности Ключевского вулкана с большой степенью вероятности может начаться с побочного извержения. В настоящее время важно получение данных аэробнаблюдений о состоянии вершинного кратера.

Выводы

1. На основе анализа данных длинного ряда (1978 - 1996 гг.) детальных сейсмологических наблюдений, охватывающих период разнообразной активности Ключевского вулкана от умеренного эффузивно-эксплозивного (1978 г.) до субплинианского (1994 г.) вершинного извержения, последующего периода покоя и образования огромного провала в вершинном кратере, уточнены и дополнены сведения о сейсмичности питающей магматической системы вулкана, расположенной в земной коре.

2. В земной коре под Ключевским вулканом выделены четыре слоя, различающихся по уровню сейсмической активности и характеру связи с вулканической деятельностью.

3. В слоях 1 - 3 вулcano-тектонические землетрясения происходят в упруго-деформированной среде под действием меняющегося поля напряжений, возникающих при перемещениях магмы и газов в питающей магматической системе вулкана. Самый высокий уровень сейсмичности, отмечается на глубинах менее 5 км (слой 1), где происходят многочисленные рои землетрясений, связанные с внедрением даек и силлов в вулканическую постройку. Землетрясения в интервале глубин 5 - 20 км (слои 2 и 3) являются индикаторами подвижек, происходящих на путях миграции магмы и/или флюидов в средних горизонтах земной коры, через которые проходит магмоподводящий канал или система каналов.

4. В нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое (интервал глубин 20 - 40 км) под Ключевским вулканом выявлена зона с аномальными физическими свойствами, в которой генерируется множество глубоких длиннопериодных землетрясений. Предполагается, что природа этих землетрясений связана с процессами, происходящими в магме и определяющими состояние вулкана.

5. Слежение за сейсмической активностью слоя 4 предоставляет дополнительную информацию для оценок состояния Ключевского вулкана. Количественные параметры ГДП сейсмичности, которые предстоит выработать, могут, по нашему мнению, улучшить методику комплексного прогноза извержений вулкана [28].

Авторы благодарят Г.И.Аносова, В.Н.Двигало, Б.В.Иванова, И.В.Мелекесцева, А.В.Сторчеуса, П.П.Фирстова и В.А.Широкова за внимание к работе и интересные дискуссии, О.С.Чубарову за полезные замечания, а также М.Я.Малкину, выполнившую большой объем работы по подготовке фактических данных в машиночитаемом виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Аносов Г.И., Балеста С.Т., Иванов Б.В., Утнасин В.К.* Основные черты тектонического строения Ключевской группы вулканов в связи с ее глубинным строением // ДАН. 1974. Т. 219. N 5. С. 1192-1195.
- *Аносов Г.И., Биккенина С.Л., Попов А.А., Сергеев К.Ф., Федорченко В.И., Утнасин В.К.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука. 1978. 130 с.
- *Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргапольцев А.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л.* Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевской группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 1991. N3. С. 3-18.
- *Белоусов А.А., Белоусова М.Г., Жданова Е.Ю.* Деятельность вулканов Северной группы (Камчатка) в 1990 - 1992 гг. // Вулканология и сейсмология. 1996. N 2. С. 25 -33.
- *Гордеев Е.И.* Природа сейсмических сигналов на активных вулканах: Автореф. дисс. док. физ.-мат. наук. Москва, 1998. 30 с.
- *Гордеев Е.И., Сеньюков С.Л.* Сейсмическая активизация Корякского вулкана: гибридные землетрясения и их применение для прогноза вулканической опасности // Вулканология и сейсмология. 1998. N 4 - 5. С. 112 - 126.
- *Горельчик В.И.* Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подготовки и развития прорыва "Предсказанный" в марте-июле 1983 года // Вулканология и сейсмология. 1985. N 1. С. 71 - 87.
- *Горельчик В. И.* Сейсмичность района Ключевской группы вулканов и связь сейсмических и вулканических явлений на Ключевском вулкане, 1971 - 1983 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке // Тез. докл. Выездной сессии МСССС и VI научной сессии Дальневосточной секции МСССС. Петропавловск- Камчатский, 1986. С. 25 - 26.
- *Горельчик В. И.* Сейсмичность магматической системы Ключевского вулкана на Камчатке // Тез. Докл. VII Всесоюзного вулканологического совещания "Вулканизм, структуры и рудообразование". Петропавловск-Камчатский, 1992. С. 48.
- *Горельчик В.И., Левина В.И.* Пространственно-временные и динамические характеристики землетрясений, связанных с извержением Ключевского вулкана в 1974 г. // Вулканология и сейсмология . 1985. N 6. С. 59 - 79.
- *Горельчик В. И., Степанов В. В.* Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971-1972 гг. // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 198 - 218.
- *Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* О длиннопериодных вулканических землетрясениях в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое под Ключевским вулканом // Материалы научно-практической конференции "Проблемы сейсмичности Дальнего Востока, новая карта сейсмического районирования ОСР - 97, ее роль и значение для Петропавловска-Камчатского и области. Петропавловск-Камчатский, 6 - 9 апреля 1999. С. 73.
- *Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом. Камчатка. наст. сборник.
- *Горельчик В. И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность района Северной группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 1988. N 1. С. 90 - 100.
- *Горельчик В. И., Гарбузова В. Т., Левина В.И., Чубарова О.С.* Разработка и опробование системы прогноза вулканических извержений на Камчатке: Отчет о НИР (заключит.) // ВНИИЦентр; ГР 81068164; Инв. N 528. М., 1986, Гл.3. 1. С. 63 - 141.
- *Двигало В.Н.* Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968 -1988 гг.// Вулканология и сейсмология. 1991. N 5. С. 3 - 18.
- *Двигало В.Н.* Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. N 4. С. 3 - 16.
- *Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской (по результатам ревизии последствий событий 1944 - 1945 и 1984 - 1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 2000. N 1. С. 3 - 17.
- *Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Белоусов А.Б. и др.* Извержения и сейсмический режим Северной группы вулканов в 1986 -1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1990. N 3. С. 3 - 20.
- *Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Жданова Е.Ю. и др.* Извержения Северной группы вулканов в 1988 - 1989гг., сейсмологические и геодезические данные // Вулканология и сейсмология. 1991. N 6. С. 3 - 33.
- *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А., Двигало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Яцук В.В., Округина А.М.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября - 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. N 5. С. 3 - 16.
- *Сургучев П.И., Горельчик В. И., Левина В. И., Мячкин В. И.* Массовое определение гипоцентров землетрясений на ЭВМ в районе Северной группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1992. N 2. С. 50 - 63.
- *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. 1966 М. Наука. 118 с.
- *Токарев П.И.* Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. N 6. С. 47 - 61.
- *Федотов С. А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- *Федотов С. А., Жаринов Н. А., Горельчик В. И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. N 2. С. 3 - 42.
- *Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения вулканов Шивелуч и Ключевской в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. N 8. С. 117 - 131.
- *Широков В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. N 6. С. 48 - 58.

- *Широков В.А.* Геодинамические аспекты взаимосвязи сейсмических и вулканических процессов, прогноз сильных землетрясений и вулканических извержений по сейсмологическим данным // Основные результаты научно-исследовательских работ Института вулканической геологии и геохимии за 1991 - 1996 гг. Петропавловск-Камчатский, 1996. С. 73 - 80.
- *Chouet B.A.* Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309-316.
- *Gorelchik V. I. and Storcheus A.V.* Deep long-period earthquakes under Klyuchevskoy volcano (Kamchatka) // Geophysical investigation of the active volcanoes: prognosis and mechanism of volcanic eruption. European Seismological Commission International Workshop. Petropavlovsk-Kamchatsky. September, 1998. P. 18 - 19.

Seismicity of the Klyuchevskoi volcano as a reflection of its present

magmatic activity (chronicle of the 1987-1996 events

and main peculiarities of the associated seismicity).

V.I. Gorelchik, V.T.Garbuzova

The results of studies of the Klyuchevskoi seismicity in relation to its state over the period from March 1987 to 1996 are represented in this paper. Data of the new catalog of earthquakes for the Northern group of volcanoes created by the authors are used. A local hodograph of seismic waves has been applied to locate the earthquakes. Analysis of data of the long-term seismic observations (1978-1996) allows us to refine and to expand our knowledge of the Klyuchevskoi magmatic activity within the earth crust. Four layers of different level and seismic activity character has been distinguished in the earth crust beneath the volcano: -4 to 5 km; 5 to 12 km; 12 to 20 km; 20 to 40 km. Within the first three layers mainly volcanic-tectonic earthquakes take place. They occur in the solid medium influenced by ever varying stress field produced around magmatic channels, dike and sill systems intruding into the volcanic edifice. In the lower earth crust and crust- mantle transition layer (depth interval is from 20 to 40 km) a zone of anomalous physical properties has been revealed where a great number of deep long-period earthquakes is generated. The origin of these earthquakes is suggested to be associated with the processes occurring in magma.