

УДК 551.21.550.343

© 1995 г. ГОРЕЛЬЧИК В. И., ГАРБУЗОВА В. Т., ДРОЗНИН Д. В.,
ЛЕВИНА В. И., ФИРСТОВ П. П., ЧУБАРОВА О. С., ШИРОКОВ В. А.

На основании детальных сейсмологических наблюдений 1962—1994 г. исследованы глубинное строение, геометрия сейсмофокального слоя, система магматического питания вулкана Шивелуч, особенности сейсмических проявлений в земной коре и верхней мантии в ходе экструзивно-эксплозивного извержения 1980—1994 г., рассмотрены вопросы прогноза извержений. Показано, что под вулканом Шивелуч на глубинах 100—200 км сейсмофокальный слой падает под углом 70°. На основании выявленной взаимосвязи сейсмичности на глубинах 105—120 км с фазой экструзивного извержения вулкана в 1980—1994 г. сделан вывод, что на глубинах не менее 100 км происходит выплавление первичных магм, периодически подпитывающих коровый очаг. Показано, что усиление экструзивно-эксплозивной деятельности вулкана предваряется и сопровождается увеличением числа и энергии вулканических землетрясений как непосредственно под куполом, так и в зонах коровых разломов северо-западного простирания. Описан методический подход, использованный при прогнозе наиболее сильного после 1964 г. извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. Дан среднесрочный прогноз возможного усиления активности вулкана в апреле — июле 1995 г.

THE SHIVELUCH VOLCANO: DEEP STRUCTURE AND PREDICTION OF ERUPTIONS USING DETAILED SEISMICITY DATA, 1962—1994, by Gorelchik V. I.*, Garbuzova V. T.***, Droznin D. V.**, Levina V. I.**, Firstov P. P.*, Chubarova O. S.* and Shirokov V. A.*. Based on a detailed seismological observations from 1962 through 1994, the deep structure, focal layer geometry, magmatic feeding system of the Shiveluch volcano are investigated. Beneath the Shiveluch volcano, a focal layer deepens at an angle of 70 at depths of 100—200 km. Based on the established interrelation between the seismicity at depths of 105—120 km and a phase of extrusive volcano eruption in 1980 through 1994, a conclusion has been made that melting of primary magmas, periodically feeding the crustal chamber, occurs at depths at least 100 km. Increase of extrusive-explosive activity of the volcano is preceded and accompanied by the increasing number and energy of volcanic earthquakes both beneath the dome and in the zones of crustal faults of northwestern trend. A description is given of the methods used in the successful short-term prediction of the eruption in April 1993 which has been the most powerful since 1964. A mean-term prediction of possible increase of the volcano activity in April — July of 1995 is made.

(Received December 7, 1994)

* *Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

Experimental-Methodical Seismological Department, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Шивелуч — самый северный действующий вулкан Камчатки, расположенный в северной части Центральной Камчатской депрессии, ближе всех остальных вулканов к стыку Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Вулканический центр Шивелуч, начавший формироваться 60—70 тыс. лет назад, занимает площадь не менее 1300 км², поперечник его основания 40—50 км. Абсолютная

высота вулкана 3283 м, высшая точка современного действующего аппарата (Молодой Шивелуч, образованный множеством слившихся андезитовых экструзивных куполов и их агломератовых мантий) — 2800 м. Продуктивность вулкана в голоцене — 70 млн. т/год [17].

В течение последних 10 тыс. лет для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные типа «направленный взрыв» и слабые и умеренные по силе извержения, сопровождающие рост экструзивных куполов [16]. Длительность катастрофических извержений исчисляется днями или часами, повторяются они в среднем через 100 лет (устное сообщение В. В. Пономаревой). По историческим данным, произошло два таких извержения в 1854 и 1964 гг. Слабые и умеренные извержения вулкана Шивелуч могут продолжаться годами. На основании изучения деятельности вулкана за последние 300 лет Г. С. Горшков и Ю. М. Дубик [5] предположили, что новое умеренное экструзивное извержение может произойти в 1980—1995 гг. Этот прогноз оправдался.

Последнее извержение типа «направленный взрыв» 12 ноября 1964 г. продолжалось всего 70 мин. В результате извержения выброшено $\sim 1,5 \times 10^{12}$ кг резургентного и столько же ювенильного материала, площадь зоны разрушения 100 км². На месте разрушенного извержением купола Суелич возник новый кратер площадью 381,5 км² и глубиной 0,7 км [5]. В северо-восточной части дна кратера образовалось небольшое куполовидное поднятие. С конца 1964 до второй половины 1980 г. на вулкане Шивелуч наблюдалась лишь фумарольная деятельность. В 1979 г. после семилетнего перерыва возобновлены наблюдения с детальным обследованием кратера и режима его фумарол [14]. По сравнению с 1972 г. в Центральной группе фумарол в 1979—1980 гг. обнаружено увеличение температуры и появление новых минералов-новообразований. Так как на месте фумарол Центральной группы в августе 1980 г. началось выжимание экструзивного купола, сделано предположение, что выявленные изменения связаны с состоянием магматического вещества на глубине [14].

Экструзивный купол возник строго на месте куполовидного поднятия в кратере извержения 1964 г. [6, 12] без каких-либо признаков эксплозивной деятельности и заметной сейсмической подготовки. Это позволяет предполагать, что магма перед началом выжимания экструзии находилась на небольшой глубине. Максимальная скорость роста купола, по данным аэрофотограмметрических исследований [6], наблюдалась в августе — сентябре 1980 г. (скорость поступления вещества 186 тыс. м³/сут, скорость роста высоты 2,5 м/сут). С октября 1980 по февраль 1981 г. скорость роста купола уменьшилась в ~ 3 раза, к концу 1981 г. рост прекратился. Выжимание купола сопровождалось редкими эксплозиями вулканского типа и формированием раскаленных лавин, периодические возникали фреатические взрывы. С конца 1981 до 1984 г. на куполе отмечалась только фумарольная деятельность.

Новая активизация купола началась в 1984 г. [28] и продолжается ~ 10 лет с небольшими перерывами. Этот процесс сопровождается извержениями, во время которых на куполе происходят взрывы, сходят лавины и пирокластические потоки. Эксплозивные извержения 1984—1993 гг. характеризовались выбросами парогазовой смеси и пепла. С 1990 г. увеличилась мощность выбросов, в составе которых обнаруживался более крупный пирокластический материал, спускавшийся в виде потоков по склонам купола. Несколько активных центров на куполе объединились в один, образовав кратер диаметром 200 м и глубиной ~ 100 м. Объем выброшенного материала за 1990—1992 гг. составил 10^6 м³ (см. ссылку на устное сообщение В. Н. Двигало в работе [8]). Кроме активных процессов на куполе, на поверхности кратера, возникшего в результате извержения 1964 г., в 1991—1992 гг. зафиксировано увеличение площади и температуры прогретых областей, образование линейных и дугообразных нарушений и новых фумарол. По мнению авторов работы [8], наблюдавшиеся изменения вызваны активизацией более глубоких вулканотектонических процессов. 21 апреля 1993 г. началась

пароксизмальная фаза эксплозивно-экструзивного извержения, наиболее сильного после извержения 1964 г. Пепловая туча над вулканом поднялась на высоту до 18 км, а длина пирокластических и грязевых потоков достигла 15—20 км [30]. В связи с усилившейся в последние годы активностью вулкана и большой опасностью, которую могут представлять сильные эксплозивные извержения андезитовых вулканов, впервые проведен детальный анализ сейсмичности и сейсмического режима вулкана Шивелуч за последние 30 лет.

История развития сейсмологических наблюдений на вулкане Шивелуч. Аппаратура, методика. В 1958—1962 г. сейсмический режим вулкана Шивелуч исследовался по данным трех существовавших в то время сейсмических станций KLY (Ключи), KZR (Козыревск) и APH (Апахончич), а после 1962 г.— по данным региональной сети станций Камчатки, из которых ближайшей к вулкану по-прежнему оставалась станция KLY (46 км от активного кратера). Сейсмические каналы имели стандартную для региональной сети камчатских станций амплитудно-частотную характеристику, регистрировалось смещение грунта с набором увеличений от $5 \cdot 10^2$ до 10^4 в диапазоне 1—10 Гц [29].

Координаты очагов землетрясений определяли по способу палеток изохрон с использованием общекамчатского годографа сейсмических волн для трехслойной скоростной модели земной коры [29]. Обработывались землетрясения энергетического класса $K_s > 8,0$ ($K_s = \lg E$, где E — энергия землетрясения (Дж), определенная по S-волнам).

В 70-е годы детальность сейсмологических наблюдений в районе Северной группы вулканов возросла вследствие открытия новых сейсмических станций. Улучшились качество и детальность обработки данных: для определения координат очагов землетрясений начали использовать местный годограф сейсмических волн, рассчитанный для шестислойной скоростной модели земной коры, полученной на основании данных ГСЗ [4]. В районе вулкана Шивелуч без пропуска определялись координаты очагов землетрясений с $K_s > 8,5$, а также многих более слабых событий. Поскольку самая близкая к вулкану станция располагалась на расстоянии 46 км, точность определения координат очагов землетрясений в районе вулкана была не более 5—10 км.

В 80-е годы в районе Северной группы вулканов создана сеть радиотелеметрических сейсмических станций (РТС) [2]. Открытие двух пунктов наблюдения вблизи вулкана Шивелуч (SVL в конце 1980 г. на расстоянии 8 км от активного купола и KPL в 1986 г. на расстоянии 3,5 км от купола) дало возможность проводить детальные наблюдения за сейсмическим режимом вулкана. Уровень представительного класса землетрясений, для которых могли быть определены координаты очагов, понизился до 6,5—7,0. Определение местоположения очагов землетрясений проводилось на ЭВМ по программе MINMALM [19], являющейся усовершенствованным машинным вариантом способа палеток изохрон. В случае хорошей регистрации близкими станциями ошибка определения координат землетрясений в районе вулкана Шивелуч составляла в большинстве случаев 3—5 км по глубине и по эпицентру.

В настоящей работе для исследования сейсмичности земной коры и верхней мантии в районе вулкана Шивелуч использованы три каталога: региональный, детальный и станционный. Региональный каталог за 1962—1992 г. (каталог I) представлен для землетрясений с $K_s > 8,5$ и содержит координаты очагов в диапазоне глубин 0—300 км, определенных с использованием общекамчатского годографа сейсмических волн. Более подробные сведения о коровой сейсмичности взяты из детального каталога за период с 1971 по 30.06.1992 г. (каталог II), составленного под руководством В. И. Горельчик для района Северной группы вулканов с использованием местного годографа и включающего все землетрясения с глубиной очага менее 40 км, координаты которых можно было определить. В работе использован графический пакет программ, разработанный Д. В. Дрозниным.

Сейсмическая активность, связанная с экструзивно-эксплозивной деятельно-

стью купола вулкана Шивелуч, исследована по бюллетеням вулканических землетрясений, в которые заносили события с амплитудой $A_{max} > 0,2$ мкм и $S - P < 5,2$ с, зарегистрированные ближайшими к вулкану станциями РТС, SVL и KPL в 1980—1992 гг. (каталог III). Для периода с 1 апреля 1992 по 31 июля 1994 г. использовали оперативные данные, поступавшие по связи с РТС SVL.

Сейсмичность района вулкана Шивелуч: общая характеристика. Рассматривается территория к северу от среднего течения р. Камчатка с линейными размерами 130x230 км (рис. 1, *з*), в центре которой располагается вулкан Шивелуч. На рис. 1, *а* приведена карта эпицентров землетрясений с $K_s > 8,5$ и $H = 0...300$ км за 1962—1992 гг. Представление о распределении очагов землетрясений по глубине вокруг вулкана Шивелуч дают вертикальные разрезы по линиям *ЛВ* (запад — восток) и *СД* (север — юг) (рис. 1, *б* и *в*), на которых видно, что наибольшее число событий с $K_s > 8,5$ здесь происходит в земной коре (интервал 0—30 км), два других максимума (примерно втрое меньше первого) приходятся на глубины 60—90 и 90—120 км соответственно.

Верхняя мантия. Сейсмическая активность верхней мантии в районе вулкана Шивелуч, как и повсеместно на Камчатке, связана с тихоокеанским фокальным слоем. На рис. 1 видно, что большая часть землетрясений с $H > 40$ км приурочена к южной части исследуемой территории (к югу от вулкана Шивелуч), где происходит более 90% всех регистрируемых событий. Сам вулкан расположен в краевой зоне мантийной части фокального слоя Камчатки, где сейсмичность резко снижается (22, 27]. Землетрясения с $H > 200$ км ($K_s > 8,5$) здесь происходят редко, поэтому в дальнейшем рассматривается сейсмичность в интервале глубин 40—200 км.

Для района Северной группы вулканов изолинии равных глубин очагов в среднем ориентированы в направлении север — юг [27]. Из этого следует, что для более точного определения мощности сейсмофокального слоя под Северной Камчаткой вертикальные разрезы вкрест простираения фокальной зоны должны быть ориентированы в направлении восток — запад (рис. 1, *б*, разрез по линии *АВ*). На таком разрезе видно, что фокальная зона под районом вулкана Шивелуч имеет сложное строение и состоит из двух несколько смещенных друг относительно друга слоев мощностью ~20 км каждый (по землетрясениям с $K_s > 8,5$): первый слой падает под углом $\alpha = 50^\circ$ и заканчивается на глубине 110 км; второй, простирающийся до юго-восточного подножия вулкана Шивелуч, уходит с 70 км на глубину до 200 км под Камчатский полуостров под углом $\alpha = 68^\circ$. Соответствующие значения углов падения фокального слоя для района Северной группы вулканов в работе [27] оцениваются в 30 и 58°. Глубина пересечения вертикальной оси, проходящей через вулкан Шивелуч, с осевыми линиями фокального слоя соответствует интервалу 90—110 км. Это наименьшая глубина среди всех действующих вулканов Камчатки.

Рассчитанные авторами долговременные значения (1962—1992 гг.) параметра γ закона повторяемости землетрясений по классам [18] для землетрясений с $K_s > 8,5$ и глубиной очага 40—200 и 70—200 км в районе вулкана Шивелуч в обоих случаях составляют, по оценкам авторов, 0,64—0,65, что существенно выше величины γ для других вулканических районов Камчатки (от Ключевой группы вулканов — на севере до вулкана Карымского — на юге (0,43—0,59)). Это свидетельствует о заметном дефиците сильных событий и, возможно, об отличии физических свойств вещества верхней мантии в самом северном блоке уходящего под Камчатку фокального слоя.

Земная кора. Коровые землетрясения в исследуемом районе связаны с деятельностью вулкана Шивелуч и блоковой тектоникой (рис. 2). В среднем, по данным камчатского регионального каталога за 1962—1992 гг., на глубинах 0—40 км здесь происходит ~3—5 землетрясений в год с $K_s > 8,5$. Исключение составляет 1964 г., когда общее число вулканических землетрясений с $K_s > 8,5$, предварявших катастрофическое извержение, достигало 70, и 1972—1973 гг. (более 10—15

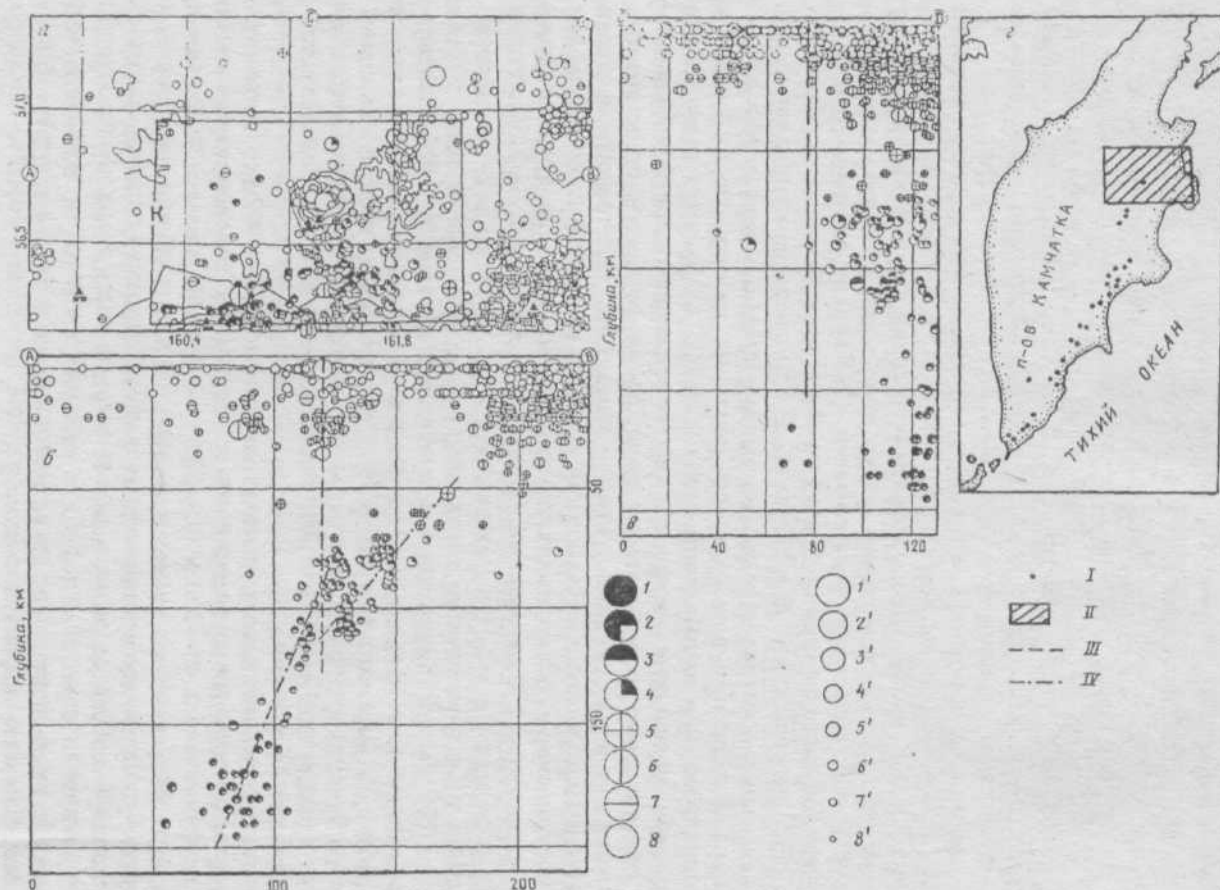


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с $K_s \geq 8,5$ и $H = 0 \dots 200$ км для района вулкана Шивелуч 1962—1992 гг. (а), вертикальные разрезы по линиям AB (б) и CD (в) и схема расположения района исследований (г). I — вулканы, II — район исследований, III — проекция вертикальной осевой линии, проходящей через кратер вулкана на вертикальную плоскость по линии AB , IV — осевая линия фокального слоя. Глубина (км): 1 — $H \geq 301$; 2 — $151 \leq H < 301$; 3 — $101 \leq H < 151$; 4 — $71 \leq H < 101$; 5 — $41 \leq H < 71$; 6 — $21 \leq H < 41$; 7 — $11 \leq H < 21$; 8 — $0 < H < 11$. Энергия: 1' — $K \geq 14,5$; 2' — $13,5 \leq K < 14,5$; 3' — $12,5 \leq K < 13,5$; 4' — $11,5 \leq K < 12,5$; 5' — $10,5 \leq K < 11,5$; 6' — $9,5 \leq K < 10,5$; 7' — $8,5 \leq K < 9,5$; 8' — $0 \leq K < 8,5$

событий в год). Наиболее сильные землетрясения с $K_s \sim 12$ возникали в ноябре 1964 г. под вулканом Шивелуч на глубине 0—10 км и в 1978—1979 гг. в районе широтного разлома вдоль течения р. Камчатка на глубине 10—25 км. Достаточно сильные события с $K_s = 10 \dots 11$ отмечаются вдоль линий тектонических нарушений северо-западного простирания, выделяемых [10] на северо-восточном склоне и у юго-западного подножия вулкана Шивелуч. Особенно хорошо просматриваются цепочки эпицентров вдоль этих разломов на карте за 1971—1992 гг., составленной для глубин от -4 до 40 км по данным детальной обработки (каталог П), где нанесены все землетрясения, координаты которых удалось определить (рис. 2, а). На рис. 2, а видно, что в центральной части вулкана Шивелуч происходят преимущественно поверхностные (выше уровня моря) и неглубокие (0—10 км) землетрясения, связанные с процессами на куполе, а большинство более глубоких (10—30 км) землетрясений, причиной которых может быть как магматическая, так и тектоническая деятельность, — по его периферии. На вертикальном разрезе (рис. 2, б) в интервале глубин ~ 8 —25 км просматривается, хотя и очень неуверенно из-за малого числа событий, асейсмичная область, совпадающая с местоположением выделяемого по общим геологическим соображениям корового магматического очага [10].

Величина γ подсчитанная для коровых (0—40 км) землетрясений с $K_s > 8,5$ в районе вулкана Шивелуч по данным регионального каталога за 1965—1992 гг., составила 0,57, а по данным детального каталога для землетрясений с $K_s > 7,5$ за 1971—1992 гг. — 0,54. Оба значения несколько выше долговременной средней величины γ для всей Камчатки (0,40—0,50), т. е. в земной коре в районе вулкана Шивелуч, как и в других активных вулканических областях, преобладают относительно слабые сейсмические события.

Сопоставление деятельности вулкана Шивелуч с сейсмичностью в верхней мантии и земной коре. П. И. Токарев [21] обратил внимание на то, что в интервале ± 1 мес от начала катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. отмечалось аномальное усиление сейсмичности в верхней мантии на глубинах 80—265 км в районе Северной группы вулканов. Позднее В. А. Широковым [32, 33] показано, что возникновение выделяемых по определенной методике групп землетрясений с промежуточной глубиной очага и $K_s > 9,5$ является характерным и необходимым (но недостаточным) признаком сейсмической подготовки всех сильных (с объемом продуктов более 0,05 км³) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов. В районе Северной группы вулканов в период 1962—1993 гг. произошло пять сильных извержений (в том числе одно извержение вулкана Шивелуч в 1964 г.), каждое из которых предварялось за 1—3 мес возникновением групп землетрясений в верхней мантии.

Авторами рассмотрено изменение сейсмической активности (числа и энергии землетрясений) в верхней мантии за 1962—1992 гг. в более локальной области, на расстояниях от вулкана Шивелуч, не превышающих 40—50 км (контур К на рис. 1,а). Анализировались в основном землетрясения в интервале глубин 60—120 км, где наблюдалось наибольшее число событий с $K_s > 8,5$. На глубинах 60—105 км распределение землетрясений оказалось близким к равномерному, в то время как на глубинах 105—120 км отмечалась повышенная частота землетрясений с 1975 по 1992 г. (рис. 3,а). В этот период произошло более 85% от общего числа зарегистрированных с 1962 г. землетрясений, причем максимальная частота событий приходится на конец 1991—1992 гг. (рис. 3,а). Самое сильное ($K_s = 10,5$) и наиболее близкое к вулкану Шивелуч ($L = 15$ км) землетрясение зарегистрировано на глубине 106 км 9 июля 1979 г., т. е. примерно за год до того, как в кратере был обнаружен растущий экстрезивный купол.

Такие же зависимости построены для коровых землетрясений с $K_s > 6,5$ (контур L на рис. 2,а) по данным детального каталога для глубин -4...5 и 5—40 км (рис. 3,б и в). Напомним, что первая близкая к вулкану Шивелуч сейсмическая станция SVL начала работать с конца 1980 г., поэтому за период



Рис. 2

1971—1980 гг. приведенные на рис. 3, б и в кривые являются представительными в лучшем случае лишь для событий с $K_s > 8,0$ и по ним нельзя делать заключения о каком-либо заметном изменении сейсмической активности до начала роста экструзивного купола. Значимые изменения скорости сейсмического процесса отмечены в районе вулкана Шивелуч с 1989 г. землетрясений с $H < 5$ км (рис. 3, б) и с середины 1990 г. в интервале глубин 5—40 км (рис. 3, в). Эти выводы подтверждает и рис. 2, в, на котором показано изменение во времени глубины землетрясений для всех занесенных в каталог II событий (с $K_s > 5,0$) из района вулкана Шивелуч (контур L на рис. 2, а). Хорошо видно увеличение сейсмической активности во всем диапазоне глубин от 0 км и выше уровня моря до 25 км в 1990—1992 гг., что совпадает по времени с наблюдавшимся усилением эксплозивно-экструзивной деятельности на куполе и подтверждает предположение Е. Ю. Ждановой и С. А. Агеева об активизации более глубинных вулканотек-тонических процессов в районе вулкана [8].

Сейсмическая активность, связанная с извержением вулкана Шивелуч. *Извержение 12 ноября 1964 г.* Сведения о сейсмическом режиме вулкана Шивелуч за 1958—1970 гг. приведены в работах П. И. Токарева [21, 23]. Преобладающее количество землетрясений этого периода приходится на 1964 г. и связано с пробуждением вулкана и его катастрофическим извержением 12 ноября [21]. Основные характеристики сейсмической подготовки этого извержения описаны П. И. Токаревым. Нарастание сейсмической активности на вулкане происходило постепенно. В начале 1964 г. землетрясения возникали нерегулярно и были не сильнее восьмого энергетического класса. В мае 1964 г. на глубине 0—5 км под вулканом зарегистрирован небольшой рой землетрясений ($K_s^{max} = 9,1$). В связи с усилением сейсмичности, на основании в среднем двадцатилетней периодичности между извержениями высказано предположение о возможности извержения в ближайшие годы [20].

До середины октября землетрясения под вулканом Шивелуч происходили с интервалом от 2—3 до 25 сут. С 21 октября на сейсмостанции KLY землетрясения с $K_s > 6,0$ стали регистрироваться ежедневно, начался рой землетрясений, на кульминационной стадии развития которого произошло извержение 12 ноября (11 ноября в 19 ч 07 мин по Гринвичу). За 10 сут до начала извержения (2 ноября) в рое появились землетрясения с $K_s > 9,0$, за два дня до пароксизма — землетрясения с $K_s > 10,0$. С 10 ноября началось резкое увеличение скорости и мощности сейсмического процесса. Самое главное землетрясение произошло 11 ноября в 19 ч 06 мин непосредственно перед началом извержения и было, по мнению П. И. Токарева, связано с разрушением лавовой пробки в верхней части канала вулкана. Землетрясение имело сдвиговый характер, радиус очага достигал 3100 м [9, 21]. Извержение, продлившееся немногим более часа, сопровождалось непрерывным вулканическим дрожанием. Средняя амплитуда дрожания на станции KLY в течение ~20 мин (19 ч 48 мин — 20 ч 17 мин) достигала 5 мкм. После прекращения извержения рой землетрясений продолжался еще ~5 сут, но энергия землетрясений уменьшилась на 4—5 порядков. Глубина очагов землетрясений, предвалявших и сопровождавших извержение, не превышала 10 км и в большинстве случаев была 0—5 км. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений с $K_s > 9,0$, выделившаяся в процессе подготовки извержения со 2 по 11 ноября, составила 6×10^{12} Дж [24]. Величина угла наклона кривой повторяемости изменялась от 0,6—0,5 в начале роя до 0,3 и менее

Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений с $K_s > 6,5$ и $H = -4...40$ км за 1971—1992 гг. (а), вертикальный разрез по линии АВ (б) и распределение по времени глубины очагов коровых землетрясений в районе вулкана Шивелуч 01.1971—07.1992 г. в контуре L (в). Штриховкой показана область предполагаемого корового магматического очага. Глубина (км): 1 — $H > 40$; 2 — $30 < H < 40$; 3 — $20 < H < 30$; 4 — $15 < H < 20$; 5 — $10 < H < 15$; 6 — $5 < H < 10$; 7 — $0 < H < 5$; 8 — $(-5) < H < 0$. Энергия: 1' — $K > 11,5$; 2' — $10,5 < K < 11,5$; 3' — $9,5 < K < 10,5$; 4' — $8,5 < K < 9,5$; 5' — $7,5 < K < 8,5$; 6' — $6,5 < K < 7,5$; 7' — $5,5 < K < 6,5$; 8' — $0 < K < 5,5$

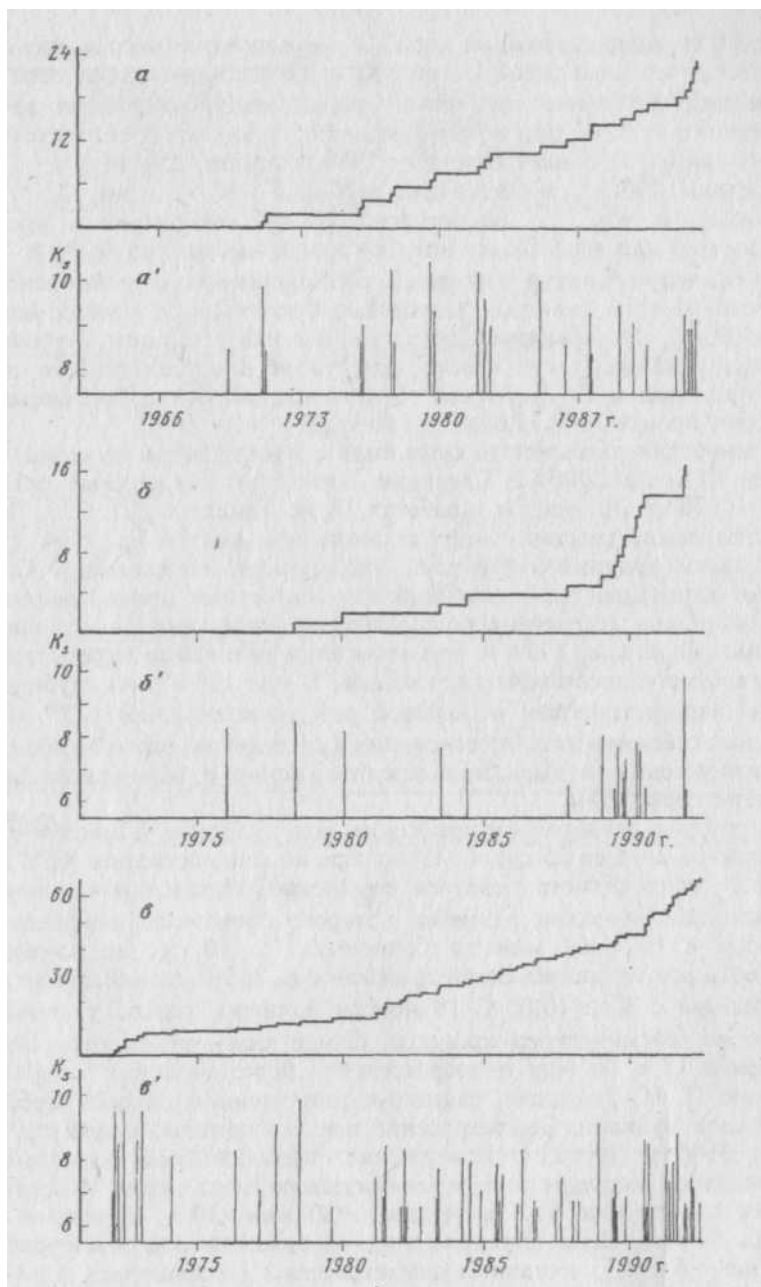


Рис. 3. Изменение числа землетрясений в день (а–в) и энергии землетрясений (a' – v') в районе вулкана Шивелуч с $K_s > 8,5$ на глубинах 105–120 км (а, a') и с $K_s > 6,5$ на глубинах $H = -4...5$ (б, b') и 5–40 км (в, v')

накануне извержения, что свидетельствовало о быстром нарастании давления под вулканом [25]. Сразу после извержения с 12 по 16 ноября параметр γ был равен 0,99, а за период с 16 ноября по 31 декабря 1964 г. он составил 0,52, что близко к долговременным средним для района Северной Камчатки значениям.

В последующие после извержения годы (1965–1970 гг.) уровень сейсмичности на вулкане Шивелуч был невысоким, неглубокие вулканические землетрясения, которые, возможно, сопровождали фумарольную деятельность из вновь образо-

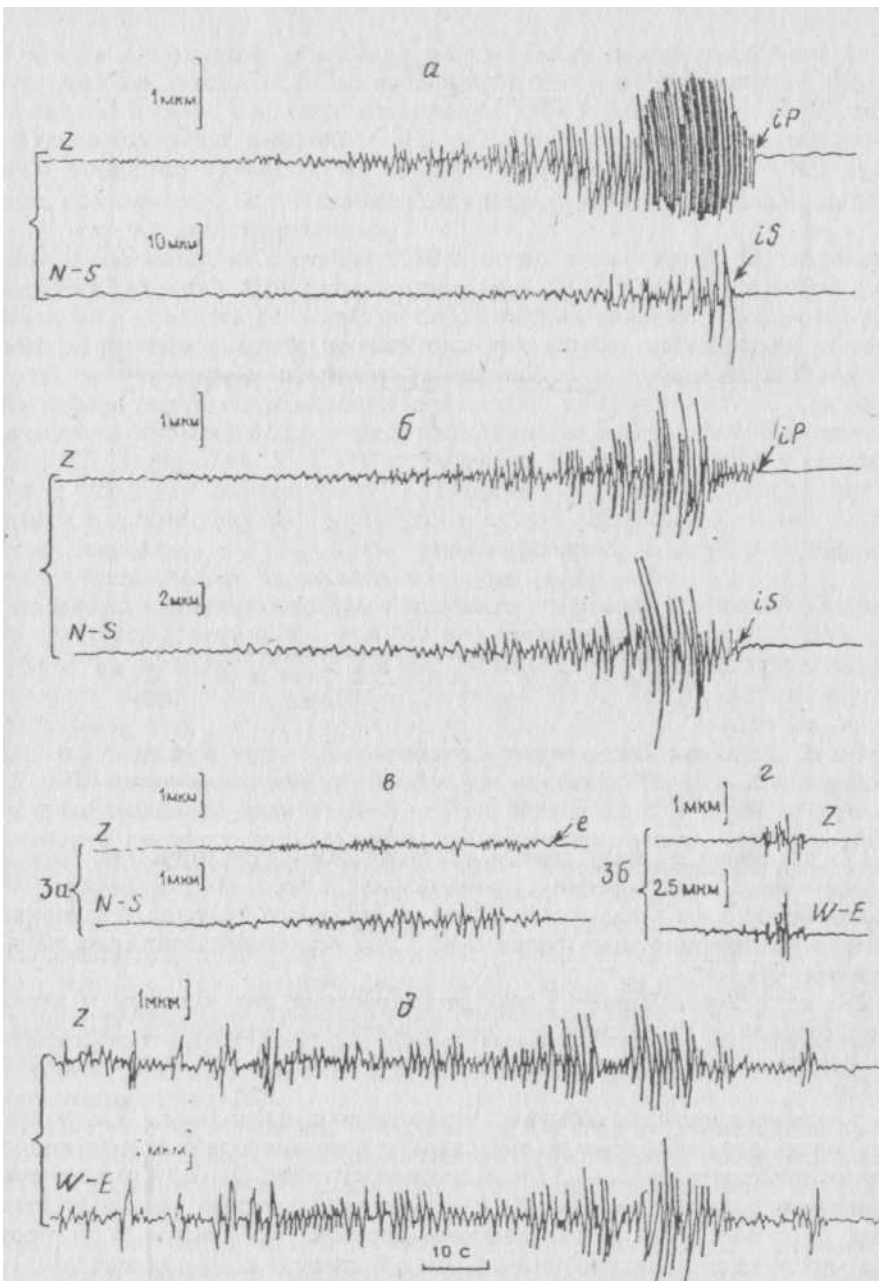


Рис. 4. Образцы записи различных типов вулканических землетрясений на PTC SVL: а — тип 1, б — тип 2, в, г — тип 3, д — тип 4. Пояснения см. в тексте

ванного взрывами кратера, если и происходили, то были слишком слабыми и не регистрировались сейсмостанциями на расстоянии 45 км и более. Единичные землетрясения с $K_s > 7,5$ возникали на глубинах 5–30 км у восточного и южного подножий вулкана (рис. 2,а).

Экструзивно-эксплозивная активность купола в кратере вулкана Шивелуч, 1980–1994 гг. Типы вулканических землетрясений (ВЗ). Наблюдения на открытых вблизи вулкана PTC, SVL и KPL использованы для классификации регистрируемых сейсмических событий [7]. По характеру записи, локализации очагов и связи с вулканической активностью выделено четыре основных типа ВЗ (рис. 4).

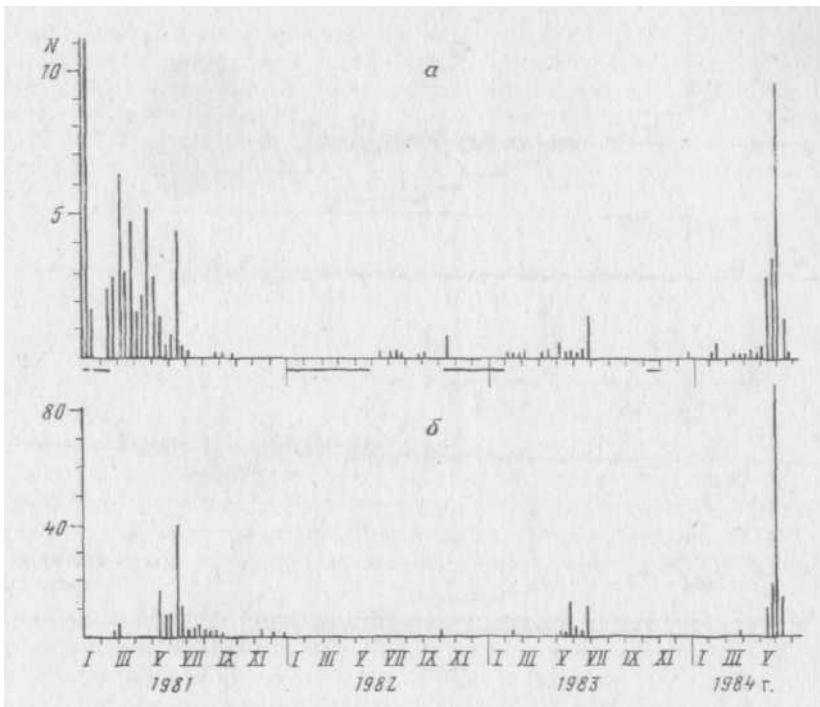


Рис. 5. Подекадное изменение числа вулканических землетрясений типов 2 и 3а (а) и 3б (б) с $A^{\max} > 0,2$ мкм и $5 - P < 5,2$ с, зарегистрированных РТС SVL за период с 1981 по 30 июня 1984 г.

Тип 1 — подобные по виду записи тектоническим вулканические (или вулканотектонические) землетрясения, происходящие в пределах постройки вулкана на глубинах более 5 км в радиусе ~ 20 км от активного кратера, генерирующие относительно высокочастотные (более 2—2,5 Гц) колебания с четкими первыми вступлениями.

Тип 2 — неглубокие (менее 5 км) землетрясения под куполом и вулканической постройкой с интенсивными поверхностными волнами и зачастую нечеткими вступлениями объемных волн, средне- (1,5—2 Гц) и низкочастотные (0,5—1 Гц).

Тип 3 — поверхностные события, возникающие на куполе. В эту группу включены очень разнообразные по виду записи и по природе сейсмические колебания, от низкочастотных (1—1,5 Гц) и среднечастотных (2—2,5 Гц) с нечеткими вступлениями и большой (~ 70 —100 с) продолжительностью записи до высокочастотных (3 и более Гц) с импульсными первыми вступлениями и короткой (20—30 с) продолжительностью записи. Эти события связаны с процессами роста в разрушения купола (с выбросами пепла и пара, газовыми продувками, каменными лавинами, обрушениями, пирокластическими потоками и т. д.); условно они разделены на два больших подтипа: 3а — низкочастотные (0,5—1 Гц) и 3б — высокочастотные события (рис. 3, в и г соответственно); для более подробного деления нужны более детальные визуальные и сейсмологические наблюдения.

Тип 4 — вулканическое дрожание (ВД): низкочастотные колебания продолжительностью от нескольких минут до нескольких суток, сопровождающие выбросы-продувки газопирокластического материала; нередко, как и на вулкане Безымянный [31], ВД на вулкане Шивелуч включает в себя следующие друг за другом землетрясения типов 2 и 3а, образуя спазматическое ВД с резко меняющейся амплитудой колебаний. Необходимо иметь в виду, что разделение землетрясений по типам не всегда может быть проведено четко и содержит достаточно много неопределенностей.

Сейсмическая активность. После почти месячного перерыва в визуальных наблюдениях из-за неблагоприятных метеоусловий, во второй половине августа 1980 г. в кратере извержения 1964 г. неожиданно обнаружен новый экструзивный купол высотой — 100 м. Никакого изменения сейсмичности в земной коре под вулканом по крайней мере на уровне $K_s > 8,0..8,5$ в этот период не отмечено. Более слабые сейсмические события на ближайшей станции ($A = 46$ км) не регистрировались.

Во второй половине сентября 1980 г. по предложению П. П. Фирстова в 8 км от кратера вулкана Шивелуч установлена РТС SVL, на которой, хотя и с перерывами, началась регистрация сейсмических явлений, сопровождавших рост купола. В течение месяца проводились визуальные наблюдения за состоянием купола, где в это время происходило выжимание и обрушение отдельных блоков и обелисков, часто сопровождавшееся сходом каменных лавин. Среди местных сейсмических событий в этот период регистрировались главным образом неглубокие слабые ВЗ типов 2 и 3. С 17 октября по 31 декабря 1980 г. отмечено два периода усиления сейсмической активности — в середине ноября (до 60 ВЗ в сутки) и в конце декабря (до 100 ВЗ в сутки). Наиболее сильные и продолжительные сигналы (тип 3а) прямо коррелировались с лавинами обрушения на куполе, предвзявля их за несколько секунд [13].

На рис. 5 приведены графики подекадного изменения числа ВЗ типов 2, 3а и 3б с $A^{max} > 0,2$ мкм и $S - P < 5,2$ с, зарегистрированных РТС SVL за период с 1981 г. по 30 июня 1984 г. На рис. 6 видно, что максимальная сейсмическая активность наблюдалась в первой половине 1981 г., когда средняя скорость роста купола была еще достаточно большой (0,8 м/сут). С января по май 1981 г. преобладали неглубокие низко- и среднечастотные ВЗ типов 2 и 3а с $S - P$ от 1 до 5 с. В мае — июне 1981 г. появились высокочастотные землетрясения типа 3б с преобладающей величиной $S - P$ от 0,5 до 2,5 с; многие из этих событий, по мнению авторов, были вызваны обвалами на куполе, стенках кратера и в каньоне, образованном извержением 1964 г., а также обвалами вблизи РТС SVL.

По материалам двух близких к вулкану РТС SVL и KPL (каталог III) проведено сопоставление временного хода различных типов ВЗ с визуально наблюдавшимися эпизодами активности купола. Установлено, что во время выбросов пепла и пара, взрывов, свечения на куполе на обеих РТС в 95% случаев регистрировались землетрясения с глубиной очага менее 4—5 км (тип 2) и серии поверхностных низкочастотных землетрясений (тип 3а), переходившие в спазматическое ВД [30]. Иногда к этим событиям добавлялись высокочастотные землетрясения (тип 3б).

Землетрясения с глубиной очага более 5 км (тип 1) происходили значительно реже и не обнаруживали прямой зависимости от внешних проявлений активности купола. Сейсмический фон, создаваемый этими землетрясениями в период с 1983 г. по 31 марта 1992 г., по данным РТС SVL, составлял в среднем от 1 до 3 событий в месяц (с $A^{max} > 0,2$ мкм и $S - P < 5,2$ с) и лишь в — 10% случаев достигал 5—10 землетрясений в месяц (рис. 6). Не исключено, что по крайней мере часть зарегистрированных землетрясений типа 1 связана с процессами в более глубоких частях питающей магматической системы вулкана, однако статистика этих землетрясений за рассматриваемый период наблюдений мала.

Кроме землетрясений типа 1, на рис. 6 показано изменение во времени месячного числа ВЗ типов 2, 3а и 3б, а также суммарной за месяц продолжительности спазматического ВД. На основании имеющихся данных для каждого года наблюдений рассчитаны среднемесячные за год значения числа сейсмических событий и суммарной продолжительности ВД, их энергетические характеристики (K_s^{max} и A^{max}) для всех типов, зарегистрированных РТС SVL (рис. 7). Для неглубоких ВЗ типа 2 после 1984 г. наблюдалось постепенное возрастание сред-негодového числа событий в месяц и увеличение энергии наиболее сильных землетрясений до $K^{max} = 7..8$ в 1988—1991 гг. по сравнению с предыдущими

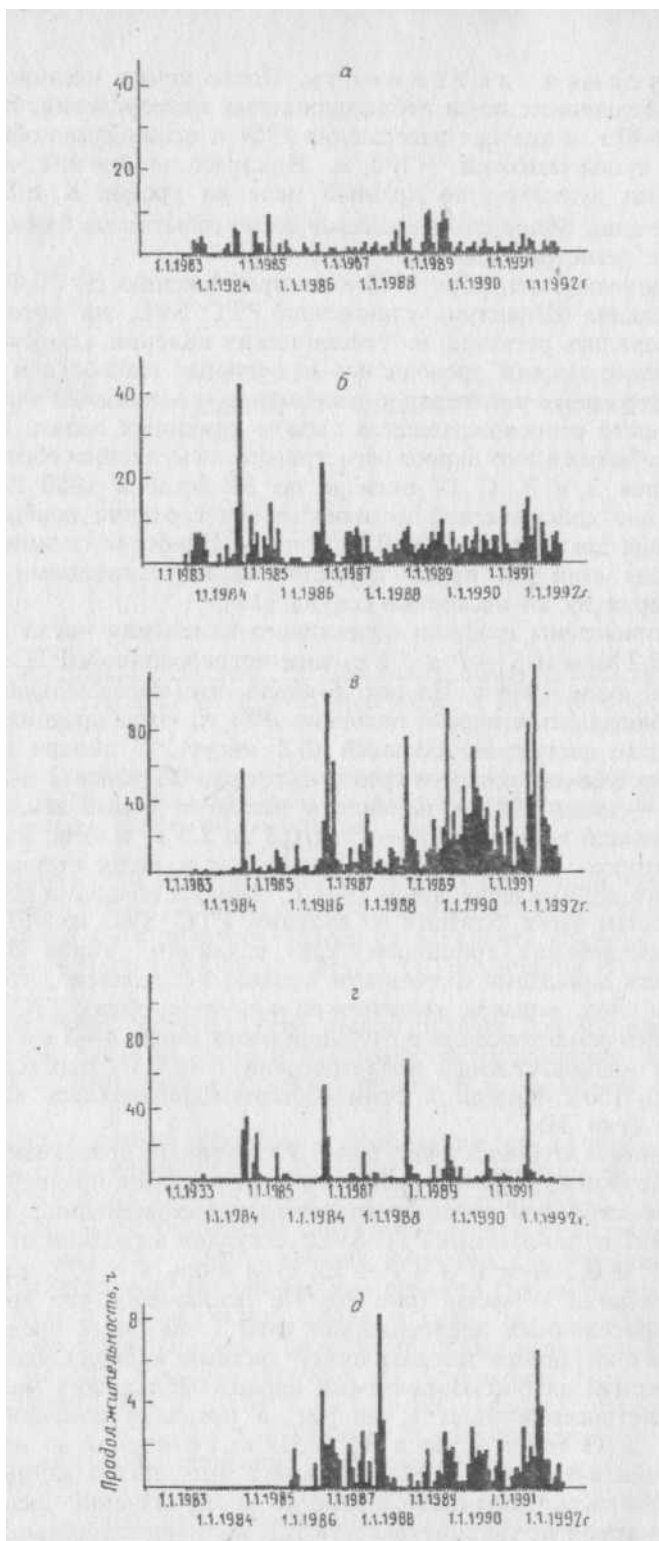


Рис. 6. Изменение числа вулканических землетрясений в месяц типов 1–3 (*a*–*z*) и суммарной за месяц продолжительности спазматического вулканического дрожания (*d*) по данным PTC SVL за период 1983 г.– 31 марта 1992 г. Тип землетрясения: *a* – 1, *b* – 2, *v* – 3а, *z* – 3б

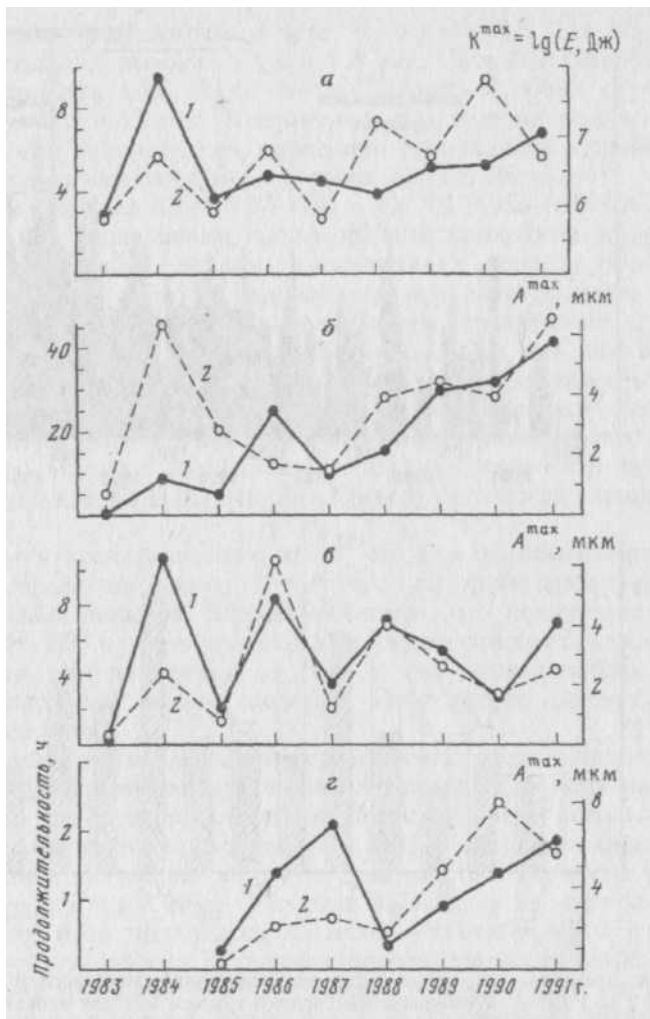


Рис. 7. Изменение среднегодовых значений числа землетрясений в месяц типов 2, 3а и 3б (а — в соответственно, кривые 1), продолжительности ВД (в, кривая 1) и величин K_s^{\max} и A^{\max} (2) по данным РТС SVL

1983—1987 гг. ($K^{\max} = 6..7$). Одновременно к концу 1991 г. заметно возросли число и энергия низкочастотных поверхностных ВЗ (тип 3а) и увеличились суммарная продолжительность и энергия спазматического ВД. Таким образом, можно отметить общую тенденцию возрастания сейсмической активности на вулкане Шивелуч, отражающую усиливающиеся эксплозивно-экструзивные процессы на куполе.

Почти все выделенные на вулкане Шивелуч типы землетрясений прямо связаны с ростом (глубинная магматическая активность) и сопутствующим ему разрушением (приповерхностная активность) экструзивного купола. Следовательно, слежение за изменением числа и энергии ВЗ как каждого типа в отдельности, так и всех вместе (а именно такую обобщенную картину получаем, ведя оперативные наблюдения) позволяет осуществлять контроль за сейсмическим режимом вулкана и делать прогнозные оценки его деятельности.

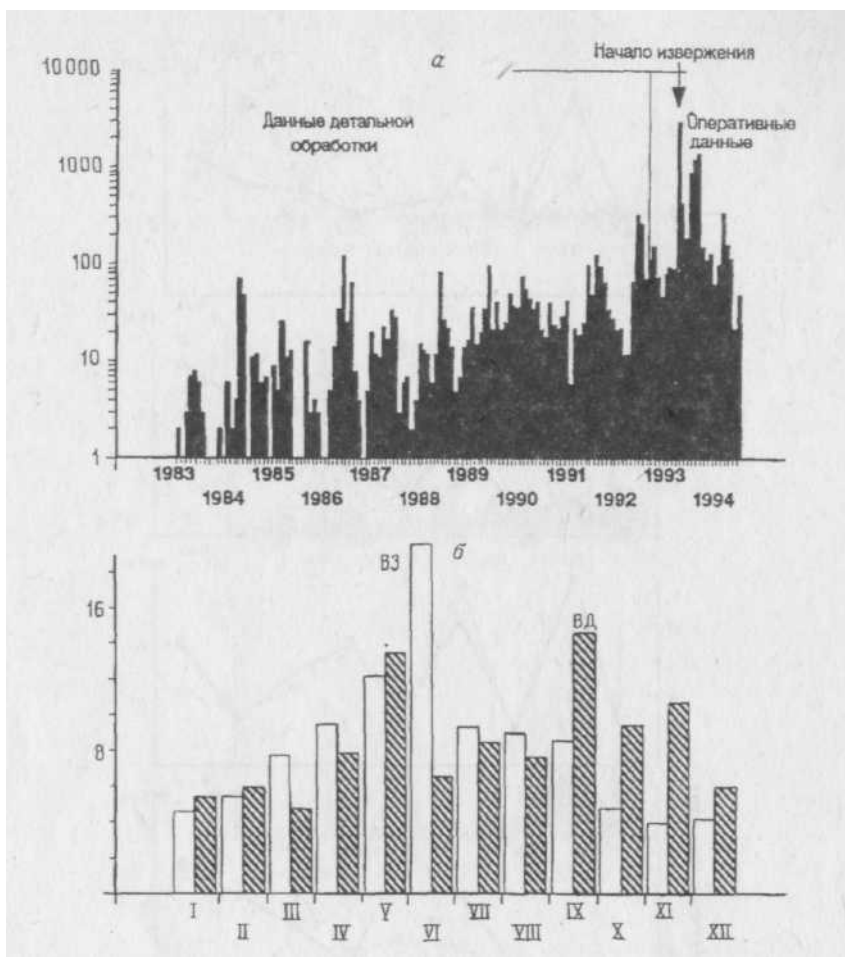


Рис. 8. Временные вариации числа вулканических землетрясений в месяц типов 2 и 3 (а) и нормированный средний годовой ход для вулканических землетрясений (ВЗ) и вулканического дрожания (ВД) (б)

На рис. 8,а приведено изменение месячного числа ВЗ типов 2—3 за период 1983 г.— 31 июля 1994 г., при построении которого до 31 марта 1994 г. использовались детальные, а с 1 апреля 1992 до 21 июля 1994 г.— оперативные данные, полученные на РТС SVL.

Как и на рис. 6 и 7, на рис. 8, а видна тенденция к усилению сейсмической активности со временем. В связи с наличием линейного тренда и значительными вариациями месячных значений рассматриваемых параметров (рис. 6—8), для исследуемых временных рядов ВЗ и ВД применена процедура нормирования месячных значений p_{ij} (i — номер месяца внутри года, j — номер года) параметров внутри годовых интервалов и в дальнейшем анализировались выраженные в процентах величины λ_{ij} :

$$\lambda_{ij} = \left(p_{ij} / \sum_{i=1}^{12} p_{ij} \right) \cdot 100\%.$$

Для вариаций нормированных месячных чисел ВЗ (типы 2 и 3а; рис. 9,а) и длительности ВД (рис. 10, а) по методике работы [1] для диапазона периодов

2—30 мес построены периодограммы (рис. 9, б и 10, б). Для ВЗ имеют место два значимых пика с периодами 12,5 и 9,8 мес. Для ВД главные максимумы соответствуют периодам 14,5; 11,6; 8,9 и 7,7 мес. В обоих случаях главный максимум лежит вблизи 12 мес. Несомненно, что этот максимум соответствует годовой цикличности сейсмических процессов, которая для вулканических землетрясений Камчатки выявлена в ряде работ [3, 15, 26 и др.].

Средний годовой ход для ВЗ (1983—1994 г.) и ВД (1985—1994 г.) представлен на рис. 8, б. Для ВЗ подавляющее число событий приходится на внутригодовой интервал апрель — сентябрь с главным максимумом в июне. Здесь эффект значим с уровнем доверия 0,99. Для ВД годовой ход проявляется менее отчетливо. В период апрель — ноябрь длительность дрожания в 1,5 раза больше, чем в остальные 4 мес. Существенно, что начальные фазы максимумов как для ВЗ, так и для ВД приходятся на апрель, что указывает на взаимосвязанность исследуемых параметров. По аналогии с работой [26], где анализировался годовой ход вулканических землетрясений Авачинского вулкана (для них наиболее ярко выражен летний максимум) можно с достаточной долей определенности связывать выявленный годовой ход для ВЗ и ВД вулкана Шивелуч с годовой вариацией скорости вращения Земли.

Можно обратить также внимание на то, что для ВД обнаруживается широко известный чандлеровский период $T = 14$ мес, который связан со свободными колебаниями земных полюсов. Вполне возможно, что повышение в среднем из года в год числа ВЗ и их максимальных энергетических классов связано с закономерностями изменяющихся из года в год характеристик свободных и вынужденных колебаний земных полюсов. Этот вопрос требует специального отдельного рассмотрения.

Полученные результаты позволяют перейти к построению прогнозных моделей исследуемых рядов на основе использования главных спектральных пиков по методике работы [1]. Для простоты выбраны модели с использованием двух главных максимумов на периодограммах ВЗ и ВД. Реальные и модельные кривые для ВЗ и ВД дают достаточно хорошую сходимость. Рассчитан также прогноз до конца 1995 г. (рис. 9, а и 10, а). Для ряда ВЗ ближайшее по времени усиление активности по прогнозу приходится на июнь — сентябрь 1995 г., а для ВД — на май 1995 г., что указывает на повышенную вероятность слабой активизации вулкана во второй половине 1995 г. Следует отметить, что по долгосрочному прогнозу, основанному на изучении связи извержений с 19-летним лунным циклом, в 1995—1996 гг. сильные извержения (с объемом продуктов $> 0,05 \text{ км}^3$) на Камчатке не ожидаются [33].

О прогнозе извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. В связи с усилением в начале 1993 г. активности вулканов Северной группы в Институте вулканической геологии и геохимии (ИВГиГ) ДВО РАН приказом директора Б. В. Иванова в конце марта была создана группа по слежению за деятельностью вулканов в составе И. Т. Кирсанова, Ю. Б. Слезина и В. А. Широкова — руководителя группы. Основной задачей ее был ежедневный сбор и анализ комплексной информации о состоянии вулканов. Предварительная обработка оперативных данных о вулканических землетрясениях осуществлялась В. Т. Гарбузовой с запаздыванием относительно времени возникновения событий не более 36 ч. Информация передавалась по данным Ключевского куста сейсмостанций. Данные визуальных наблюдений поступали из г. Ключи от Е. Ю. Ждановой.

При изучении сейсмического режима вулканов проводился оперативный анализ изменений во времени следующих параметров, используемых в прогнозных целях: 1) суточного числа ВЗ, регистрируемых в радиусе до 20 км от вулканического центра; 2) суточного значения K^{\max} ВЗ; 3) координат гипоцентров ВЗ; 4) средних и максимальных значений амплитуд ВД, его суммарной длительности в течение суток; 5) групп землетрясений с промежуточной глубиной очагов, регистрируемых на эпицентральных расстояниях до 150 км от вулкана.

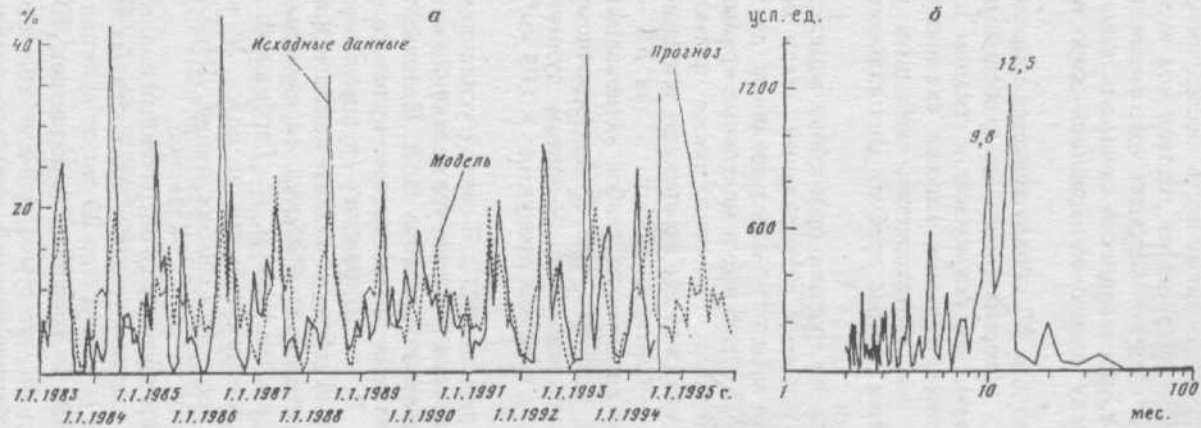


Рис. 9

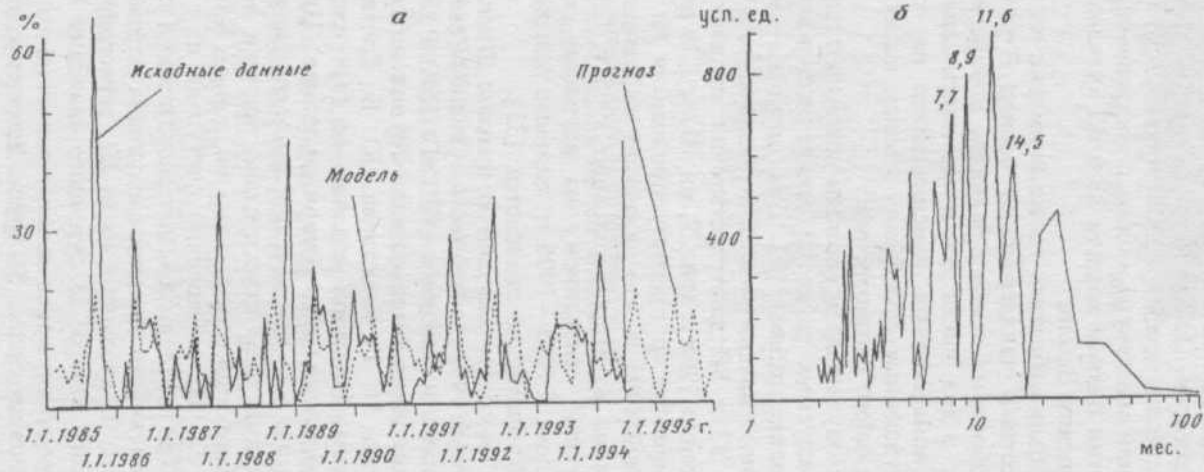


Рис. 10

Рис. 9. Нормированный в годовых интервалах график числа вулканических землетрясений за месяц типов 2 и 3а и сезонная модель (а); б — периодограмма с указанием периодов спектральных максимумов

Рис. 10. Нормированный в годовых интервалах график продолжительности вулканического дрожания за месяц и сезонная модель (а); б — периодограмма с указанием периодов спектральных максимумов

Распределение во времени числа N вулканических землетрясений с $A^{max} > 0,2$ мкм по данным ближайшей к вулкану Шивелуч ($D = 8$ км) сейсмостанции SVL за период 1—30 апреля 1993 г.

Дата	N	Дата	N
1—2	18	17—18	262
3—4	35	19—20	467
5—6	97	21—22	>400
7—8	147	23—24	25
9—10	327	25—26	72
11—12	372	27—28	63
13—14	425	29—30	19
15—16	384		

При анализе сейсмичности в районе Северной группы вулканов ($55,5—57,0^\circ$ с. ш.) на глубинах 70—300 км за период январь 1989 — март 1993 г. выявлена повышенная группируемость событий с $K_S > 8,5$ во втором полугодии 1992 г. (плотность событий вдвое выше средней), что могло рассматриваться как возможный среднесрочный предвестник сильного извержения [33]. В январе 1993 г. стали регистрироваться непродолжительные группы ВЗ в районе вулкана Шивелуч. На записях РТС SVL ($A = 8$ км) уверенно регистрировались землетрясения с $A^{max} > 0,2$ мкм. Отмечено 63 события 5—16 января и 38 — в период 25—31 ян-варя ($K^{max} < 7,0$). Появление двух слабых роев в районе активного купола могло быть связано со сбросом давления в мантийном магматическом очаге за счет механизма передачи давления по системе подводных каналов в коровый близ-поверхностный магматический очаг. В дальнейшем, в феврале — марте происходило от 20 до 46 землетрясений за декаду. Начиная с 1 апреля количество ВЗ стало почти непрерывно возрастать вплоть до середины апреля, что следует из таблицы. С 5 по 15 апреля почти непрерывно возрастала интенсивность спазматического ВД, которое стало существенной помехой при регистрации ВЗ типов 1—3. Ошибка в определении числа ВЗ могла превышать 30%.

Наиболее сильные события начавшегося в апреле 1993 г. роя ВЗ регистрировались 3—5 станциями Ключевского куста. Для многих из них определялись координаты гипоцентров. Основное количество землетрясений регистрировалось в круге радиуса 5 км от вершины экстрезивного купола. Глубина очагов в подавляющем большинстве случаев не превышала 3 км. Значения разности прихода S - и P -волн землетрясений, регистрировавшихся только ближайшей к куполу ЗТС SVL, варьировали в небольших пределах. С 1 по 15 апреля ежесуточные значения K^x вулканических землетрясений изменялись от 4,0 до 8,0.

По визуальным данным, с начала апреля резко возросло количество взрывов в районе активного купола. Высота газопепловых выбросов над кратером достигала в отдельных случаях 3 км. Заметно расширилась область, в пределах которой наблюдались взрывы.

Необходимо указать, что в соответствии с долгосрочным прогнозом сильных камчатских извержений [33] вероятность сильного извержения в 1993 г. по сравнению с 1992 г., возросла почти на порядок, что учитывалось при комплексном анализе получаемой информации.

Основываясь на приведенных выше данных, по состоянию на 8 апреля был сделан вывод о возможности сильного извержения вулкана Шивелуч, что согласовывалось с методикой комплексного прогноза [33]. После обсуждения полученной к 8 апреля информации с директором ИВГиГ Б. В. Ивановым было принято решение отправить телефонограммы официальным органам власти по трем

адресам, так как в связи с ожидающимся извержением район вулкана в радиусе 15 км был объявлен зоной повышенной вулканической опасности. Первая телефонограмма была отправлена 8 апреля, вторая — 14 апреля. Во второй телефонограмме подтверждался ранее сделанный прогноз.

Поскольку для извержений такого типа ранее прогноз не проводился, конкретная дата возможного извержения не была указана, т. е. давался прогноз события с открытой датой, что в данном конкретном случае представлялось целесообразным.

Пароксизмальный взрыв произошел в 13 ч 16 мин местного времени 21 апреля 1993 г. [30]. Через час по тем же трем адресам была отправлена третья телефонограмма, в которой давались рекомендации для принятия мер по безопасности населения. Следует отметить, что извержение 1993 г. не относится к разряду сильных, так как объем изверженных вулканических продуктов менее 0,50 км³.

О системе магматического питания вулкана Шивелуч. В истории развития вулканического центра Шивелуч, как показано в работе [11], существовало два этапа: первый — образование стратовулкана мантийного питания с преобладанием лав основного состава (Старый Шивелуч); второй — формирование молодой вулканической постройки, источником питания которой явился коровый очаг андезитовой магмы, сохраняющий, судя по петролого-геохимическим особенностям продуктов извержений, связь с мантийными «корнями». Периодическая «подпитка» корового очага мантийным материалом приводит в конечном счете к извержениям.

Сейсмологические данные, приведенные в настоящей работе, позволяют сделать ряд заключений, уточняющих и дополняющих представления о системе магматического питания и деятельности вулкана Шивелуч. В результате детальных сейсмологических исследований на Камчатке выявлена связь вулканизма с процессами, происходящими в сейсмофокальном слое на глубинах 100—200 км. Предполагается, что на этих глубинах под поясом действующих вулканов Камчатки должна располагаться верхняя кромка области выплавления первичных магм [22, 27]. Непосредственно под вулканом Шивелуч на глубинах более 50 км сейсмофокальный слой обрывается. Землетрясения с $M_s > 8,5$ на глубинах 70—200 км происходят на расстояниях более 10—15 км к югу от вулкана (рис. 1, а и в) и предположительно оконтуривают южную границу возможной зоны магматического питания.

Данные о геометрии сейсмофокального слоя (рис. 1, б) и взаимосвязи сейсмичности верхней мантии на глубинах 105—120 км с извержениями вулкана Шивелуч (рис. 3, ф) могут рассматриваться как свидетельство того, что магматическая подпитка вулкана осуществляется с глубин не менее 90—120 км. Активные сейсмотектонические подвижки вблизи области мантийного питания вулкана могут приводить к повышению давления в этой области, которое затем через систему подводящих каналов и (или) промежуточных очагов в земной коре может передаваться в близповерхностный (периферический) магматический очаг.

По такой схеме, вероятно, происходила подготовка катастрофического извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. Как известно, рой землетрясений в земной коре, предвращавший извержение, развивался на фоне начавшегося за месяц до него усиления сейсмической активности в верхней мантии под Северной группой вулканов. После извержения 1964 г., в 1965—1974 гг., когда вулкан Шивелуч находился в спокойном состоянии, уровень сейсмичности на глубинах 105—120 км под вулканом был минимален (3 землетрясения с $M_s > 8,5$ за 10 лет). В 1975—1992 гг. наблюдалось заметное усиление сейсмической активности на этих глубинах. Землетрясения происходили в среднем равномерно (21 событие за данный период). Это свидетельствовало о начавшейся «подпитке» корового магматического резервуара из области магматических «корней» в верхней мантии, что привело в итоге к продолжительному экструзивно-эксплозивному извержению.

Вопрос о том, где расположен основной магматический резервуар («отстойник») под вулканом Шивелуч, в настоящее время остается открытым и требует прямых

геофизических исследований. В качестве одного из возможных вариантов можно согласиться с представлениями Б. В. Иванова [10, 11] о том, что такой очаг находится в средних и нижних горизонтах земной коры (на глубинах 10—30 км). Распределение коровых землетрясений под вулканом Шивелуч за 1971—1992 гг. в пространстве (рис. 2, в) и во времени, в ходе нарастающей активности купола (рис. 3, б и в) не противоречит этому предположению. Усиление экструзивно-эксплозивной деятельности вулкана предваряется и сопровождается увеличением сейсмической активности как непосредственно под куполом, так и в зонах коровых разломов северо-западного простирания, проходящих через северо-восточный склон и юго-западное подножие вулкана.

Исходя из высказанных представлений о магматическом питании вулкана Шивелуч, можно сделать заключение о возможных путях развития вулкана в ближайшем будущем. Если в течение нескольких (3—5) лет сейсмическая активность в районе вулкана на глубинах 105—120 км заметно снизится, это должно привести в конечном счете к ослаблению вулканической деятельности, связанной с ростом купола, и наоборот, сохранение высокого уровня сейсмичности на этих глубинах или ее дальнейший рост будут способствовать возникновению в будущем более сильных эксплозивно-экструзивных извержений.

Выводы. На основании изучения пространственно-временного распределения тектонических и вулканических землетрясений в районе вулкана Шивелуч за период 1962—1994 гг., анализа взаимосвязи коровой и мантийной сейсмичности с вулканической активностью, описания и анализа сейсмической подготовки извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. получены следующие результаты.

1. Пространственно-временное распределение очагов землетрясений и их связь с вулканической деятельностью подтверждают петролого-геохимические представления о мантийно-коровом питании вулкана Шивелуч. Предполагается, что северное окончание фокального слоя Камчатки, обрывающееся на глубинах 70—150 км под южным подножием вулкана Шивелуч, оконтуривает южную границу возможной зоны магматического питания в верхней мантии. На основании выявленной взаимосвязи сейсмичности на глубинах 105—120 км с фазой экструзивного извержения вулкана (1980—1994 гг.) показано, что мантийная «подпитка» вулкана осуществляется с глубин не менее 100 км. Заметные изменения уровня сейсмичности на глубинах 105—120 км в районе вулкана должны влиять на усиление или ослабление его вулканической активности.

2. Впервые непосредственно для района вулкана Шивелуч изучена конфигурация сейсмофокального слоя на глубинах до 200 км. Показано, что угол падения фокального слоя для глубин 50—100 км такой же, как для Камчатки в среднем ($\alpha = 50^\circ$) [22, 27]; глубже 100 км угол $\alpha = 68^\circ$.

3. Уточнена и дополнена классификация типов вулканических землетрясений, регистрируемых в районе вулкана Шивелуч в процессе начавшейся в 1980 г. и продолжающейся до настоящего времени экструзивно-эксплозивной деятельности. Показано, что с помощью слежения за изменением числа и энергии вулканических землетрясений как каждого типа в отдельности, так и их совокупности можно вести контроль за сейсмическим режимом вулкана и делать прогнозные оценки его деятельности.

4. Отмечена общая долговременная (1983—1994 гг.) тенденция к возрастанию сейсмической активности на куполе, продолжающаяся и после извержения 21 апреля 1993 г.

5. Описан методический подход, использованный при успешном прогнозе извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г., наиболее сильном событии после катастрофического извержения вулкана в ноябре 1964 г. При пароксизмальной фазе извержения 21 апреля 1993 г. пирокластические и грязевые потоки имели протяженность 15—20 км. Прогноз по комплексу данных был оформлен в виде двух телефонограмм, направленных в адрес официальных органов власти Камчатской области и г. Ключи за 13 и 7 сут до начала извержения. Рекомендовалось

покинуть зону вулканической опасности и прекратить любые работы на расстоянии до 15 км от активного купола вулкана Шивелуч.

6. Сделан среднесрочный прогноз возможного усиления активности вулкана, в соответствии с которым ближайший по времени активный период соответствует второму полугодью 1995 г.

Авторы благодарят Б. В. Иванова и Ю. А. Тарана за полезную дискуссию, В. А. Гаврилова, Е. Ю. Жданову, И. Т. Кирсанова и Ю. Б. Слезина за помощь при выполнении работы, а также сотрудников ОМСП, принимавших участие в получении и первичной обработке данных.

Работа выполнена в ходе исследований по теме ГНТП РФ № 18 (проект 2.3.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
2. Гаврилов В. А., Воропаев В. Ф., Головщикова И. А. и др. Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2//Сейсмические приборы. 1987. № 19. С. 5—17.
3. Горельчик В. И. О регистрации слабых вулканических землетрясений в районе Авачинского вулкана//Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 9—21.
4. Горельчик В. И., Степанов В. В. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971—1972 гг.//Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевой группы вулканов. Владивосток: Наука, 1976. С. 108—118.
5. Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч//Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3—37.
6. Двигалю В. Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980—1981 г. по фотограмметрическим данным//Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104—109.
7. 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. № 3. С. 3—20.
8. Жданова Е. Ю., Агеев С. А. Оживление вулканической деятельности в кратере вулкана Шивелуч//Вулканология и сейсмология. 1994. № 4—5. С. 215—217.
9. Зобин В. М. Механизм вулканических землетрясений, связанных с извержением вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г.//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 3. С. 31—36.
10. Иванов Б. В. Некоторые особенности вулканизма Ключевой группы вулканов в связи с ее глубинным строением//Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевой группы вулканов. Владивосток: Наука, 1976. С. 52—61.
11. Иванов Б. В. Типы андезитового вулканизма Тихоокеанского подвижного пояса. М.: Наука, 1990. 213 с.
12. Иванов Б. В., Андреев В. Н., Богоявленская Г. Е. и др. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1981 г.//Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 103—108.
13. Иванов Б. В., Чирков А. М., Дубик Ю. М. и др. Состояние действующих вулканов Камчатки и Курильских островов в 1980 г.//Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 99—104.
14. Кирсанова Т. П., Вергасова Л. П., Юрова Л. М., Таран Ю. А. Фумарольная активность вулканов Шивелуч и Кизимен в 1979—1980 гг.//Вулканология и сейсмология. 1985. № 3. С. 33—42.
15. Кузьмин Ю. Д., Широков В. А. О влиянии космических факторов на сейсмичность и вулканизм Камчатки//Вопросы географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1990. Вып. 10. С. 90—98.
16. Меньшиков А. А. Вулкан Шивелуч — его геологическое строение, состав и извержения//Тр. Лаб. вулканологии АН СССР. 1955. Вып. 9. 256 с.
17. Поляк Б. Г., Мелекесцев И. В. Продуктивность вулканических аппаратов//Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22—37.
18. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. Избр. тр. М.: Наука, 1985. 408 с.
19. 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. № 2. С. 50—63.

20. *Токарев П. И.* Рой землетрясений вулкана Шивелуч в мае 1964 г.//Бюл. вулканол. станций. 1964. № 38. С. 41—44.
21. *Токарев П. И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11—12.
22. *Токарев П. И.* Сейсмическая активность фокального слоя Камчатки и ее связь с вулканизмом//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 166—176.
23. *Токарев П. И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
24. *Токарев П. И.* Прогноз места, времени, энергии и опасности больших взрывов андезитовых вулканов//Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. Докл. на 27-м Междунар. геолог. конгр. в Москве 4—14 авг. 1984 г. М.: Наука, 1984. Т. 6. С. 66—81.
25. *Токарев П. И., Горельчик В. И.* Сейсмический режим вулканов и прогноз извержений//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 164—166.
26. *Токарев П. И., Широков В. А.* Состояние и сейсмический режим Авачинского вулкана в 1971—1975 гг.//Бюл. вулканол. станций. 1977. № 5. С. 46—52.
27. *Федотов С. А., Гусев А. А., Чернышева Г. В., Шумилина Л. С.* Фокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91—107.
28. *Федотов С. А., Иванов Б. В., Двигало В. Н. и др.* Деятельность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1984 г.//Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 3—23.
29. *Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1960—1961 гг.//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 9. С. 1360—1375.
30. *Фирстов П. П., Гаврилов В. А., Жданова Е. Ю., Кирьянов В. Ю.* Начало нового экструзивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г.//Вулканология и сейсмология. 1994. № 4—5. С. 33—47.
31. *Чубарова О. С., Горельчик В. И., Гарбузова В. Т.* Сейсмический режим вулкана Безымянного в 1975—1979 гг.//Вулканология и сейсмология. 1983. 83. С. 58—69.
32. *Широков В. А.* Связь извержений вулканов Камчатки с землетрясениями верхней мантии//Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 3—88.
33. *Широков В. А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48—58.

Институт вулканической
геологии и геохимии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
07.12.1994

Опытно-методическая сейсмологическая партия
Института вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский