

УДК 551.21+550.3

ТОКАРЕВ П. И.

АСАЧИНСКИЙ РОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ЕГО ПРИРОДА (Камчатка, март-апрель 1983 г.)

Общая характеристика роя

7 марта 1983 г. в районе потухших вулканов Асачинской группы, расположенной в 90 км на юг от г. Петропавловска-Камчатского, начался рой землетрясений.

Очень слабые землетрясения на сейсмограммах сейсмостанции (с/ст) Березовая появились ~12 ч¹. За первые 8 ч было зарегистрировано 42 землетрясения. Энергия и частота землетрясений постепенно возрастали. В 20 ч 39 мин произошло землетрясение энергетического класса $K=8,2$, в 21 ч 06 мин — с $K=9,2$. В последующие 8 ч было зарегистрировано 150 землетрясений. Рой землетрясений продолжался непрерывно до конца апреля 1983 г. Слабые землетрясения продолжались и позже. Землетрясения на ближайших станциях имели четкие вступления объемных волн. Периоды колебаний в продольной волне 0,1—0,2, в поперечной 0,2—0,4 с. Поверхностные волны отсутствуют (рис. 1). По этим признакам по классификации автора [5, 8] они отнесены к вулканическим землетрясениям I типа.

Землетрясения роя регистрировались как постоянными сейсмическими станциями, характеристики которых приведены в таблице, так и радиотелеметрическими сейсмостанциями Петропавловского куста с регистрацией землетрясений непосредственно в Институте вулканологии ДВНЦ АН СССР. Расположение сейсмостанций, вулканов и центра роя землетрясений показано на рис. 2.

При оперативной обработке землетрясений с целью слежения за сейсмическим режимом за опорную станцию была принята с/ст Паужетка, которая наиболее полно и своевременно передавала информацию о землетрясениях роя. Энергетический класс землетрясений K ($K=\lg E$, где E — энергия землетрясения, Дж) определялся в основном по дан-

Характеристики землетрясений Асачинского роя, зарегистрированных сейсмостанциями Южной Камчатки

Сейсмостанция	V	Δ , км	$S-P$, с	Время работы сейсмостанции
Асача	500	5	1,8—2,1	12—30. III. 1983 г.
Горелый	5 000	25	4,5	С 12. III. 1983 г.
Березовая	5 000	36	5,5	Непрерывно
Петропавловск	5 000	94	12,0	»
Тополово	10 000	103	12,6	»
Авача	—	118	—	»
Паужетка	5 000	123	14,5	»
Шипунский	5 000	168	20,6	»

Примечание. V — увеличение, Δ — расстояние до центра роя, $S-P$ — разность времени вступлений поперечных и продольных волн.

¹ В статье везде дается Гринвичское время.

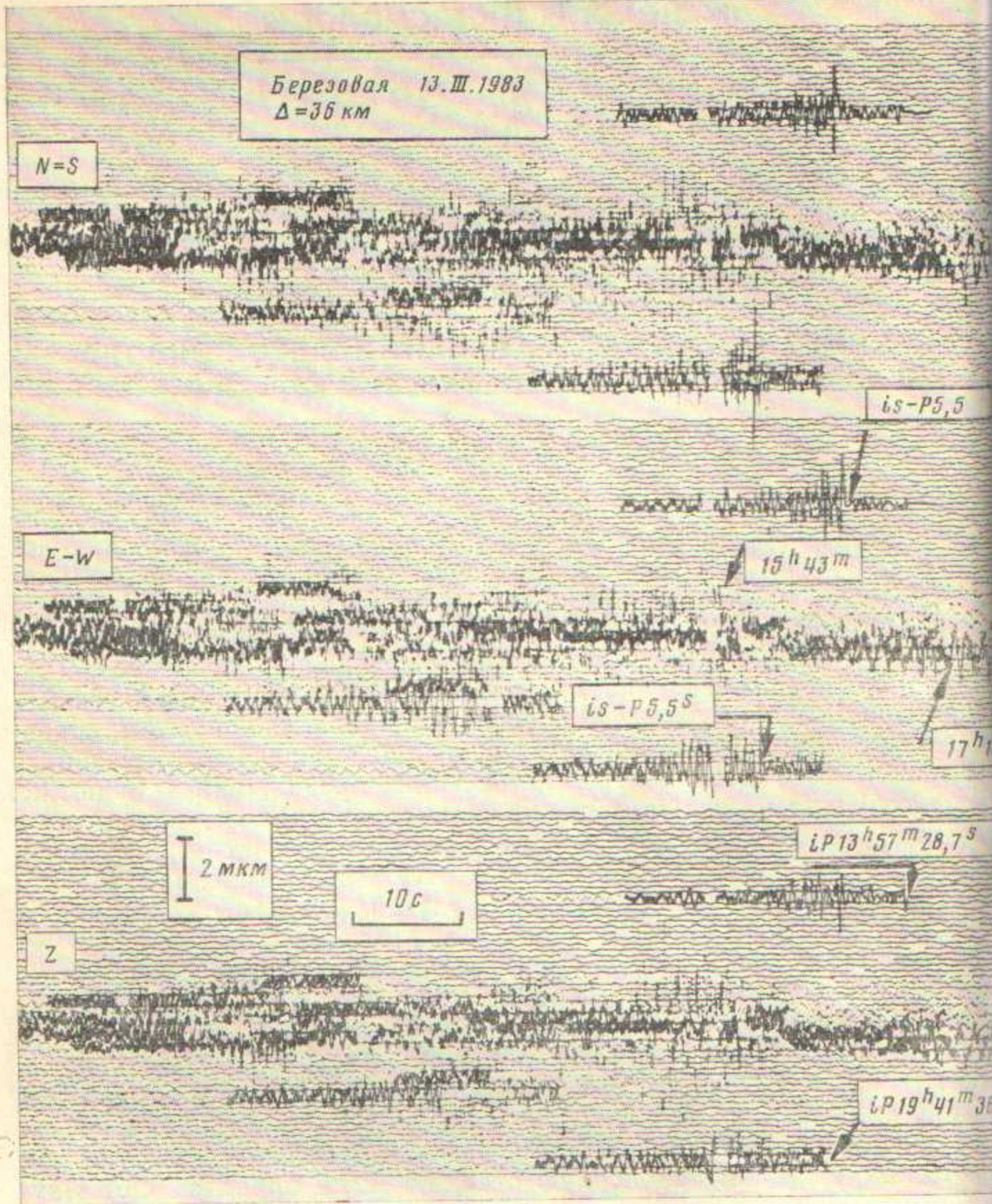


Рис. 1. Сейсмограммы землетрясений Асачинского роя, произошедших 13 марта 1983 г. в 13 ч 57 мин и 19 ч 41 мин, и непрерывного спазматического дрожания в период с 15 ч 43 мин до 17 ч 13 мин

ным с/ст Паужетка. Нами установлено по землетрясениям роя, $K_{\text{пжт}}$ с/ст Паужетка завышен на единицу по сравнению с $K_{\text{ср}}$, определенным как среднее по данным сейсмостанций Южной Камчатки. За энергетический класс землетрясений принималось $K = K_{\text{ср}} = K_{\text{пжт}} - 1$. В этом абсолютное значение K отдельных землетрясений может содержать ошибку до $\pm 0,7$. Координаты очагов землетрясений определялись оперативным данным сейсмостанций Южной Камчатки.

За время роя с 7 марта по 28 апреля было зарегистрировано 947 землетрясений с $K > 7,0$, суммарная энергия которых $\Sigma E = 7,2 \cdot 10^{11}$ Дж. Более сильные землетрясения роя имели $K = 10,7$ (рис. 3).

Землетрясения с $K \geq 9,5$ в районе вулкана Асача на расстоянии 10 км от центра роя ощущались силой 3—5 баллов. В отдельные периоды происходило по несколько десятков ощутимых землетрясений. Почти все они сопровождалось подземным гулом. В периоды усиления сейсмичности

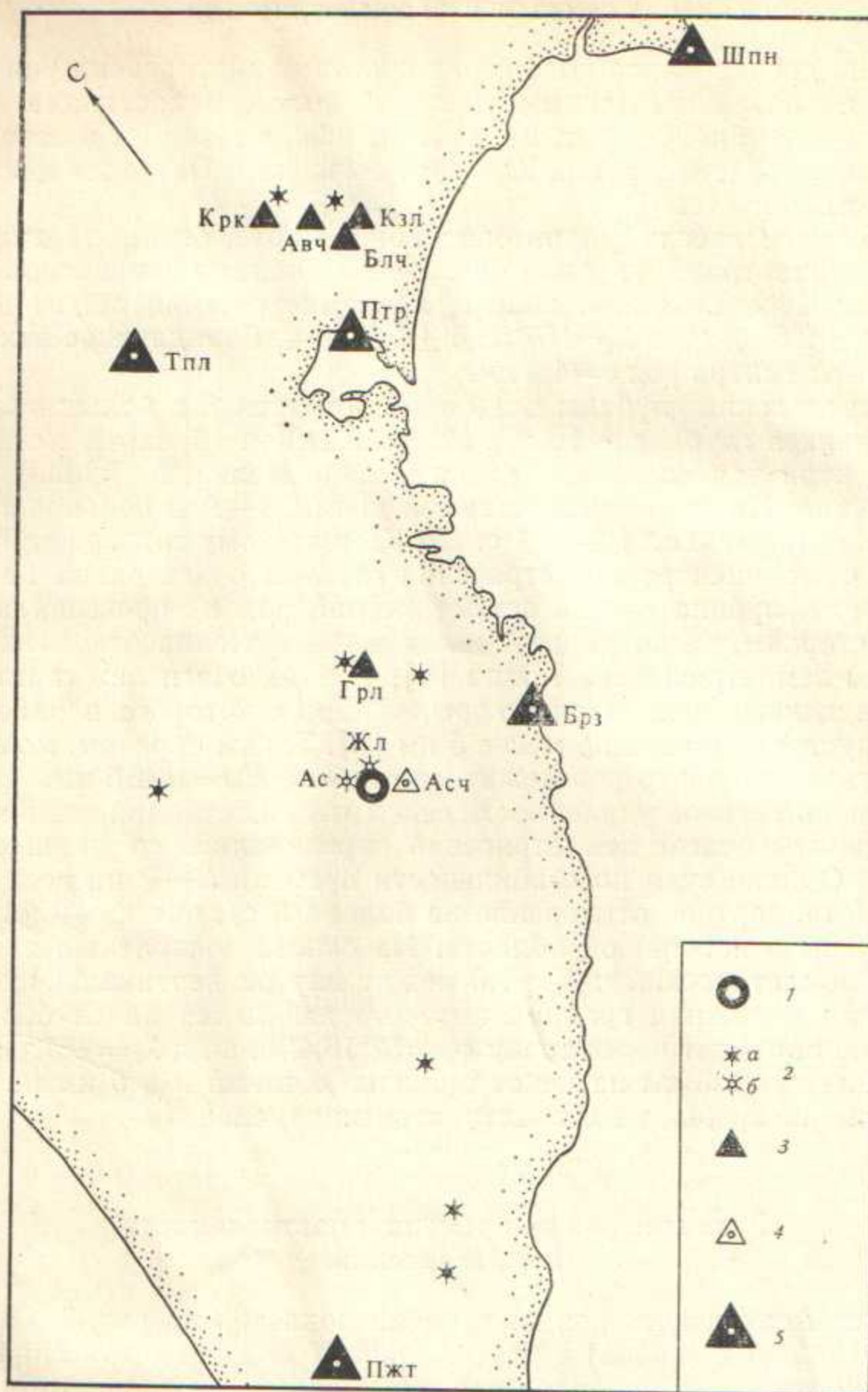


Рис. 2. Схема расположения сейсмостанций Южной Камчатки: 1 — эпицентральная зона Асачинского роя землетрясений; 2 — вулканы: а — действующие, б — потухшие; 3 — сейсмopункты радиотелеметрической системы (РТС) Петропавловского куста; 4 — временные, 5 — постоянные сейсмостанции. Ас — вулкан Асача; Жл — гора Желтая

ской активности иногда в течение 1—3 ч ощущались почти непрерывные колебания.

Под роем землетрясений понимается совокупность вулканических землетрясений, сгруппированных в пространстве и времени. К рою мы условно относим землетрясения, очаги которых удалены не более 5 км от центра роя и по времени разделены интервалом не более 5 сут. За центр роя землетрясений принимается точка в пространстве, координаты которой (φ_0 , λ_0 , H_0) определяются как среднеарифметическое значение широты (φ_i) и долготы (λ_i) эпицентров и глубины очагов (H_i) землетрясений. Описание вулканов Асачинской группы дано в работе [3].

В первой декаде марта положение очагов землетрясений роя определялось по оперативным данным, получаемым с сейсмостанций Южной Камчатки (см. таблицу и рис. 2), а затем использовались и сейсмограммы постоянных сейсмостанций Южной Камчатки и Петропавловского земетрического куста.

Для 65 землетрясений, произошедших в марте, были определены координаты эпицентров и глубина очагов. Координаты эпицентров определялись довольно устойчиво. Центр роя землетрясений лежит в точке $\varphi_0 = 52^\circ 18,4' \pm 2,5'$ с. ш. и $\lambda_0 = 157^\circ 53,6' \pm 1,3'$ в. д. Стандартное отклонение эпицентров от центра роя $\sigma = 4,8$ км.

При определении глубины очагов землетрясений в большинстве случаев получалась глубина ~ 10 км. Установленная 12 марта с/ст Асача на расстоянии 5 км от центра роя позволяла оценить максимальную глубину очагов землетрясений. На этой сейсмостанции время $S-P$ в большинстве случаев лежало в пределах 1,8—2,1 с. По Камчатскому годографу [10] при $S-P = 2,1$ с в эпицентре землетрясения глубина очага равна 14 км. Таким образом, глубина очагов землетрясений роя не превышала 14 км. С другой стороны, регистрировавшиеся землетрясения относятся к вулканическим землетрясениям I типа [5], т. е. их очаги лежат ниже подошвы осадочного слоя земной коры, толщина которого в районе Асачинской группы вулканов не менее 5 км [2]. Таким образом, можно уверенно считать, что центр роя лежит на глубине $H_0 = 10 \pm 5$ км.

Из-за значительной удаленности сейсмических станций от эпицентра роя координаты очагов землетрясений определялись со значительными ошибками. Однако судя по стабильности времени $S-P$ на всех сейсмостанциях (стандартное отклонение не более 0,3 с), очаги землетрясений сосредоточены в небольшой области. На основе оперативных данных очаги роя землетрясений с $K \geq 7,0$ лежат внутри вертикального цилиндра, верхняя и нижняя граница которого находится на глубинах 5—14 км, а ось проходит через точку $\varphi_0 = 52^\circ 18,4'$ с. ш. и $\lambda_0 = 157^\circ 53,6'$ в. д. Эта точка лежит в 3 км на юг от вулкана Желтый и в 6 км на юго-восток от вулкана Асача, в зоне экстррузивных куполов.

Развитие роя во времени и повторяемость землетрясений

Развитие Асачинского роя во времени показано на рис. 3. При частом распределении основных характеристик роя землетрясений видно, что его развитие идет неравномерно во времени: в отдельные часы наблюдались резкие всплески активности, перемежающиеся с периодами резкого спада. Мы будем рассматривать распределение активности роя по суткам, которое значительно сглажено и дает возможность выявить более общие закономерности. В развитии роя можно выделить несколько этапов.

Первый (I) этап (12 ч 7 марта — 16 ч 13 марта) характеризовался появлением землетрясений и постепенным возрастанием их частоты и энергии (до 12 ч 7 марта землетрясения с $K \geq 7$ в районе Асачинской группы вулканов с очагами в пределах земной коры не регистрировались). 9 марта в 15 ч 53 мин произошло одно из наиболее сильных землетрясений роя с $K = 10,7$. После этого частота землетрясений и суммарная энергия продолжали возрастать, и 13 марта в 16 ч наступил кульминационный период. Только за один этот час было отмечено 27 землетрясений. 13 марта с 15 ч 40 мин до 17 ч 15 мин на с/ст Березовая регистрировались непрерывные колебания с периодом 0,3—0,5 с и амплитудой $\sim 0,2$ мкм, на фоне которых происходили отдельные землетрясения.

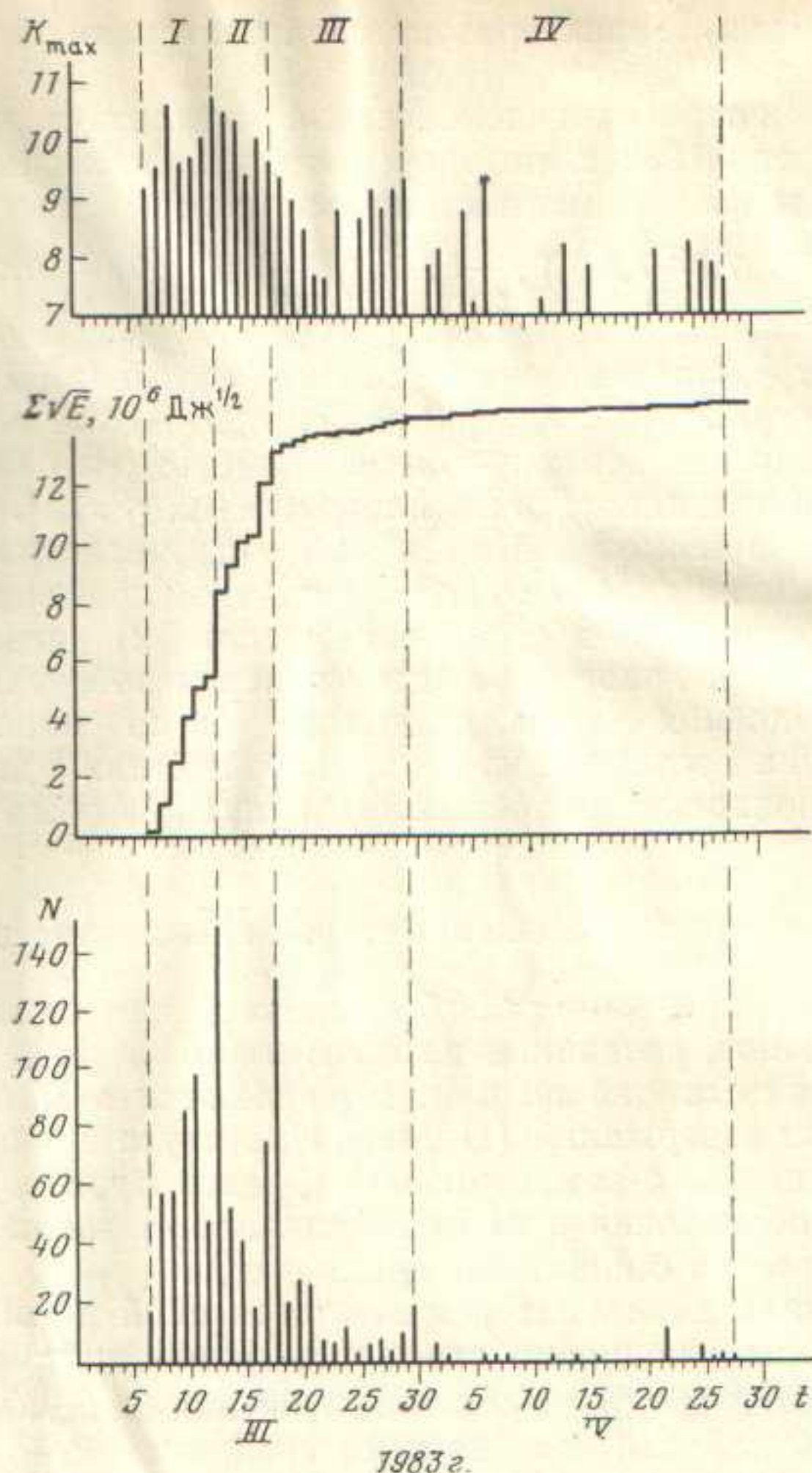


Рис. 3. Характеристики сейсмического режима Асачинского роя землетрясений. N — число, $K_{\max}$ — максимальный энергетический класс землетрясений за сутки; $\Sigma\sqrt{E}$ — суммарная условная деформация с начала роя; I—V — этапы развития роя

летрясения (см. рис. 1). Подобная же картина наблюдалась 13 марта, в период с 4 ч 30 мин до 5 ч 30 мин. Такие колебания регистрировались и на других ближайших станциях. Непрерывные колебания мы относим к непрерывному вулканическому дрожанию, связанному с внедрением магмы [9].

Второй (II) этап (17 ч 13 марта — 9 ч 18 марта) характеризовался постепенным убыванием частоты землетрясений, их суммарной энергии и максимального энергетического класса. После некоторого усиления активности роя 18 марта наступил резкий спад.

Третий (III) этап (10 ч 18 марта — 30 марта), характеризовался слабой активностью роя, но землетрясения с $K \geq 7,0$ происходили ежедневно.

Четвертый (IV) этап (31 марта — 28 апреля) — слабая активность роя, землетрясения происходили редко, $K \leq 9,4$.

По развитию во времени Асачинский рой землетрясений похож на рой землетрясений, предвещающие побочные извержения вулканов [5, 8].

Повторяемость землетрясений ($\lg n = -\gamma K + B$, где n — число землетрясений энергетического класса K , а γ и B — постоянные коэффициен-

ты для данного роя) характеризует свойства среды, в которой лежат очаги землетрясений.

Ниже приведено распределение числа землетрясений Асачинского роя за март-апрель 1983 г. по энергетическим классам K , из которых можно рассчитать коэффициенты повторяемости:

K	7,0—7,9	8,0—8,9	9,0—9,9	10,0—10,9
n	550	291	93	13

Коэффициент γ , рассчитанный для землетрясений с $K \geq 8,0$, равен 0,68 и для землетрясений с $K \geq 9,0$ равен 0,85. Это значительно больше, чем при тектонических землетрясениях ($\gamma=0,43$), и близко к тому, что наблюдается при вулканических землетрясениях [8, 13].

Судя по всем признакам Асачинский рой землетрясений связан с внедрением магмы на глубине ~ 10 км. На это указывают: 1) локализация очагов землетрясений в небольшом объеме; 2) развитие роя во времени, подобное тому, какое наблюдается перед побочными извержениями в момент внедрения магмы, до выхода ее на поверхность земли; 3) наклон графика повторяемости, характерный для вулканических землетрясений; 4) появление непрерывного вулканического дрожания.

Оперативное слежение за роем землетрясений

На Камчатке непрерывно работает оперативная служба слежения за состоянием вулканов, созданная автором в 1964 г. [7]. Ежедневно со всех сейсмических станций по радию передаются в Лабораторию прогноза и механизма извержений (ПиМИ) Института вулканологии ДВНЦ АН СССР все данные о землетрясениях, здесь производятся их обработка и анализ обстановки в районе вулканов, а также дается прогноз состояния вулканов на ближайшее время.

С самого начала появления роя землетрясений в районе вулканов Асачинской группы ежедневно строились и дополнялись графики сейсмического режима, которые включали графики $\Sigma \sqrt{E}$, $K_{\max}$ и N — число землетрясений за каждый час. По этим графикам было видно развитие во времени роя землетрясений. Одновременно определялись координаты очагов, уточнялись сведения о типе землетрясений. Большую помощь в наблюдениях оказывала радиотелеметрическая система (РТС) Петровпавловского куста: по видимой записи землетрясений можно было непосредственно в Институте вулканологии непрерывно наблюдать, что происходит в районе вулкана, какой тип землетрясений регистрируется и как часто они происходят.

Автором регулярно составлялись информационные сообщения о рое землетрясений и возможной вулканической опасности, в которых анализировалась сейсмическая обстановка, давался прогноз состояния вулканов на ближайшие дни, вносились предложения по организации наблюдений и предотвращению возможной опасности. Информационные сообщения передавались в дирекцию Института и председателю Комиссии по предотвращению вредных последствий извержений вулканов при Камчатском облисполкоме. Они регулярно рассматривались на заседаниях дирекции Института вулканологии и Комиссии при облисполкоме. На этих заседаниях разрабатывались необходимые мероприятия по организации наблюдений и обеспечению безопасности населения. Чтобы избежать паники, для населения области давались сообщения в областной газете и по телевидению.

По данным на 9 марта, эпицентры землетрясений роя лежали в точке $\varphi=52^{\circ}20,3'$ с. ш., $\lambda=157^{\circ}53,3'$ в. д., а очаги землетрясений — на глубине 20—30 км. Ошибки определения эпицентров оценивались в 10 км, а очаги могли лежать и на глубине 0—10 км. В связи с этим было пред-

ложено организовать дополнительные наблюдения с целью повышения точности определения координат очагов землетрясений.

11—12 марта в 5—8 км от эпицентральной области была организована полевая с/ст Асача (см. таблицу), начала работать и телеметрическая с/ст Горелый. На с/ст Асача $S-P=1,8-1,9$ с, реже — 2,0 с. Колебания в волне S высокочастотные ($T \sim 0,2$ с), вступления волн четкие, поверхностные волны отсутствуют. Используя эти данные, определили, что очаги землетрясений лежат на глубине 10 ± 5 км, эпицентры в точке ($\varphi = 52^\circ 20'$ с. ш., $\lambda = 157^\circ 53'$ в. д.) ± 5 км, а сами землетрясения относятся к вулканическим землетрясениям I типа. Дальнейшие наблюдения показали, что определенное 12 марта положение очагов землетрясений по оперативным данным близко их действительному положению.

Слежение за Асачинским роем непрерывно велось до конца апреля 1983 г., до окончания роя землетрясений с $K \geq 7$.

Прогноз развития роя и вулканической опасности

Рой землетрясений происходил в районе потухших вулканов Асачинской группы, последние извержения которых были $\sim 1,5-2,0$ тыс. лет назад, и не исключается возможность их извержений в будущем.

Первая попытка дать прогноз состояния вулканов Асачинской группы по данным на 9 марта была сделана 10 марта. Однако неопределенность положения очагов землетрясений и наличие данных только за 2-сут не позволили дать уверенный прогноз возможного развития событий. Были даны два варианта прогноза: 1) если очаги землетрясений действительно лежат на глубине 20—30 км, то извержения не будет; 2) если очаги землетрясений лежат на глубине не более 10 км, то рой землетрясений может быть предвестником извержения. Судя по энергии землетрясений, а также длительному спокойному состоянию вулкана (1,5—2,0 тыс. лет), извержение могло быть большим или катастрофическим. Начаться оно могло не ранее чем через неделю после начала роя, т. е. не ранее 14 марта.

После уточнения глубины очагов землетрясений 13 марта был дан следующий прогноз: на основе характера развития роя землетрясений во времени и положения очагов землетрясений можно сделать вывод, что под вулканом Желтый на глубине ~ 10 км происходит внедрение магмы в периферический магматический очаг или в образующиеся трещины. Возможно, что в эпицентральной зоне происходят заметные вертикальные деформации.

Появление роя землетрясений указывает на возросшее давление в первичном магматическом очаге вулканов Асачинской группы (Асача, горы Туманная, Желтая и др.). Судя по глубине процесса, наиболее вероятно, что разрядка возникших напряжений произойдет за счет внедрения магмы на глубине, однако не исключено, что при дальнейшем росте давления магма будет выжата на поверхность земли и произойдет извержение. Судя по длительному периоду покоя, извержение может быть большим (изверженная масса $m \geq 10^9$ т) или даже катастрофическим ($m \geq 10^{10}$ т). Извержение будет предваряться роем вулканических землетрясений II и III типов с глубиной очага менее 5 км. До появления землетрясений II и III типов извержения не будет.

Процесс внедрения магмы может продолжаться от нескольких недель до нескольких лет, сопровождаясь роями землетрясений I типа. Подготовка извержения будет сопровождаться землетрясениями II и III типов и может длиться от одной недели до одного года. Было предложено: 1) усилить наблюдения за сейсмическим режимом вулканов Асачинской группы; 2) организовать вокруг вулканов в пяти-шести точках временные сейсмостанции с целью уточнения положения очагов землетрясений; 3) провести наблюдения за деформациями в эпицентральной зоне;

4) ознакомить геологов КТГУ с состоянием Асачинской группы вулканов, подчеркнув, что в ближайшую неделю нет повода для беспокойства.

Информационные сообщения о состоянии вулканов Асачинской группы давались 10, 13, 15, 18, 20, 21, 25 марта и 4, 6 апреля. 25 марта стало ясно, что рой землетрясений не является предвестником извержения, ожидалось его прекращение в ближайшее время. Предполагалось также, что подобные рои будут происходить периодически еще в течение нескольких лет.

Природа роя землетрясений

Вулканические землетрясения. В отличие от тектонических землетрясений, связанных с тектоническими движениями земной коры и верхней мантии, к вулканическим относятся землетрясения, связанные с зарождением и движением магмы на глубине, а также выходом ее на поверхность земли. Так как вулканы всегда располагаются в активных тектонических областях с повышенной сейсмической активностью, возникает проблема разделения землетрясений на вулканические и тектонические. Это решается просто, когда землетрясения непосредственно связаны с извержениями вулканов и их очаги лежат в пределах земной коры. Если землетрясения связаны с зарождением магматических очагов и движением магмы в верхней мантии, их разграничить пока невозможно, так как смещения в очагах землетрясений и в том, и в другом случае носят сдвиговый характер. Отличие тектонических от вулканических землетрясений состоит в следующем: 1) при тектонических напряжения могут возникать в больших объемах, при вулканических они локализованы в небольшом пространстве вблизи магматического очага и выводного канала вулкана; поэтому максимальная энергия вулканических землетрясений на несколько порядков меньше максимальной энергии тектонических землетрясений; 2) скорость перемещения магмы как очень пластичного вещества по крайней мере на один порядок больше, чем скорости смещения при тектонических движениях, и это должно отражаться в развитии во времени сейсмических процессов, связанных с вулканической деятельностью; 3) при тектонических землетрясениях выделяется только энергия, накопившаяся в области очага землетрясения, а в случае вулканических к области очагов землетрясений может длительное время поступать через выводной канал также энергия, накопленная в магматическом очаге. При этом подвижки могут происходить многократно по одним и тем же трещинам и разломам с небольшим интервалом времени между ними. Мы относим к вулканическим только те землетрясения, эпицентры которых лежат в пределах вулканической постройки, а очаги — на глубине не более 60 км.

Рои вулканических землетрясений можно разделить на пять типов. *Рои I типа* предваряют центральные извержения андезитовых вулканов. Они состоят из вулканических землетрясений II и III типов. Эпицентры землетрясений лежат на удалении не более 3—5 км от кратера, а очаги — на глубине не более 10, в основном на глубине 0—5 км в теле вулканической постройки. Предельный (максимальный) энергетический класс землетрясений роя равен $K_{\text{пред}} = 12,0 \pm 0,5$. Длятся такие рои с $K \geq 7,0$ 3—5 недель, а с $K \geq 9$ 7—10 дней. Землетрясения роя связаны с непрерывным ростом давления в верхней части выводного канала вулкана перед извержением. При этих роях суммарная энергия E_N , частота N и максимальный энергетический класс землетрясений K_{max} возрастают непрерывно и монотонно и максимальных значений достигают в момент начала извержения [7].

Рои II типа предваряют побочные извержения базальтовых и андезитобазальтовых вулканов. Они состоят из вулканических землетрясений II и III типов. Иногда происходят и землетрясения I типа. Эпицентры землетрясений лежат на удалении не более 3—5 км от места образова-

ния нового кратера, а очаги — на глубине не более 10, в основном на глубине 0—5 км. Рои землетрясений связаны с внедрением магмы и образованием трещин на глубине, по которым магма поднимается к поверхности земли. Перед побочными извержениями центральных стратовулканов рои землетрясений длятся 1—9 сут, а $K_{\text{сред}}=11,0$. В этих роях E_N , N и K_{max} сначала резко возрастают и, достигнув максимума, начинают непрерывно уменьшаться, а за несколько часов перед прорывом побочного кратера землетрясения с $K \geq 6,0$ прекращаются. Перед извержениями очень жидких базальтовых магм в рифтовых зонах, вблизи щитовых и трещинных вулканов рои землетрясений могут длиться часы или десятки минут, а предельная энергия землетрясений может быть значительно меньше указанной выше.

Рои III типа сопровождают извержения вулканического типа. Они состоят из землетрясений IV (взрывного) типа. Очаги землетрясений лежат на глубине не более 500 м от дна активного кратера, а эпицентры — в кратере вулкана. Их частота N , энергия E_N и K_{max} изменяются в зависимости от интенсивности извержения и силы отдельных взрывов.

Рои IV типа происходят во время и в конце извержений, а также после их прекращения. Они могут состоять из вулканических землетрясений I—III типов [8] с глубиной очага 0—30 км и эпицентрами на удалении до 10—20 км от активного кратера вулкана. Такие рои отражают постепенную разрядку напряжений, возникших при перемещении магмы до и во время извержения (просадку кровли над периферическим магматическим очагом, обрушение стенок кратера, отток магмы в трещины и т. п.). E_N , N и K_{max} обычно максимальны в начале роя и со временем постепенно уменьшаются. Длятся рои от нескольких часов до нескольких месяцев.

Рои V типа с извержениями вулканов не связаны и происходят как вблизи активных, так и вблизи потухших вулканов. Иногда подобные рои происходят в районах затухающего вулканизма, вдали от вулканов. Рои состоят из вулканических землетрясений I типа [8]. Их очаги лежат на глубинах 5—40 км, а эпицентры — в пределах морфологически выраженной вулканической постройки. Предельный энергетический класс землетрясений роя может достигать $K=12,0$. Существуют такие рои от нескольких часов до нескольких суток и даже месяцев. Иногда в одном и том же месте рои землетрясений повторяются многократно в течение нескольких лет с перерывом между ними в несколько месяцев или лет. Развитие роя во времени в общих чертах подобно развитию роев II типа.

Рои землетрясений в районах потухших вулканов, угасающего вулканизма и гидротермальной деятельности — это обычное явление. Они наблюдались как на Камчатке, так и в других районах земного шара. Довольно подробно описаны рои землетрясений, происходившие в районе потухших вулканов Ааг [1] и Камбального хребта [4] на Камчатке, вулканов Хаконе [12] и Мацусиро [11] в Японии, в районе гидротермальной деятельности Исландии [14] и других районах. Причину возникновения роев землетрясений различные исследователи объясняют в зависимости от того, в каких районах они наблюдаются. Если рои происходят в районах гидротермальной деятельности, то их связывают с нею. Если очаги землетрясений располагаются вблизи тектонических разломов, то рои объясняют движением по этим разломам. Если рои происходят вблизи вулканов, то их связывают с движением магмы. По мнению автора, все эти рои землетрясений с глубиной очагов более 1—2 км в районах действующих и потухших вулканов, а также в районах недавно угасшего вулканизма и гидротермальной деятельности связаны с движением магмы. Попытаемся объяснить это.

Простейшая модель полигенного центрального вулкана включает в себя магматический очаг, выводной канал и коническую гору на поверх-

ности земли. Время активного существования вулкана 10^4 — 10^5 лет, время существования выводного канала и магматического очага — на один-два порядка больше. По нашим представлениям [6], в результате аномального притока тепла в некоторых участках верхней мантии на глубинах 50—200 км происходит плавление твердых пород; при этом объем увеличивается, давление возрастает и образовавшийся избыточный объем магмы выжимается на поверхность земли; возникает вулкан. Процесс генерации магмы (плавления вещества в верхней мантии) идет неравномерно (рис. 4). С момента начала процесса скорость генерации магмы α_0 постепенно нарастает (этапы I, II), достигнув максимума (этап III), затем постепенно уменьшается и в конце концов становится равной нулю (этапы IV, V). При малой скорости генерации происходит внедрение магмы на глубине. Когда скорость генерации превосходит критическое значение ($\alpha_0 > \alpha_{ок}$), магма выходит на поверхность земли.

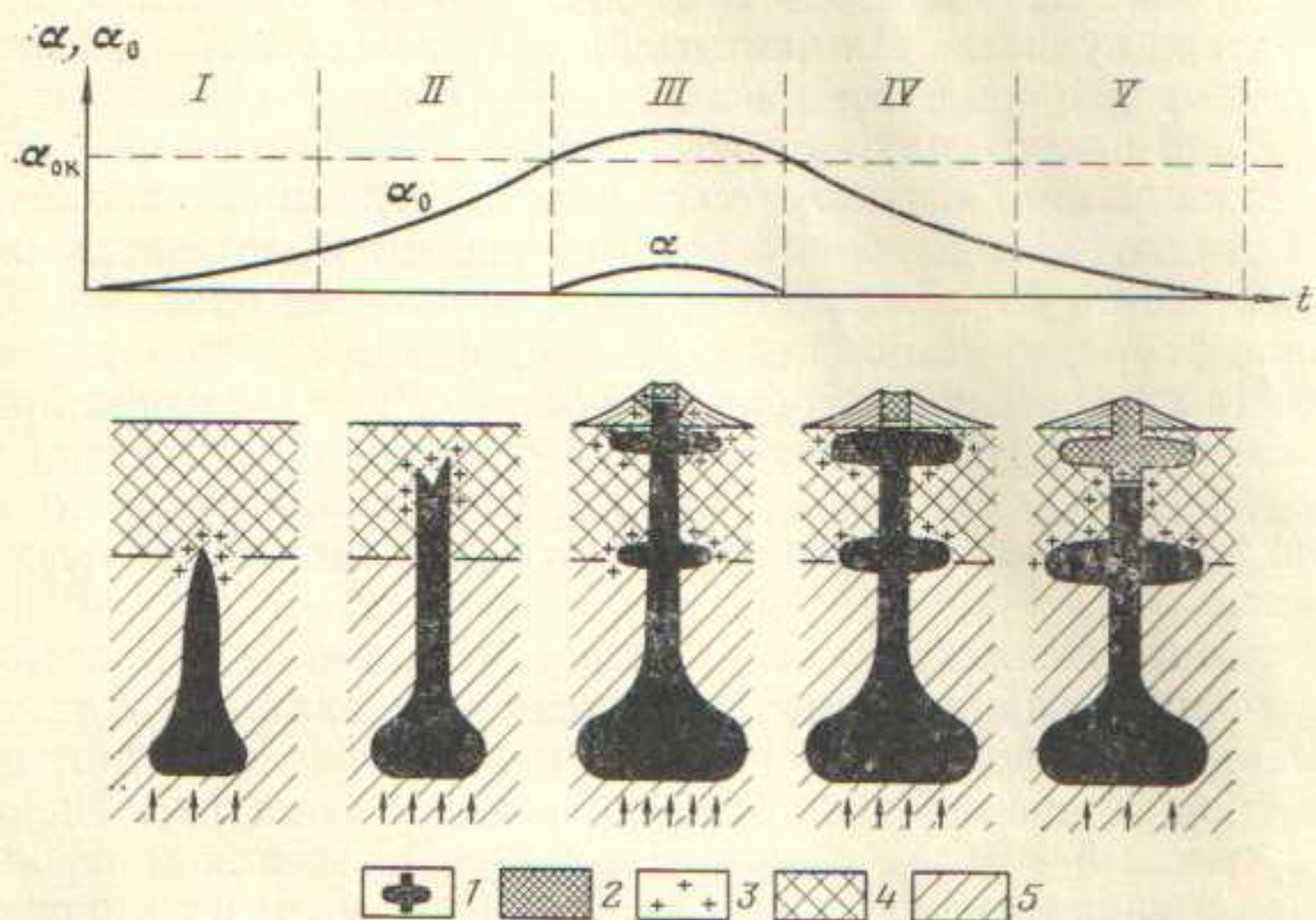


Рис. 4. Схема развития во времени вулканического процесса. I—V—этапы развития; 1 — магма; 2 — застывшая магма; 3 — очаги землетрясений; 4 — земная кора; 5 — верхняя мантия; α — расход вулкана; α_0 — скорость генерации магмы; $\alpha_{ок}$ — критическая скорость генерации магмы

образуется вулкан, расход которого α изменяется в соответствии с изменениями скорости генерации магмы. При снижении скорости генерации до значений $\alpha_0 < \alpha_{ок}$ активная вулканическая деятельность (извержения) прекращается, но «корни вулкана» (магматический очаг и выводной канал) продолжают жить. Продолжается генерация магмы в очаге, происходит ее выжимание, но она уже не выходит на поверхность земли, а внедряется в трещины и периферические магматические очаги в земной коре, вызывая при этом землетрясения и деформации земной поверхности.

Из рис. 4 следует, что до образования вулкана (этапы I, II) происходит внедрение магмы в земную кору и могут происходить рои землетрясений в «невулканическом» районе. Во время деятельности активного вулкана (этап III) кроме извержения магмы на поверхность земли может происходить ее внедрение в трещины и периферические очаги в пределах земной коры. Таким образом, рои землетрясений V типа могут происходить и в районе действующих вулканов. После прекращения извержений в верхней части выводного канала магма застывает, и при продолжающемся выжимании магмы из магматического очага происходит ее внедрение или в периферические очаги, или в трещины в земной коре, сопровождаемое роями землетрясений. Глубина зарождения роев

землетрясений на этапах I—III постепенно уменьшается, а на этапах III—V возрастает. По-видимому, по глубине очагов роевых землетрясений можно судить о глубине застывания магмы в выводном канале и, таким образом, о возрасте потухшего вулкана.

Заключение

Все характеристики Асачинского роя землетрясений, рассмотренные выше, указывают на то, что он был, по-видимому, связан с внедрением магмы на глубине ~10 км. Ожидается, что подобные рои землетрясений в этом районе могут происходить неоднократно еще в течение нескольких лет. Они не являются предвестником извержения. В случае подготовки извержения не менее чем за одну неделю до его начала появятся вулканические землетрясения II и III типов энергетического класса $K \geq 9,0$. Появление таких землетрясений будет указывать на возможность извержения.

В процессе наблюдений и изучения Асачинского роя землетрясений выявились как положительные, так и отрицательные стороны системы наблюдений и службы оперативного слежения за состоянием вулканов Камчатки. Положительным было то, что служба оперативного слежения даже в существующем виде позволяет хотя бы приближенно определять район землетрясений и следить за его режимом. По оперативным данным давались прогнозы состояния вулкана на ближайшую неделю, которые оправдывались. Радиотелеметрическая система (РТС) Петропавловского куста с регистрацией землетрясений в Институте вулканологии позволяет оперативно следить за сейсмичностью Южной Камчатки в радиусе 100—150 км.

Автор благодарит сотрудников Центра службы оперативного слежения за состоянием вулканов — В. Ф. Радчук, Ю. В. Карпухину и Н. И. Реутову, руководителей Института вулканологии и облисполкома, а также всех сотрудников, принимавших участие в организации и проведении работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горельчик В. И. О рое землетрясений вулкана Ааг.— Бюл. вулканол. станции, 1969, № 45, с. 32—38.
2. Декин Г. П., Зубин М. И. Рельеф основных поверхностей раздела земной коры Камчатки.— В кн.: Геофизические поля северо-западной части Тихого океана. Владивосток, 1976, с. 44—56.
3. Кожемяка Н. Н., Литасов Н. Е., Вадеевская А. А. Асачинская группа вулканов на Камчатке.— Вулканол. и сейсмол., 1984, № 3, с. 14—24.
4. Левина В. И., Фирстов П. П., Зобин В. М. Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке.— Вулканол. и сейсмол., 1980, № 2, с. 81—97.
5. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
6. Токарев П. И. Некоторые закономерности вулканического процесса.— В кн.: Магмообразование и его отражение в вулканическом процессе. М.: Наука, 1977, с. 25.
7. Токарев П. И. К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным.— Бюл. вулканол. станции, 1977, № 53, с. 38—45.
8. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
9. Токарев П. И. Вулканическое дрожание.— Вулканол. и сейсмол., 1981, № 3, с. 55.
10. Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964, № 9, с. 1360—1375.
11. Hagiwara T., Iwata T. Summary of the seismographic observation of Matsushiro swarm earthquakes.— Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 1968, v. 46, № 3, p. 485—515.
12. Hiraga S. Earthquake swarm of geothermal fields in Japan.— J. Japan Geotherm. Energ. Agen., 1972, № 32, p. 30—39.
13. Mogi K. Experimental study on the mechanism of the earthquake occurrence of volcanic origin.— Bull. Volcanol., 1963, t. 26, p. 197—208.
14. Ward P., Björnsson S. Microearthquakes, swarms and the geothermal areas of Iceland.— J. Geophys. Res., 1969, v. 76, № 17, p. 3953—3982.

Институт вулканологии ДВНЦ
АН СССР

Поступила в редакцию
15.X.1983