

УДК 551.21

**П. П. ТОКАРЕВ**

**ГИГАНТСКОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА ШЕВЕЛУЧ  
12 НОЯБРЯ 1964 г. И ЕГО ПРЕДВЕСТНИКИ**

Постоянные наблюдения за сейсмическим режимом вулкана Шевелуч (Камчатка) позволили установить, что гигантское извержение предвещалось роем слабых вулканических землетрясений. Изучение землетрясений, предвещающих и сопровождающих извержения, дало богатый материал позволяющий проследить ход вулканической деятельности.

Вулкан Шевелуч — самый северный действующий вулкан Камчатки — расположен в области пересечения Курило-Камчатской и Алеутской вулканических дуг. В виде огромного одиночного массива он возвышается в северной части Центральной Камчатской депрессии между хребтами Кумроч (на востоке) и Срединным (на западе). Максимальная высота массива 3335 м. Сбросом вулкан разбит на две части: наиболее высокую — северо-восточную (остаток древнего стратовулкана) и опущенную — юго-западную, в которой сосредоточена вся современная деятельность вулкана [1].

Современные извержения вулкана Шевелуч носят промежуточный характер между извержениями типов Мерапи и Мон-Пеле. Излияний лавовых потоков не происходит: лава или выжимается в виде куполов или выбрасывается в виде агломерата. Извержения сопровождаются косыми взрывами и пепловыми тучами. Лава — роговообманковые андезиты. Известны извержения вулкана в 1793, 1854, 1879—1883, 1896—1897, 1925—1930, 1944—1950 гг. И. И. Гушенко [2] установил, что пароксизмальные извержения в голоцене происходили в среднем один раз в 150 лет и при каждом таком извержении вулкан выбрасывал от 1 до 10 млрд. т рыхлых продуктов.

О сейсмическом режиме вулкана ничего не известно. За время непрерывной работы сейсмических станций (1958—1963 гг.) в районе вулкана было зарегистрировано только одно землетрясение с эпицентром в пределах вулканической постройки [3]. В 1964 г. наблюдения за сейсмическим режимом вулкана велись на сейсмических станциях Ключи, Апахончич и Козыревск. Описание сейсмических станций и их оборудования дано в работе [4].

В настоящей статье описано извержение и его предвестники по инструментальным данным. При описании извержения дается местное декретное время, а при описании сейсмограмм и микробарограмм — Гринвичское, которое отличается (запаздывает) от местного времени на 12 часов.

Для энергетической характеристики землетрясений вулкана Шевелуч использовалась шкала энергетических классов  $K$ , применяемая Тихоокеанской сейсмической экспедицией Института физики Земли АН СССР и Институтом вулканологии СО АН СССР при определении энергии камчат-

ских землетрясений (описание номограммы для определения энергетических классов  $K$  дано в работе [5]). За основу принимались данные сейсмостанции Козыревск. Энергетический класс по данным сейсмостанции Ключи занижается на одну единицу, а по данным сейсмостанции Апахончич — на 0,5. В то же время энергетический класс тех же землетрясений, определенный по данным станций с  $\Delta > 200$  км, завышается по сравнению с  $K$  Козыревска на одну единицу.

### СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВУЛКАНА ПЕРЕД ИЗВЕРЖЕНИЕМ

О пробуждении вулкана Шевелуч после длительного его покоя возвестил рой слабых вулканических землетрясений, происходивших в конце апреля — первой декаде мая 1964 г. За две недели было зарегистрировано 37 землетрясений 6—10 энергетических классов. По наиболее сильным из них было определено положение эпицентров. Эпицентры всех землетрясений роя лежали в пределах постройки вулкана Шевелуч, а глубина очагов оценивалась от 0 до 10 км. По характеру записи землетрясений на сейсмостанциях Ключи и Козыревск, а также по характеру роя было видно, что эти землетрясения вулканического происхождения и связаны с деятельностью вулкана Шевелуч. Появление роя вулканических землетрясений указывало на то, что в верхних частях выводного канала вулкана Шевелуч давление возросло до такой величины, что создаваемые им напряжения превосходят предел прочности твердых пород, окружающих выводной канал, и вызывают частичное их разрушение. Можно было предположить, что дальнейшее повышение давления в выводном канале вызовет разрушение лавовой пробки и приведет к извержению вулкана [6].

При подготовке к наблюдению извержения были установлены микробарографы на сейсмостанциях Ключи и Козыревск, а в августе сделана попытка организовать сейсмическую станцию на базе вулканостанции в 6 км от кратера вулкана. Как только появились первые признаки пробуждения вулкана, организовали непрерывную передачу по радию всех данных о местных землетрясениях с сейсмостанции Ключи, Козыревск и Апахончич в Институт вулканологии. По этим данным непрерывно, с опозданием не более двух суток, продолжали достраиваться графики условных деформаций и частоты землетрясений, по которым можно было судить о состоянии вулкана (рис. 1, а).

Тщательный просмотр сейсмограмм за предыдущий период показал, что отдельные слабые землетрясения с очагом под вулканом Шевелуч начали отмечаться еще в январе 1964 г. Они происходили очень редко и были слабыми. С января по апрель 1964 г. произошло только 10 землетрясений 6—9 энергетических классов.

После роя землетрясений, отмеченного в первой декаде мая, частота землетрясений стала убывать. В сутки происходило не более трех землетрясений, а интервалы времени между землетрясениями иногда достигали нескольких суток. На фоне этого спада активности 25 июля произошло довольно сильное землетрясение ( $K = 11$ ), ощущавшееся на расстоянии 6 км от эпицентра силой в 6—7 баллов. С этого времени начался непрерывный и регулярный рост частоты землетрясений. Если до этого землетрясения происходили с интервалом до 25 суток, то уже с 24 октября землетрясения с  $K \geq 6$  происходили ежедневно, притом по несколько в день.

Начавшийся регулярный рост частоты землетрясений (и высвобождающихся упругих деформаций) указывал на быстрое возрастание давления в верхней части выводного канала вулкана и на возможность извержения в скором времени.

В ноябре продолжался рост частоты замлетрясений и их энергии. За последние сутки перед извержением было зарегистрировано 73 землетрясения 8—13 энергетических классов. За 7 часов до извержения землетрясения происходили так часто, что запись их на сейсмограммах сливалась

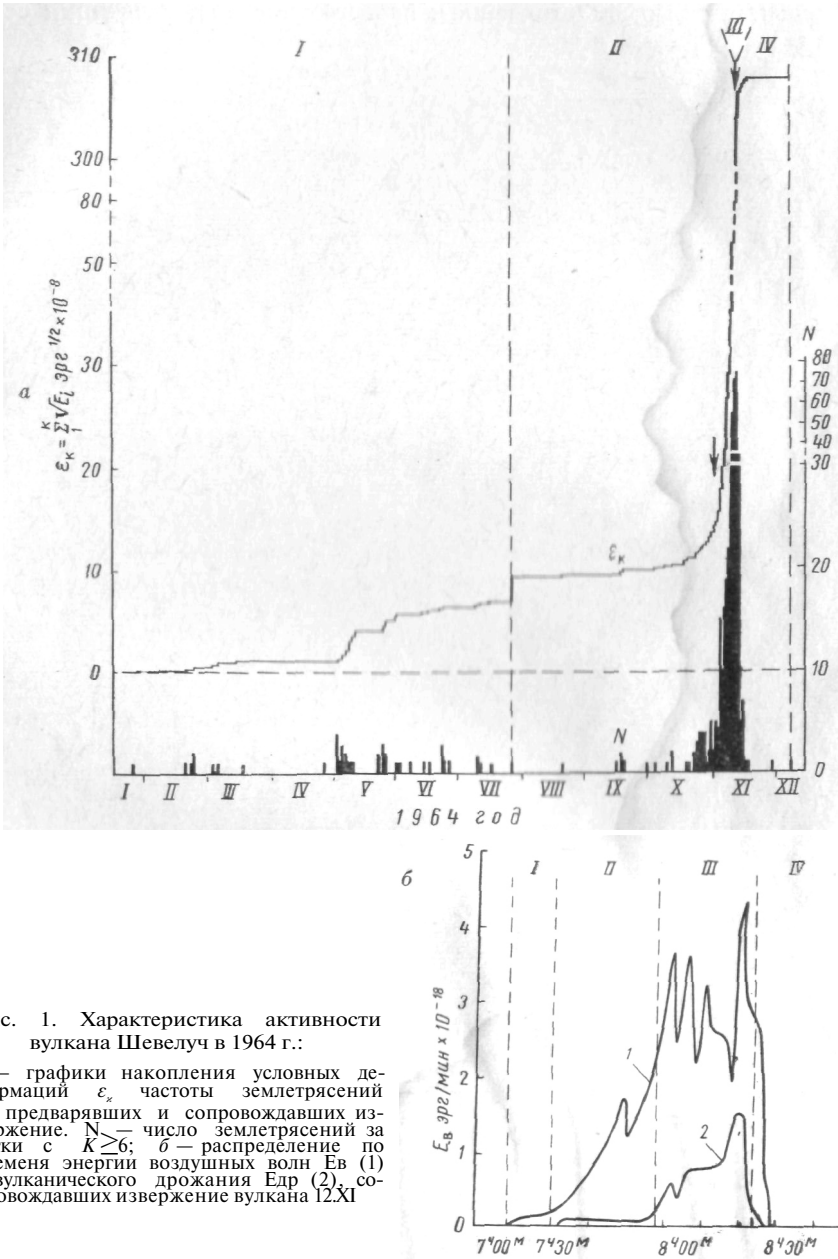


Рис. 1. Характеристика активности вулкана Шивелуч в 1964 г.:

*а* — графики накопления условных деформаций  $\epsilon_k$  частоты землетрясений  $N$ , предварающих и сопровождавших извержение.  $N_{\geq 6}$  — число землетрясений за сутки с  $K \geq 6$ ; *б* — распределение по времени энергии воздушных волн  $E_v$  (1) и вулканического дрожания Едр (2), сопровождавших извержение вулкана 12.XI

и становилась неразборчивой. Сила землетрясений также резко возросла. 12 ноября произошло пять землетрясений 12—13 энергетических классов, ощущавшихся в пос. Ключи и Козыревск силой в 33—4 балла и сопровождавшихся подземным гулом.

Наиболее сильные землетрясения всего цикла активности произошли 12.XI в 7 ч. 7 м. и в 7 ч. 13 м. по местному времени. После землетрясения, происшедшего в 7 ч. 7 м., началось извержение.

Землетрясения, предвалявшие извержение вулкана Шевелуч, относятся к вулканическим землетрясениям первого типа [4], с четкими вступ-

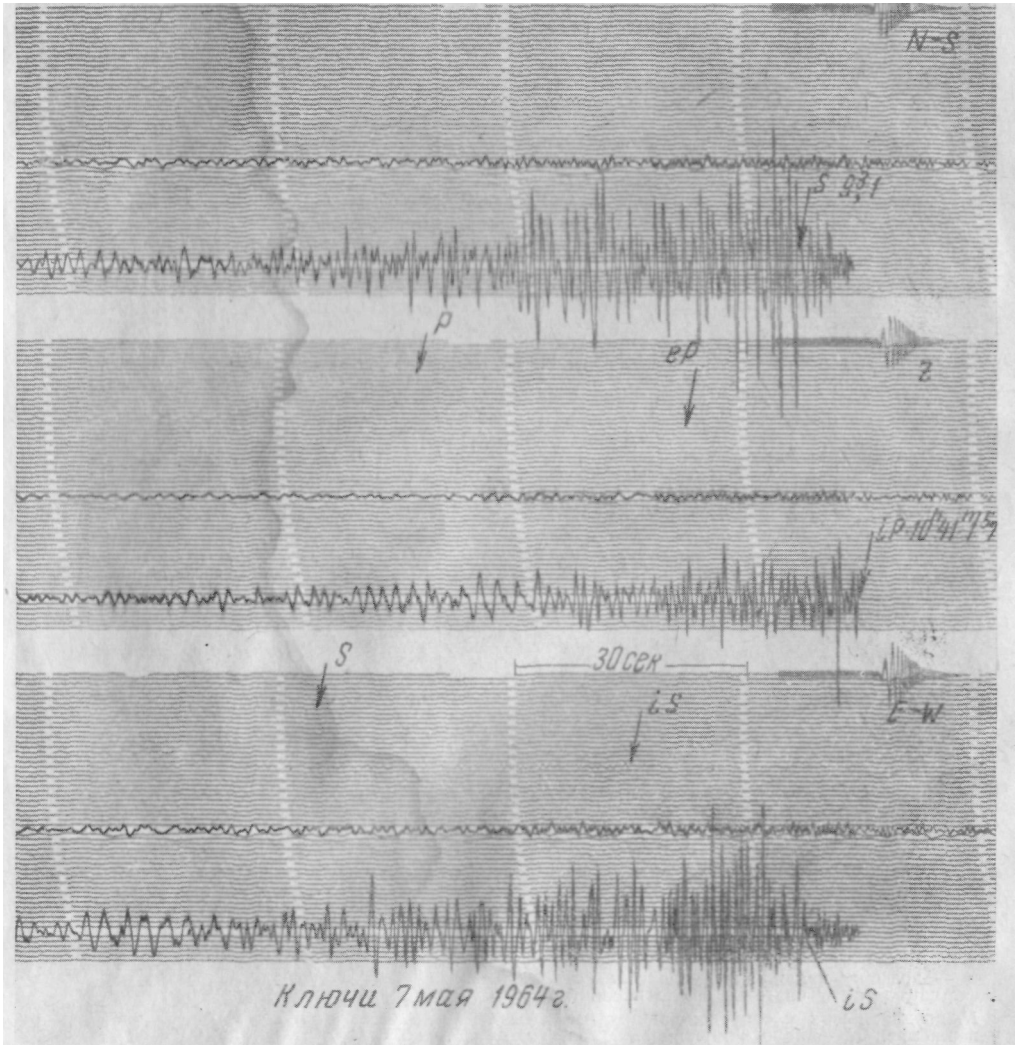


Рис. 2. Сейсмограмма вулканического землетрясения первого типа с очагом под вулканом Шевелуч. Время Гринвичское

лениями волн  $P$  и  $S$ . Поверхностные волны были достаточно интенсивными, однако их амплитуда не превосходила максимальной амплитуды волны  $S$ . Для преобладающего большинства землетрясений характерно интенсивное вступление волны  $X$ , вступающей через 2,0–2,5 сек. после вступления волны  $P$  (рис. 2). Эта волна регистрировалась на всех стан-

циях, причем  $t_x - t_p$  на всех станциях было одним и тем же. Несомненно, что эта волна возникала вблизи очага землетрясений и являлась или волной sP, или волной SP, возникающей на границе осадочного и «гранитного» слоев.

Вторая характерная особенность землетрясений в том, что в большинстве случаев регистрировалась только поперечная волна, поляризованная и вертикальной плоскости SV. На рис. 2 приведена запись такого землетрясения на сейсмостанции Ключи ( $\Delta = 45$  км, угол между составляющей N — S и направлением на вулкан  $16^\circ$ ). Отсюда в большинстве случаев в очаге землетрясений подвижки происходят и вертикальной плоскости.

Вступления продольных и поперечных волн на всех трех сейсмостанциях четкие. Разность времен  $t_s - t_p$  (средняя) на сейсмостанции Ключи 7,4 сек., на станциях Апахончич и Козыревск — 11,4 и 15,5 сек. соответственно. Если в данные сейсмостанции Апахончич ввести поправку  $\delta tp$  за превышение рельефа ( $H = 700$  м), равную — 0,4 сек, то кажущаяся скорость распространения продольных волн, рассчитанная по разности времени вступления на сейсмостанции Ключи — Апахончич, Ключи — Козыревск и Апахончич — Козыревск, во всех случаях будет равна  $6,0 \pm \pm 0,2$  км/сек. Ясно, что на всех станциях первой регистрировалась головная волна, распространяющаяся вдоль границы осадки — «гранитный» слой.

Эпицентры всех землетрясений, связанных с деятельностью вулкана Шивелуч, лежали вокруг активного кратера в пределах вулканической постройки. Очаги преобладающего большинства землетрясений располагались на глубинах менее 5 км и только в редких случаях в начальный период происходили землетрясения с глубиной очага до 10 км.

В период подготовки извержения смещения в очагах вулканических землетрясений носили сдвиговый характер и для оценки размеров очага можно было использовать метод, применяемый в сейсмологии. Используя формулы работы [7], для наиболее сильных землетрясений вулкана Шивелуч с  $K = 13$  получаем следующие характеристики очага: радиус очага  $r_0$  4200 м, величина подвижки в очаге  $l = 60$  см, максимальная амплитуда смещения на границе очага  $A = 3,6$  см. По-видимому, эти оценки лежат во вполне разумных пределах.

В качестве характеристики сейсмической активности вулкана, как и раньше [4], мы использовали частоту землетрясений  $N$  и графики приращения условных деформаций  $\epsilon_k = \sum \epsilon_i$  ( $\epsilon_i = \sqrt{E_i}$  — условная деформация,  $E_i$  — энергия  $i$ -го вулканического землетрясения данного цикла активности, выраженная в эргах). Графики сейсмической активности вулкана Шивелуч за 1964 г. приведены на рис. 1, а.

На основании сейсмологических наблюдений активность вулкана в 1964 г. можно разделить на четыре периода (см. рис. 1, а):

- 1) период пробуждения вулкана (24.I—25.VII),
- 2) период подготовки извержения (25.VII—11.XI),
- 3) пароксизм извержения (12.XI, 7 ч. 7 м.— 8 ч. 17 м. по местному времени),
- 4) период затухания активности.

Каждый период активности связан с определенными процессами, происходившими в недрах вулкана. Эти процессы, как нам представляется, можно описать следующей схемой.

Первый период активности (период пробуждения вулкана) начинается тогда, когда постепенно возрастающее давление в выводном канале

достигло такой величины, что началось частичное разрушение твердых пород. В этот период землетрясения происходят нерегулярно, отражая процесс уплотнения вещества в результате отдельных небольших подвижек. Период пробуждения вулкана закончился довольно сильным землетрясением ( $K = 11$ ), связанный, по-видимому, с разрушением лавовой пробки в глубоких частях выводного канала. После этого землетрясения начинается второй период — подготовки извержения, регулярного возрастания частоты землетрясений и графика накопления условных деформаций. В этот период, по-видимому, происходило внедрение и накопление магмы в верхней части выводного канала под старыми куполами. Непрерывное возрастание давления привело к разрушению верхней части лавовой пробки, в результате чего произошло несколько сильных землетрясений и началось извержение вулкана.

В период подготовки извержения возрастание кривой накопления условных деформаций происходило по гиперболическому закону

$$\varepsilon_k = -a \left( \frac{t_k}{T - t_k} \right),$$

где времена  $t_k$  и  $T$  выражены в сутках, а за начало отсчета принято 25.VII 1964 г.;  $\varepsilon_k$  — условная деформация накопления за время  $t_k$ . По данным наблюдений за период с 25.VII по 8.XI  $a = -0,42 \cdot 10^8 \text{ эрг}^{1/2}$ , а  $T = 107$  суток. Среднеквадратичное отклонение кривой, рассчитанной по формуле, от наблюдаемой кривой в период с 25.VII по 7.XI равно  $\pm 0,5 \cdot 10^8 \text{ эрг}^{1/2}$ . Асимптота  $\varepsilon(T)$  приходится на 10.XI, а извержение произошло через двое суток после времени  $T$ . Полученная здесь закономерность возрастания условных деформаций подобна той, которая наблюдалась перед извержениями вулкана Безымянного [4], и может использоваться для расчета времени начала извержения.

Одной из важных характеристик сейсмического режима являются графики повторяемости землетрясений, выражающие зависимость частоты землетрясений  $N$  от их энергии. Для тектонических землетрясений эта зависимость в двойном логарифмическом масштабе линейна и выражается так:  $\lg N = -\gamma K$ , причем коэффициент  $\gamma = 0,43 \pm 0,10$ .

Для вулканических землетрясений, предвзвешивших извержение вулкана Швелуч, коэффициент  $\gamma$  был рассчитан для двух периодов: 1) с 24.I по 1.XI, 2) с 2 по 9.XI. В обоих случаях  $\gamma = 0,48$ . Таким образом, перед извержением не наблюдалось изменения наклона графика повторяемости землетрясений, причем его наклон был таким же, как и при тектонических землетрясениях.

### ИЗВЕРЖЕНИЕ

Извержение вулкана Швелуч началось рано утром 12.XI, когда было еще темно.

Туча пепла, выброшенная вулканом и имевшая в начале седьмого часа высоту 1,5—2 км, к 7 ч. 20 м. достигла высоты 7—8 км, а к 7 ч. 40 м.—10—15 км. В это время туча имела форму гриба. Ее почти непрерывно прорезали молнии, слышались раскаты грома. В 8 ч. 30 м. туча начала удаляться от вулкана. К 9 час. над вулканом осталось бесформенное облако, высота которого постепенно уменьшалась. Вспышки молний стали отмечаться очень редко, а вскоре прекратились совсем. Выбросы раскаленного материала наблюдались только из поселка Ключи с 7 ч. 15 м. до 7 ч. 30 м. Раскаты грома и гул извержения были слышны в окрестных поселках на расстоянии до 160 км.

Сразу же после начала извержения пепловая туча ветром начала отклоняться на восток. К 8 ч. 20 м. она достигла пос. Усть-Камчатска, рас-

положенного в 80 км от вулкана. Из нее на поселок начал сыпаться крупным песок. Появился запах сернистого газа. К 8 ч. 30 м. пеплопад усилился, наступила полная темнота. Почти непрерывно вспыхивали молнии и слышался гром. К 10 час. выпадение вулканического песка прекратилось, но продолжалось выпадение пылевидного пепла. Толщина слоя выпавшего песка и пепла к этому времени достигла 3 см. К 10 ч. 25 м. гроза прекратилась, видимость начала постепенно возрастать и к 11 час. достиг-

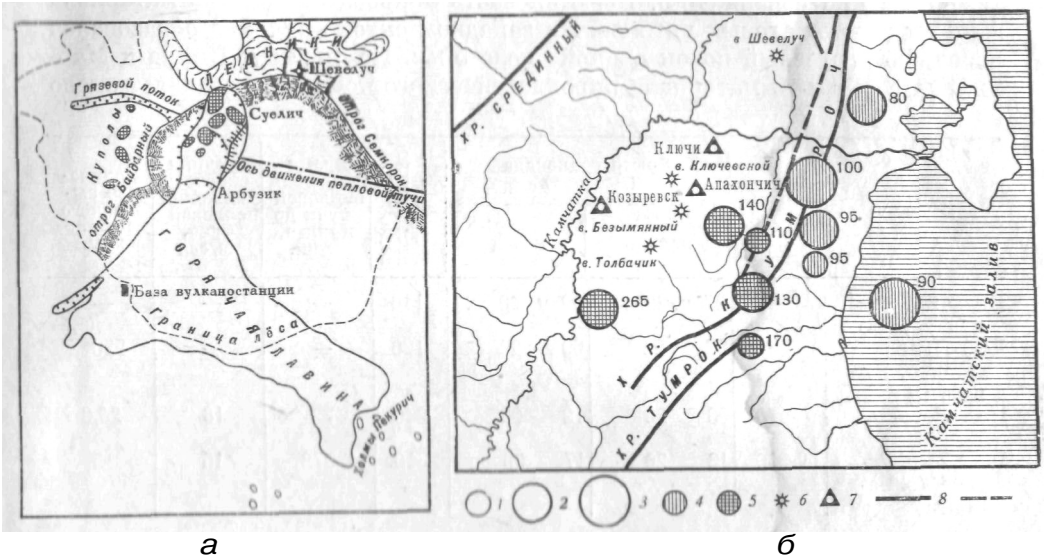


Рис. 3. Схемы пирокластического покрова, образовавшегося 12.XI.1964 г. (а) и района северной группы вулканов Камчатки (б)

На схеме б показаны эпицентры глубоких землетрясений за 1964 год. 1, 2, 3 — энергетический класс землетрясений  $K$ , равный соответственно 10, 11 и 12; 4 — очаги землетрясений с глубиной 70–100 км; 5 — с глубиной более 100 км; 6 — действующие вулканы; 7 — сейсмостанции; 8 — хребты; 9 — главные разломы. Цифры около эпицентров обозначают глубину очагов. Схема а составлена Пийпом и Мархининым [8]

ла 500 м. В 11 час. над поселком стояла сильная мгла и происходил очень слабый пеплопад. К моменту прекращения пеплопада слой выпавшего пепла в Усть-Камчатске достигал 3–4 см. По данным поселковой гидрометеостанции площадная плотность пепла составляла  $26,6 \text{ кг/м}^2$ .

Продолжая двигаться на восток, туча пепла к середине дня достигла Командорских островов. В 13 ч. 20 м. начался пеплопад в селе Никольском (о. Беринга) на расстоянии 330 км от вулкана и продолжался до 17 ч. 30 м. Пепел лег слоем 2–3 мм (сообщение зав. сейсмостанцией «Беринг» И. Т. Васильева), что составляет около  $2 \text{ кг/м}^2$ . В пос. Ключи пепел не выпадал.

Судя по сообщениям из населенных пунктов, расположенных на восток от вулкана, и пароходов, находящихся в это время в море, зона интенсивного пеплопада, где выпало пепла более  $1 \text{ кг/м}^2$ , составляет около 10 тыс. км<sup>2</sup>, а площадь, на которой отмечались пеплопады, достигает 100–150 тыс. км<sup>2</sup>. Ось зоны пеплопада проходит через вулкан Шивелуч и Ко-мандорские острова. По распределению пепла в зоне пеплопада общее количество песка и пепла, выброшенного во время извержения 12.XI 1964 г., оценивается в 0,5–1,0 млрд т. Данные о распространении пепловой тучи приведены в таблице.

Обследование, произведенное сразу же после извержения [8], показало, что взрывом: были уничтожены купол центральной вершины, купол Суелич и несколько других безымянных куполов. На их месте образовался

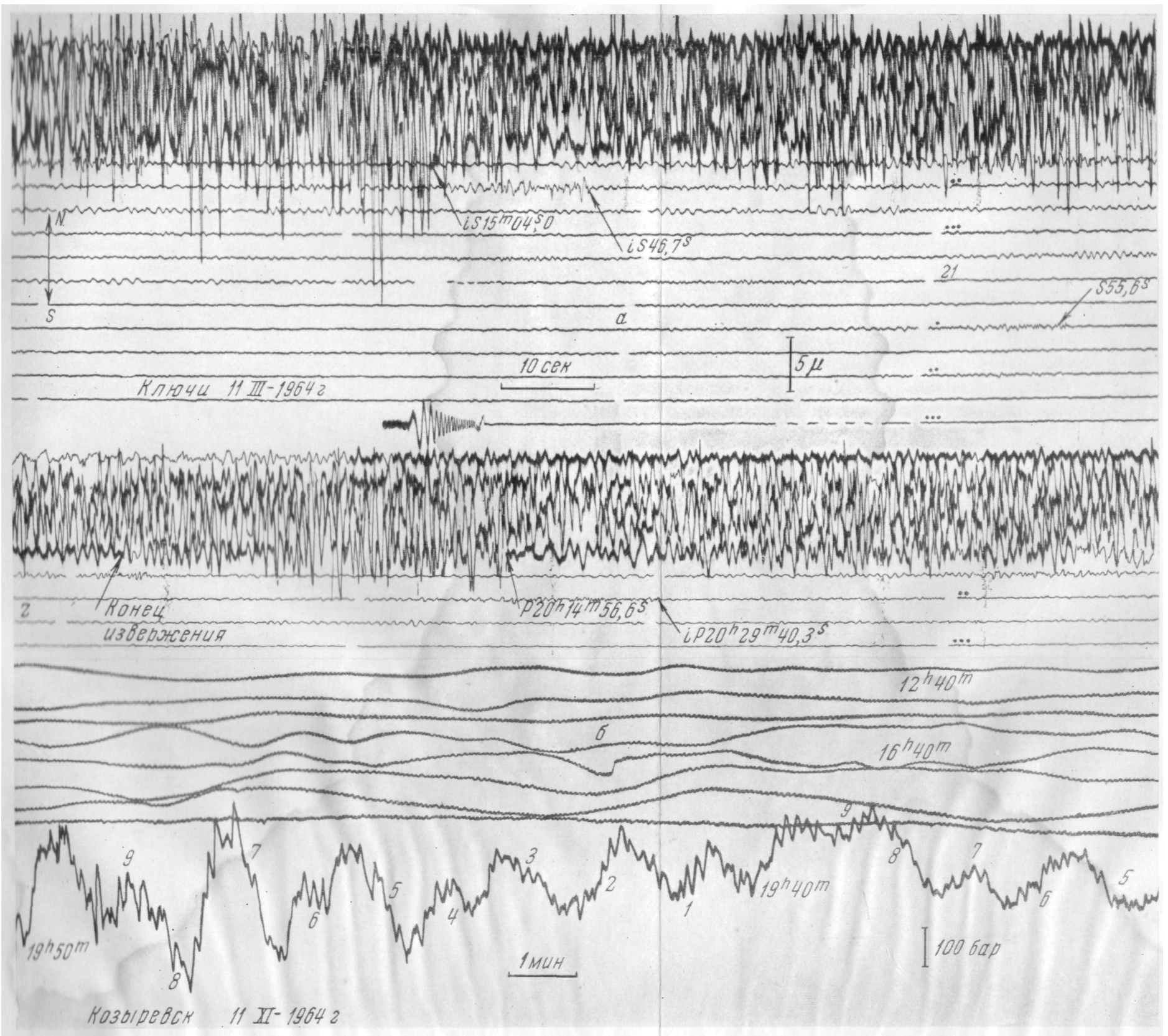


Рис.4. Сейсмограмма вулканического дрожания (а) и микробарограмма взрывов (б), сопровождавших извержение вулкана Шивелуч. Время Гринвичское

новый кратер, состоящий из двух слившихся воронок с плоским дном, диаметр каждой из которых достигает 2 км.

В результате извержения было выброшено огромное количество пирокластического материала, образовавшего пирокластический покров площадью около 70 км<sup>2</sup> и мощностью около 10 м (рис. 3, а). Максимальная длина пирокластических потоков 15—16 км. Значительная часть покрова состоит из холодного материала, слагавшего экстрозивные куполы, уничтоженные при извержении. Верхняя часть покрова состоит из материала горячих агломератовых потоков. На западном склоне вулкана образовался небольшой грязевый поток длиной около 5 км. По оценкам Пийпа и Мархинина [8], объем материала пирокластического покрова составляет около

Пункт	Расстояние от вулкана, км	Время пеплопада (местное)		Длительность пеплопада, мин.	Время движения пепловой тучи до пункта, мин.	Средняя скорость движения пепловой тучи, м/сек	Количество выпавшего пепла, кг/м <sup>2</sup>
		начало	конец				
Вулкан Швелуч	0	07 ч. 08 м.	09 ч. 00 м.	110			
Восточный склон в. Швелуч	10	07 20	09 20	120			250
Пос. Усть-Камчатск	80	08 20	12 00	240	72	18	26,6
Пос. Никольское (о. Беринга)	330	13 20	17 30	310	372	15	2

0,8 км<sup>3</sup>, или около 1,6 млрд. г. Таким образом, объем всего материала, выброшенного при извержении, составляет 1,0—1,3 км<sup>3</sup>, или около 2,0—2,6 млрд. т, 0,6—0,9 км<sup>3</sup> из которого составляет материал, поступивший из глубин Земли.

Взрывы, происходившие в кратере вулкана, возбуждали интенсивные воздушные волны, которые были зарегистрированы барографами метеостанций на расстоянии до 400 км, а микробарографами — на расстоянии нескольких тысяч километров. Извержение также сопровождалось интенсивным непрерывным вулканическим дрожанием, зарегистрированным всеми сейсмическими станциями Камчатки. Образцы микробарограмм и сейсмограмм вулканического дрожания приведены на рис. 4, а графики распределения во времени энергии воздушных волн и вулканического дрожания — на рис. 1, б.

По данным микробарограмм и сейсмограмм пароксизмально извержение вулкана Швелуч началось в 7 ч. 7 м. по местному времени и закончилось в 8 ч. 17 м. Длительность его 70 мин. После окончания пароксизмальной фазы извержения в течение нескольких дней в кратере вулкана изредка происходили небольшие взрывы и возникали небольшие раскаленные лавины, а также отмечались слабые землетрясения.

По записям воздушных волн микробарографами и барографами метеостанций Камчатки видно, что при извержении вулкана Швелуч 12.XI.1964 г., в отличие от извержения вулкана Безымянного 31.III.1956 г., не было одного главного взрыва, разрушившего старую постройку, а произошла серия взрывов, непрерывно следующих один за другим. По распределению во времени энергии воздушных волн и вулканического дрожания извержение можно разделить на четыре фазы.

В первую фазу извержения (19 ч. 07 м.— 19 ч. 20 м.) происходили слабые взрывы, энергия которых не превосходила 10<sup>17</sup> эрг. В этот период,

по-видимому, разрушилась лавовая пробка, закупоривающая выводной канал вулкана, и частично высвободились газы, заключенные в магме.

Во вторую фазу извержения (19 ч. 20 м.— 19 ч. 47 м.) сила взрывов непрерывно возрастала. Происходили разрушение лавовой пробки, выброс холодного материала из кратера вулкана и образование покрова холодного агломератового материала. Этот период сопровождался слабым вулканическим дрожанием.

В третью фазу извержения (19 ч. 47 м.— 20 ч. 15 м.) — собственно пароксизм извержения — происходило изливание горячих агломератовых потоков и выброс огромного количества раскаленного песка и пепла. Эта фаза извержения сопровождалась наиболее интенсивным вулканическим дрожанием. В конце третьей фазы извержения отмечено несколько сильных землетрясений с  $K = 10 - 11$ , связанных, по-видимому, с обрушением стенок выводного канала, в результате чего произошла закупорка выводного канала. Последнее такое землетрясение с  $K = 11,5$  наблюдалось в 20 ч. 15 м. 11.XI по Гринвичу (в 8 ч. 15 м. 12.XI по местному времени).

В четвертую фазу извержения происходило резкое уменьшение энергии взрывов и интенсивности вулканического дрожания, которое полностью прекратилось к 20 ч. 30 м. 11.XI по Гринвичу.

Если считать, что весь холодный материал ( $8 - 10^{14}$  г) был выброшен во вторую фазу извержения, т. е. в течение 27 мин., то скорость извержения материала составит  $5 - 10^{11}$  г/сек. или 500 тыс.  $m$  в секунду. Аналогичные расчеты показывают, что скорость твердения горячего материала ( $m = 1.6 \cdot 10^{13}$  г,  $\Delta t = 28$  мин.) составляет  $10^{12}$  г/сек, или  $10^6$   $m$ /сек. Если предположить, что диаметр выводного канала равен 400 м на всем протяжении, то последние порции извергнутой магмы поднялись с глубины 6—7 км.

В 1964 г. в районе северной группы вулканов Камчатки зарегистрировано 10 глубокофокусных землетрясений, очаги которых лежат в фокальном слое, причем 8 из них произошли в интервале времени  $\pm 1,5$  месяца от момента извержения вулкана Шивелуч (рис. 3, б) [9]. Такое распределение, по-видимому, не случайно и указывает на связь извержения вулкана Шивелуч с тектоническими процессами, происходящими в верхней мантии в радиусе около 300 км от активного кратера вулкана [10].

### ЭНЕРГИЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ

В процессе извержения и во время его подготовки вулкан выносит огромное количество энергии с глубины Земли. Часть этой энергии расходуется на продвижение магмы по выводному каналу, а часть выносится на поверхность Земли. Произведем оценку величины различных видов энергии, связанной с извержением вулкана Шивелуч 12.XI 1964 г. Количество выброшенного при извержении холодного материала составляет  $m_1 = 8 \cdot 10^{14} \pm 4 \cdot 10^{14}$  г, количество горячего агломератового материала  $m_2 = 8 \cdot 10^{14} \pm 4 \cdot 10^{14}$  г, а количество выброшенного песка и пепла  $m_3 = 8 \cdot 10^{14} \pm 4 \cdot 10^{14}$  г. Примем первоначальную температуру магмы  $1000 \pm 200^\circ \text{C}$ , а конечную —  $0^\circ \text{C}$ , т. е. изменение температуры  $\Delta T = 1000 \pm 200^\circ \text{C}$ . Будем также считать, что газы (в основном пары воды), выделяющиеся из магмы при извержении, составляют  $3 \pm 2\%$  ее веса, а их масса  $m_4 = 5 \cdot 10^{13} \pm 3 \cdot 10^{13}$  г. Примем также, что очаг, питающий магмой вулкан, лежит на глубине  $H = 30 \pm 20$  км, средняя высота подъема песка и пепла  $h = 7,5 \pm 2,5$  км, а среднее расстояние, на которое выброшен холодный и горячий агломератовый материал,  $S = 7,5 \pm 2,5$  км.

Удельную теплоемкость магмы и водяного пара примем равной  $C_v = 0.3 \pm 0,1$  кал/г  $\cdot$  град.

Энергия перемещения магмы с глубины  $H$  на поверхность Земли (без учета трения о стенки выводного канала)

$$E_1 = (m_2 + m_3)gH = 5 \cdot 10^{24} \text{ эрг.}$$

Энергия, затрачиваемая вулканом на разрушение твердых пород, окружающих выводной канал и слагающих лавовую пробку вулкана, может быть рассчитана по энергии упругих волн, возникающих в момент разрушения. Предполагается, что при землетрясениях в энергию упругих волн переходит от 0,1 до 1,0% полной энергии, выделяемой очагом землетрясения. Для вулканических землетрясений примем среднее значение 0,5%.

За время подготовки извержения вулкана Шевелуч произошло 479 землетрясений, суммарная энергия которых  $2 \cdot 10^{20}$  эрг. Следовательно, при принятых предположениях полная энергия, затраченная на разрушение,

$$E_2 = 4 \cdot 10^{22} \text{ эрг.}$$

Точность оценки 1,0 — 1,5 порядка.

Тепловая энергия, вынесенная на поверхность Земли магмой

$$E_3 = (m_2 + m_3)Cv\Delta T = 2 \cdot 10^{25} \text{ эрг.}$$

Энергия вулканического дрожания, сопровождавшего извержение, рассчитывалась по методу, описанному в работе [4], и равна

$$E_4 = 10^{17} \text{ эрг.}$$

Точность оценки — один порядок.

Энергия воздушных волн, сопровождавших извержение, определялась по их записи микробарографами и барографами метеостанций Камчатки по формуле, приведенной в работе [11]. При этом получены следующие результаты. Энергия воздушных волн, определенная по микробарограммам сейсмостанций Ключи и Козыревск, соответственно равна  $7 \cdot 10^{19}$  и  $9 \cdot 10^{19}$  эрг, а по записи микробарографа на расстоянии 2000 км —  $5 \cdot 10^{18}$  эрг. Энергия, определенная по записям барографов метеостанций Усть-Камчатск, Ключи и Козыревск, соответственно равна  $8 \cdot 10^{19}$ ,  $2 \cdot 10^{20}$  и  $10^{20}$  эрг. За энергию воздушных волн примем значение  $E_5 = 2 \cdot 10^{20}$  эрг. Точность оценки — один порядок.

Энергия адиабатически расширяющихся газов, заключенных в магме, равна

$$E_6 = m_4 Cv \Delta T = 6 \cdot 10^{23} \text{ эрг.}$$

Энергия, затраченная на подъем песка и пепла на высоту  $h = 7,5$  км, равна

$$E_7 = m_5 gh = 6 \cdot 10^{23} \text{ эрг.}$$

Энергия, затраченная на переброску холодного материала на расстояние  $S = 7,5$  км, равна

$$E_8 = m_6 gS = 6 \cdot 10^{23} \text{ эрг.}$$

Отсюда следует, что начальная скорость выброса холодного материала составляла около 400 м/сек (при расчете сопротивление воздуха не учитывалось), а давление газов в момент взрыва было приблизительно 1600 атм. Точно такое же количество энергии было затрачено на перемещение горячего агломератового материала.

Заметим, что энергия на перемещение магмы с глубины на поверхность Земли и на разрушение пород расходуется за счет ресурсов энергии магматического очага, а все остальные виды энергии ( $E_4 - E_8$ ) — за счет тепловой энергии магмы, извергнутой на поверхность Земли, т. е. за счет

энергии  $E_3$ . Общее количество энергии, затраченной вулканом на рассматриваемое извержение, равно

$$E = (E_1 + E_2) + E_3 = 2,5 \cdot 10^{25} \text{ эрг},$$

причем 20% энергии затрачено на перемещение магмы по выводному каналу и 80% вынесено на поверхность Земли. Часть энергии, вынесенной на поверхность Земли, расходуется на возбуждение воздушных волн и на перемещение извергнутого вещества, а часть остается в виде тепловой энергии, заключенной в извергнутом веществе. Произведенные оценки показывают, что на перемещение извергнутого вещества затрачивается 36% энергии, которая только на одну треть покрывается за счет энергии расширяющихся газов, а остальные 24% покрываются за счет тепловой энергии, заключенной в магме. На возбуждение воздушных волн затрачено только 0,001% энергии, или около 0,03% энергии расширяющихся газов. Так как все затраты энергии на перемещение извергнутого вещества покрываются за счет тепловой энергии, выносимой веществом на поверхность Земли, то среднее понижение его температуры должно составлять около 36%, т. е. температура извергнутого вещества должна в среднем снизиться с 1000 до 640°. Энергия землетрясений в общем энергетическом балансе извержения составляет ничтожную величину — около 0,001%.

Извержение вулкана Шевелуч относится к катастрофическим. По энергии и по количеству извергнутого материала оно только в два раза уступает извержению соседнего вулкана Безымянного в 1956 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извержение вулкана Шевелуч 12.XI.1964 г. относится к числу гигантских извержений. За время извержения, продолжавшегося 70 мин., было выброшено около 0,4 км<sup>3</sup> холодного и около 0,8 км<sup>3</sup> горячего материала. Энергия, вынесенная вулканом на поверхность Земли, составляет около  $2 \cdot 10^{25}$  эрг. Скорость извержения горячего материала составляла около 10<sup>6</sup> м/сек.

Извержение предварялось множеством вулканических землетрясений, которые начали отмечаться за 10,5 месяцев до извержения. Нарастание условных деформаций перед извержением происходило по гиперболическому закону. Организованные постоянные наблюдения за сейсмическим режимом вулкана позволили непрерывно следить за его состоянием и предвидеть извержение. По данным сейсмограмм и микробарограмм удалось проследить ход извержения. Отмеченное усиление сейсмической активности в фокальном слое в районе Северной Камчатки на глубинах 70—250 км указывает на связь извержения вулкана Шевелуч с движениями в верхней части оболочки Земли.

Академия наук СССР  
Сибирское отделение  
Институт вулканологии

Поступила  
16 VII 1966

### Литература

1. Влодавец В. И., Пийп Б. И. Каталог действующих вулканов Камчатки. Бюлл. Вулканологической станции АН СССР, № 25, 1957.
2. Гущенко И. И. Пеплы северной Камчатки и условия их образования. Изд-во «Наука», 1965.
3. Токарев П. И. Сейсмические наблюдения на Камчатской вулканологической станции в 1958 г. Бюлл. Вулканологической станции АН СССР, № 33, 1962.

4. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы вулканов в 1949—1963 гг. Изд-во «Наука», 1966.
5. Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 9, 1964.
6. Токарев П. И. Рой землетрясений вулкана Швелуч в мае 1964 г. Бюлл. Вулканологических станций, № 38, «Наука», 1964.
7. Бунэ В. И. и др. Методы детального изучения сейсмичности. Тр. Ин-а физики Земли АН СССР, № 9, 1960.
8. Пийп Б. И., Мархинин Е. К. Гигантское извержение вулкана Швелуч 12 ноября 1964 года. Бюлл. Вулканологических станций, № 39. Изд-во «Наука», 1965.
9. Токарев П. И. Сейсмичность района северной группы вулканов Камчатки в 1964 г. Бюлл. Вулканологических станций, № 41. Изд-во «Наука», 1966.
10. Токарев П. И. О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне. Тр. Лаборатории вулканологии АН СССР, вып. 17, 1959.
11. Токарев П. И. Регистрация взрывов Ключевского вулкана в 1962 г. Бюлл. Вулканологических станций, № 37. Изд-во «Наука», 1964.