

УДК 551.21; 550.34

ТОКАРЕВ П. И.

ПРОГНОЗ ПОБОЧНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ

PREDICTION OF KLYUCHEVSKOI PARASTIC ERUPTIONS, by Tokarev P. I. In the 20th century, parasitic eruptions of Klyuchevskoi volcano have been recorded in 1932, 1938, 1945, 1946, 1951, 1953, 1956, 1966, 1974, 1980, and 1983. Seismological observations in the region of the volcano have been carried out since 1947. A swarm of volcanic earthquakes occurred before each eruption, 3—13 days in advance.

The place and time of the parasitic eruption of March 8, 1983 was predicted 4 days in advance. From 1932 to 1983 a gradual increase in the altitudes of bocca from lateral craters was observed. The higher the site of a bocca from the lateral crater, the weaker the precursors of seismic phenomena. The next parasitic eruption is expected to occur with a probability 2/3 between May 1989 and Nove mber 1994 at an altitude of 3100 ± 800 m a. s. l., it will last for about 2.5 months, the magma flow rate during the eruption will be about $2 \cdot 10^4$ kg/s, and the mass of lava, about 10^{11} kg.

(Received December 16, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Division, USSR Academy of Sciences, Petroplovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Введение

Достаточно полные сведения о побочных извержениях вулкана Ключевской имеются только с 1932 г. Первая сейсмическая станция, расположенная вблизи вулкана, начала работать в 1947 г.; с тех пор непрерывные наблюдения ведутся до настоящего времени (январь 1987 г.). В рассматриваемый период (1932—1986 гг.) побочные извержения происходили в 1932, 1938, 1945, 1951, 1953, 1956, 1966, 1974, 1980 и 1983 гг. Для извержений 1951—1983 гг. существуют данные о предвалявших и сопровождавших их вулканических землетрясениях. Для извержений 1974—1991 гг. был дан долгосрочный прогноз. Место и время извержения в марте 1983 г. были предсказаны по оперативным сейсмологическим данным за четыре дня до его начала.

Приведенные в работе сведения об извержениях 1932—1953 гг. взяты из работ [8—12], а за последующие годы — из работ коллег-вулканологов, с которыми автор работал на Камчатке в 1954—1986 гг. [2—6, 24]. Все сейсмологические данные за 1951—1986 гг. получены автором путем личных наблюдений и при обработке сейсмограмм и каталогов, которые хранятся в архиве Института вулканологии ДВО [13, 18].

Анализ вулканических и сейсмических явлений позволил установить некоторые закономерности и дать долгосрочный прогноз побочных извержений на ближайшие годы.

Характеристика извержений

Полигенный центральный стратовулкан Ключевской, расположенный в северной части цепи камчатских вулканов, представляет собой правильный конус, сложенный из лавовых потоков, шлаков, пепла и льда, с вершинным кратером диаметром около 600 м и глубиной 100—300 м. Высота вулкана около 4750 м. Извержения происходят в центральном

Основные сведения о побочных извержениях вулкана Ключевской в 1932—1986 гг.

Дата начала извержения t_b ; число, месяц, год	Побочный кратер	Аз°	r , км	H , км	τ_b , сут	$K_b^{T_{65}}$	α , кг/с	L , км
25.I.1932	Туйла	30	20,0	0,5	318	11,1	$4,4 \cdot 10^3$	4
07.II.1938	Билукай	85	11,4	0,95	395	11,8	$1,8 \cdot 10^4$	16
19.VI.1945	Юбилейный	135	10,2	1,1	19	11,0	$6,0 \cdot 10^4$	5,1
23.X.1946	Апахончич	131	6,8	1,5	29	10,6	$1,6 \cdot 10^4$	10
20.XI.1951	Былинкиной	60	13,0	0,9	10,8	10,2	$1,6 \cdot 10^4$	1
12.VI.1953	Белянкина	35	10,6	1,4	12,3	10,6	$3,4 \cdot 10^4$	5
27.VII.1956	Вернадского, Крыжановского	135	8,4	1,5	4,2	9,6	$1,1 \cdot 10^4$	1
6.X.1966	Имени Пийпа	19	8,0	1,8	83	11,4	$3,6 \cdot 10^4$	10
23.VIII.1974	Имени IV ВВС	251	2,4	3,4	102	10,7	$5,8 \cdot 10^3$	2
5.III.1980	Имени 8 Марта	57	6,9	1,8	7,0	8,8	$1,0 \cdot 10^3$	1,1
8.III.1983	Предсказанный	75	3,3	2,9	112	11,3	$1,8 \cdot 10^4$	4
Среднее		76	9,2	1,6	99	10,6	$2,0 \cdot 10^4$	5,7
σ_{n-1}		44	4,8	0,9	128	0,9	$1,7 \cdot 10^4$	4,6

Примечание. t_b и τ_b — даты начала и продолжительности извержений (время местное); Аз, r и H — азимут и расстояние от центрального кратера, высота места излияния лавы над уровнем моря; $K_b^{T_{65}}$ — класс извержения; α — средний расход магмы во время извержения; σ — коэффициент explosивности; L — длина лавового потока. Среднее по Аз взято без 1974 г.

Таблица 2

Основные сведения о роях вулканических землетрясений II и III типов, предвзварающих побочные извержения Ключевского вулкана в 1951—1986 гг.

Дата начала роя, t_c ; число, месяц, год	Побочный кратер	τ_c , сут	E_c , Дж	W_c , Вт	K_{cm}	$N_{K \geq 7}$	V_r , м/ч	m/E_c , кг/Дж
14.XI.1951	Былинкиной	5	$4,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^5$	9,8	414	108	0,32
6.VI.1953	Белянкина	7	$6,3 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^5$	10,8	39	63	0,57
23.VII.1956	Вернадского и Крыжановского	5	$2,3 \cdot 10^{10}$	$5,3 \cdot 10^4$	10,2	15	70	0,17
2.X.1966	Имени Пийма	4	$8,9 \cdot 10^{10}$	$7,6 \cdot 10^5$	10,6	18	83	2,92
4.VIII.1974	Имени IV ВВС	7	$3,3 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^2$	8,2	3	14	155
22.II.1980	Имени 8 Марта	13	$1,3 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^3$	8,8	16	22	0,39
28.II.1983	Предсказанный	9	$7,6 \cdot 10^8$	$9,8 \cdot 10^2$	8,3	5	46	237
Среднее		7,1	$2,8 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^4$	9,5	—	58	—
σ_{n-1}		3,1	$3,3 \cdot 10^{10}$	$9,4 \cdot 10^4$	1,1	—	33	—

Примечание. t_c и τ_c — даты начала и заглаговременности роя; E_c — энергия землетрясений роя; W_c — сейсмическая мощность роя; K_{cm} — максимальный энергетический класс роя землетрясений; $N_{K \geq 7}$ — число землетрясений роя с $K \geq 7,0$; V_r — кажущаяся скорость перемещения магмы; m/E_c — отношение массы магмы к сейсмической энергии.

кратере и из побочных одноактных кратеров, периодически возникающих на его склонах и у подножия конуса. Магма обоих типов извержений — андезитобазальт. Вулкан Ключевской — самый активный вулкан Курило-Камчатской вулканической дуги, коэффициент его активности $k_a \approx 0,5$.

Побочные извержения Ключевского вулкана происходят из трещин или отдельных центров, возникающих на склонах конуса и у его подножия на высотах от 500 до 4000 м над уровнем моря и на удалении до 25 км от центрального кратера. Эти извержения обычно начинаются эксплозиями, а затем происходят излияния лавы. В некоторых случаях по радиальной трещине возникает последовательно сверху вниз ряд эксплозивных воронок и из самой нижней изливается лава. Вокруг этого центра возникает шлаковый конус, высота которого может достигать

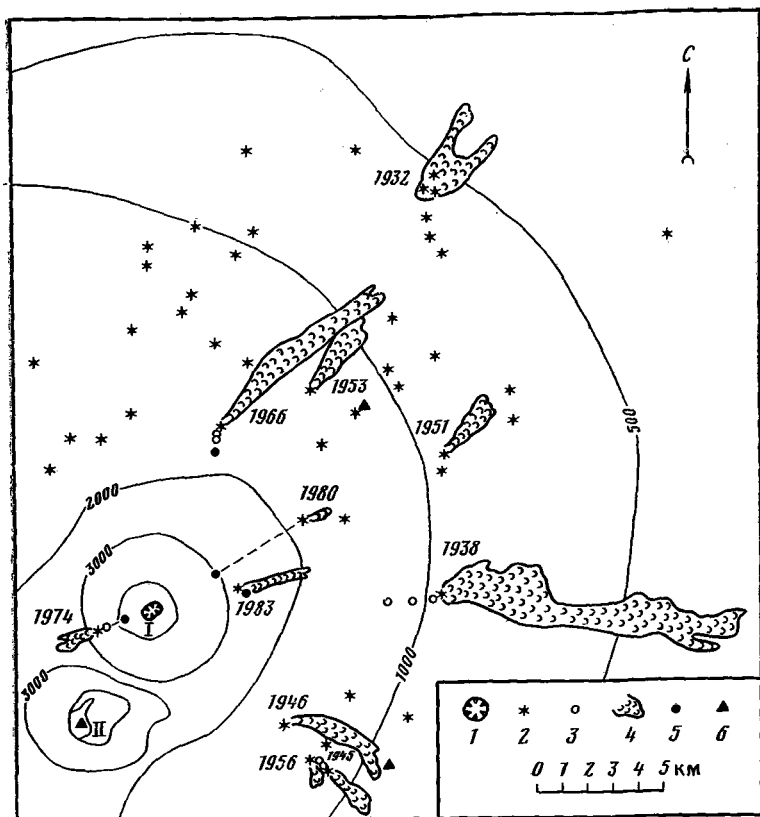


Рис. 1. Схема расположения побочных кратеров Ключевского вулкана, возникших в 1932—1986 гг., и некоторых древних шлаковых конусов. Вулканы: 1 — Ключевской; II — Камень, 1 — Центральный кратер Ключевского вулкана; 2—4 — шлаковые конусы, воронки взрывов и лавовые потоки побочных извержений соответственно (цифры означают год начала извержения); 5 — центры эпицентров роя вулканических землетрясений, предвещающих извержения; 6 — сейсмические станции

50—200 м. При извержениях преобладают излияния лавы. Коэффициент эксплозивности k_e обычно не превышает 0,25. Коэффициент активности побочных извержений в 1932—1986 гг. $k_a = 0,054$. Сейсмостанция в пос. Ключи, организованная в 1947 г., регистрировала перед всеми побочными извержениями рой вулканических землетрясений (II и III типов) [14]. Ниже дано краткое описание побочных извержений, показанных на рис. 1; основные вулканические и сейсмические характеристики извержений приведены в табл. 1 и 2¹. Однотипные характеристики при буквенном обозначении имеют индексы: В — вулканическая, С — сейсмическая.

Туйла, 1932 г. Извержение началось 25 января и происходило последовательно, с небольшими перерывами, из трех близко расположенных центров почти в течение всего 1932 г. Извержение каждого центра началось эксплозиями, а затем через 1—2 нед изливались лавовые потоки. Столб черного дыма в момент прорыва поднимался на высоту до 12 км. Длина потоков составляла 4,0, 3,4 и 1,4 км; их суммарная площадь — 3,7 км²; суммарный объем — $4,4 \cdot 10^7$ м³. Перед прорывом кратеров в пос. Ключи (в 16 км от места прорыва) ощущалось много землетрясений,

¹ Некоторые расхождения цифровых данных в табл. 1 и 2 с данными, приводимыми в других работах, связаны с тем, что автор брал их из различных первоисточников. Однако эти расхождения находятся в пределах ошибок измерения величин и не влияют на полученные результаты.

особенно в августе и сентябре 1931 г. После начала извержения землетрясения прекратились. Извержение подробно описано в работе [11].

Билюкай, 1938 г. На фоне эксплозивного извержения центрального кратера, продолжавшегося от апреля 1937 г. до весны 1939 г., в ночь с 6 на 7 февраля 1938 г. без каких-либо заметных предварительных явлений, прорвалась группа побочных кратеров, протянувшихся по образующей конуса вулкана Ключевской от высоты 1800 м до 900 м. Верхние воронки были взрывными, а из трех нижних наряду с эксплозиями излились лавовые потоки. Самый нижний кратер действовал в течение 1 года. Вокруг него образовался шлаковый конус высотой около 200 м. Объем продуктов извержения составил около $2,6 \cdot 10^8$ м³. Пепловая туча во время извержения иногда поднималась над кратером на высоту до 4 км [8, 11, 12].

Юбилейный, 1945 г. 19 июня 1945 г. в пос. Ключи ощущался резкий сейсмический толчок, а около 2 час. ночи 20 июня было замечено облако нового извержения у подножия Ключевского вулкана. В течение нескольких дней образовалась цепочка взрывных воронок, протянувшихся от центрального кратера по азимуту 135° почти на 2 км. Через 5 дней взрывы происходили только в нижних воронках, из самой нижней изливался лавовый поток. В начальную стадию извержения пепловая туча поднималась на высоту до 7 км. В результате извержения было излито около $3 \cdot 10^7$ м³ лавы и выброшено $2,3 \cdot 10^3$ м³ тефры [11].

Апаханчи, 1946 г. Без каких-либо предупреждающих явлений при умеренной фумарольной деятельности центрального кратера в течение двух предшествующих месяцев 23 октября 1946 г. началось извержение нового побочного кратера. Центральный кратер вулкана все время находился в состоянии умеренной фумарольной деятельности. Высота облаков взрыва иногда достигала 4—5 км. На месте прорыва возник шлаковый конус с диаметром основания около 300 м и высотой 100 м. Объем излившейся лавы составил $1,5 \cdot 10^7$ м³, объем тефры — $7 \cdot 10^5$ м³ [8, 12].

Былинкиной, 1951 г. С 14 ноября 1951 г. в пос. Ключи отмечался рой землетрясений. После длительного покоя (с октября 1946 г.) 19 ноября произошло кратковременное извержение центрального кратера вулкана Ключевской, а в 5 час. утра 20 ноября началось извержение побочного кратера. Вначале оно было эксплозивным, пепловая туча поднималась на высоту до 5 км. Затем излился лавовый поток, объем лавы составил $5 \cdot 10^6$ м³, тефры — $2,5 \cdot 10^6$ м³ [9, 12]. Центральный кратер после 19 ноября все время был в состоянии покоя.

Белянкина, 1953 г. С 6 июня отмечался рой землетрясений, а 7 июня началось извержение центрального кратера вулканического типа. В ночь с 12 на 13 июня образовался новый побочный кратер. В первые четыре дня извержение было эксплозивным, туча пепла поднималась на высоту 2 км над кратером, а затем излился лавовый поток. Объем лавы — $1,4 \cdot 10^7$ м³, тефры — $1 \cdot 10^6$ м³. Прорыв побочного кратера предварялся роем вулканических землетрясений [10, 12].

Вернадского и Крыжановского, 1956 г. 27 июля вблизи Юбилейного прорыва прорвались два новых побочных кратера, из которых излились лавовые потоки длиной 0,5 и 1,0 км, объем их лав составил $1,6 \cdot 10^6$ м³. В это же время (27 июля — 2 августа) в центральном кратере произошло пепловое извержение. Побочное извержение предварилось роем вулканических землетрясений [2].

Имени Пийпа, 1966 г. После роя вулканических землетрясений [22], утром 6 октября, началось извержение побочного кратера. Сначала происходили довольно сильные взрывы, в результате которых образовалась цепочка взрывных воронок, протянувшаяся вниз по склону вулкана почти на 2 км. Вечером 6 октября из нижней воронки началось излияние лавы, продолжавшееся до конца года. Объем лавового потока составил около 10^6 м³, объем рыхлых продуктов — около 10^7 м³. Во время изверже-

ния бомбы выбрасывались на высоту до 1 км, пепловая туча поднималась до 5,5 км над уровнем моря. Извержение вулканостромболианского типа, начавшееся в 1965 г. в центральном кратере вулкана Ключевской, продолжалось в течение 1966 г. и заметно уменьшилось сразу же после начала побочного извержения [6].

Имени IV Всесоюзного вулканологического совещания (IV ВВС), 1974 г. Извержение началось 23 августа и продолжалось до 1 декабря. Вначале происходило эксплозивное извержение на склоне вулкана кратера, расположенного на высоте 3600 м над уровнем моря, а затем ниже по склону на высоте 3400 м образовался новый кратер, из которого изливалась лава и происходили взрывы. Лава, двигаясь по склону, уходила в ледник. Видимая часть лавового потока имела длину 2,5 км, объем излившейся лавы оценивался в $2 \cdot 10^7$ м³, а тефры — около $1,3 \cdot 10^6$ м³. Извержение предварялось роем вулканических землетрясений. Побочное извержение происходило на фоне умеренной парогазовой деятельности центрального кратера Ключевского вулкана [5].

Имени 8 Марта, 1980 г. В период с 5 по 12 марта произошло спокойное излияние лавовых потоков из трещин, образовавшихся на северо-восточном склоне Ключевского вулкана на высоте около 1800 м над уровнем моря. Было излито $3,1 \cdot 10^6$ м³ лавы. Длина лавового потока составила 1,1 км. Извержение предварялось роем вулканических землетрясений и происходило на фоне умеренного извержения центрального кратера вулкана [3, 4].

Предсказанный, 1983 г. 8 марта на высоте 2900 м над уровнем моря на склоне Ключевского вулкана образовался новый побочный кратер, из которого излился лавовый поток [24]. Извержение происходило из одного центра, сопровождалось слабыми взрывами. Объем лавы составил около $7 \cdot 10^7$ м³. Место и время начала извержения были предсказаны автором по рою предварявших вулканических землетрясений [19]. Это был первый краткосрочный прогноз побочного извержения Ключевского вулкана, и поэтому прорыв был назван «Предсказанным». Перед началом извержения отмечалась довольно высокая активность центрального кратера [13, 19, 24].

Вулканические характеристики побочных извержений (см. табл. 1; рис. 2).

Место извержения определяется азимутом (Az°) и расстоянием (r , км) от центрального кратера. Ошибки в определении азимута не превосходят 2° , определении расстояния — 1 км. В 1932—1986 гг. все извержения, за исключением одного (1974), произошли в восточном секторе вулкана в пределах азимутов $19-135^\circ$ и расстояний — 2,4—20 км (см. рис. 1, табл. 1). При рассмотрении зависимости места извержения от даты извержения (t) было обнаружено, что на протяжении 50 лет, с 1932 до 1983 г., место извержения постепенно приближалось к центру вулкана по закону: $r = -0,23 (t - 1930) + 15,3$ км (см. рис. 2). Уровень значимости коэффициентов равен 0,01. Какой-либо зависимости между азимутом и датой извержения не обнаружено.

Высота места прорыва побочных кратеров (H , км), начиная с 1932 г., со временем постепенно возрастала по закону: $H = 42,55 (t - 1930) + 480$ м. Уровень значимости коэффициентов уравнения равен 0,001. На рис. 2 точки минимальных и максимальных высот прорыва побочных кратеров ограничены пунктирными линиями $H_1 = (1 - 0,5) H$ и $H_2 = (1 + 0,5) H$. Ошибка определения высоты не более 100 м.

Масса магмы при извержении m , кг. Точность измерения m — 0,3 порядка. Суммарная масса магмы побочных извержений ($\sum m$) в период 1939—1986 гг. возрастала линейно по закону: $\sum m = 14,08 (t - 1930) - 120 \cdot 10^9$ кг. Уровень значимости коэффициентов уравнения равен 0,001. Из этого следует, что в период с 1939 по 1983 г. поступление магмы на

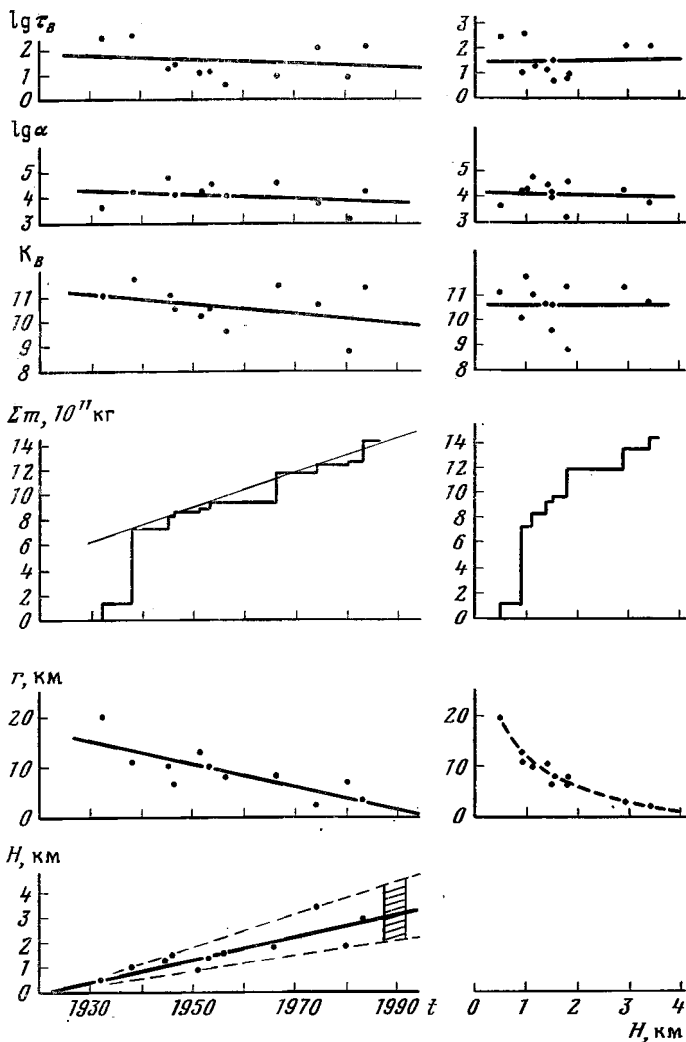


Рис. 2. Зависимость характеристик побочных извержений Ключевского вулкана от времени t и высоты места прорыва H над уровнем моря. r — расстояние места прорыва от центра кратера; m — масса магмы при извержении; K_b — класс извержения; α — расход магмы при извержении; τ_b — продолжительность извержения в сутках

поверхность земли при побочных извержениях происходило в среднем равномерно (см. рис. 2), и расход вулкана составил $1,4 \cdot 10^{10}$ кг/год = 450 кг/с.

Класс извержения K_b определяется как десятичный логарифм из массы магмы при извержении m , выраженной в килограммах ($K_b = \lg m$). Исследование зависимости $K_b(t)$ и $K_b(H)$ показало, что класс извержения не зависит ни от даты извержения (t), ни от высоты места прорыва (см. рис. 2). Средние значения K_b приведены в табл. 1.

Расход магмы при извержениях, $\alpha = m/\tau_b$ (кг/с) не зависит ни от даты извержения, ни от высоты места прорыва побочного кратера (см. рис. 2). Значения α при извержениях 1932—1983 гг. приведены в табл. 1. Расход магмы вулкана Ключевской через побочные кратеры за 1932—1986 гг. равен 890 кг/с, а за 1939—1986 гг. — 450 кг/с.

Продолжительность извержения τ_b не зависит ни от даты извержения, ни от высоты места прорыва (см. табл. 1 и рис. 2) и изменяется от 4 до

395 сут. Ошибки ее измерения в рассматриваемый период были велики, но, по-видимому, не превосходили 25%.

Коэффициент эксплозивности k_e . Точность его определения невелика, и поэтому его зависимость от t и H не рассматривалась.

Длина лавовых потоков L . Не установлено какой-либо зависимости длины лавового потока от времени и места прорыва побочного кратера (см. табл. 1).

Коэффициент активности побочных кратеров k_a определяется как суммарная продолжительность всех извержений в 1932—1986 гг. к рассматриваемому интервалу времени. $k_a = \sum \tau_n / (1986 - 1931) = 0,054$.

Сейсмические характеристики побочных извержений (см. табл. 2, рис. 1, 3).

Рои вулканических землетрясений II типа [20] предвараля все побочные извержения вулкана Ключевской в 1951—1986 гг. (с момента начала работы сейсмостанции в 1947 г. в пос. Ключи). Они подробно описаны в работах [1, 12—14, 18, 19, 22]. Общая закономерность состоит в том, что рои землетрясений: 1) предварают побочные извержения за 3—13 дней; 2) наиболее сильные землетрясения роя происходят в первый или во второй день, а затем энергия и частота землетрясений быстро снижается; 3) за несколько часов до извержения землетрясения энергетического класса $K_c \geq 6$ прекращаются.

Эпицентры землетрясений роя всегда группируются вблизи места прорыва нового побочного кратера. Среднеарифметический центр эпицентров роя землетрясений располагается или непосредственно в месте прорыва побочного кратера, или выше него по направлению к центральному кратеру вулкана (см. рис. 1) на расстоянии 1—5 км.

Глубина очагов землетрясений роя обычно не превосходит 5 км, и много очагов располагается в теле вулканической постройки выше уровня моря. Так, средняя глубина очагов землетрясений перед прорывами кратеров в 1974 и 1983 гг. соответственно была $2,4 \pm 2,1$ км ($n=51$), $0,5 \pm 0,2$ км ($n=34$) и $0,9 \pm 0,8$ км ($n=16$). При этом надо учитывать, что точность определения координат очагов землетрясений в районе Ключевской группы вулканов составляет 3—5 км.

Заблаговременность роя землетрясений τ_c , сут — интервал времени от начала роя землетрясений до начала извержения — составляет 3—13 сут и не зависит значимо ни от даты начала извержения, ни от высоты места прорыва (рис. 3).

Энергия землетрясений роя E_c (Дж). Несмотря на малое число извержений (7) четко прослеживается уменьшение E_c с течением времени t и увеличением высоты места прорыва побочного кратера (H) $\lg E_c = -0,0644(t - 1930) + 12,2$ и $\lg E_c = -0,977H + 11,8$, где t — год извержения, E_c выражена в джоулях, а H — в километрах. Уровень значимости коэффициентов уравнений соответственно равен 0,05 и 0,02. Точность определения энергии — 0,5 порядка.

Максимальный энергетический класс землетрясений роя K_{cm} ($K_c = \lg E_c$, где E_c — энергия землетрясений, выраженная в джоулях) зависит и от даты извержения, и от высоты места прорыва побочного кратера. $K_{cm} = -0,0649(t - 1930) + 11,9$, $K_{cm} = -0,940H + 11,4$. Уровень значимости коэффициентов обоих уравнений равен 0,05. Энергетические классы вулканических землетрясений всех видов приведены к одному уровню, как это рекомендовано в работе [18].

Мощность роя землетрясений W_c (Вт), определяемая как отношение сейсмической энергии землетрясений E_c к продолжительности (τ_c) роя землетрясений ($W_c = E_c / \tau_c$), зависит от t и H . $\lg W_c = -0,0716(t - 1930) + 6,8$ и $\lg W_c = -1,135H + 6,4$. Уровень значимости коэффициентов в обоих уравнениях равен 0,05 (см. рис. 3).

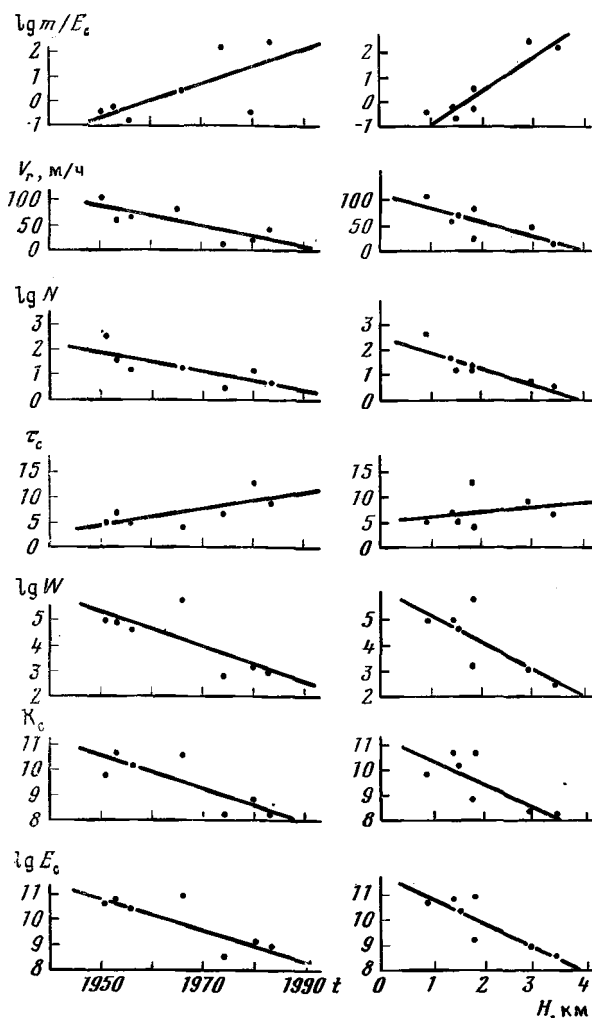


Рис. 3. Зависимость характеристик роя землетрясений, предворявших побочные извержения Ключевского вулкана, от времени t и высоты места прорыва над уровнем моря H . E_c — суммарная энергия землетрясений в джоулях; K_{cm} — максимальный энергетический класс землетрясений; W_c — средняя сейсмическая мощность в ваттах; τ_c — заблаговременность роя в сутках; N — число землетрясений с $K_c \geq 7,0$; V_r — кажущаяся горизонтальная скорость перемещения магмы по трещине от центрального канала к месту прорыву побочного кратера; m/E_c — отношение массы магмы к сейсмической энергии в кг/Дж

Число землетрясений роя $N_{K \geq 7}$ — суммарное число землетрясений роя энергетического класса $K_c \geq 7,0$. Оно не зависит значимо от даты извержения, но зависит от высоты прорыва побочного кратера. $\lg N_{K \geq 7} = -0,693H + 2,65$. Уровень значимости коэффициентов уравнения равен 0,01 (см. рис. 3).

Кажущаяся горизонтальная скорость перемещения магмы по трещине от центрального выводящего канала Ключевского вулкана к месту прорыва побочного кратера V_r , м/ч ($V_r = r_r \tau_c$). Она зависит и от даты извержения, и от высоты места прорыва: $V_r = -1,913(t - 1930) + 127$ м/ч и $V_r = -28,82H + 114$, м/ч (см. рис. 3). Уровень значимости коэффициентов обоих уравнений равен 0,05.

Энергия разрушения пород E_p при образовании трещин перед прорывом побочного кратера, по-видимому, как и при тектонических земле-

трясениях, приблизительно на два порядка больше, чем энергия землетрясения (энергия сейсмических волн, излучаемая из очага землетрясения). Таким образом, $E_p \approx 100E_c$.

Отношение массы магмы к сейсмической энергии роя землетрясений m/E_c кг/Дж. Оно, по-видимому, слабо зависит от даты извержения (уровень значимости равен 0,1), но зависит от высоты места прорыва: $\lg(m/E_c) = 1,37H - 2,2$. Уровень значимости коэффициентов уравнения равен 0,01.

Выводы. На основе анализа приведенных выше вулканических и сейсмических характеристик побочных извержений Ключевского вулкана за 1932—1986 г. можно сделать следующие выводы (см. рис. 2, 3).

1. Начиная с 1932 г., расстояние между местами прорывов побочных кратеров и центром Ключевского вулкана постепенно уменьшалось, а высота возрастала по закону $H = 42,55(t - 1930) + 480$, м, где t — год извержения.

2. Начиная с 1939 г., поступление магмы на поверхность земли происходило в среднем равномерно во времени по закону $\sum m = 14,08(t - 1930) - 120,10^9$ кг, а средний расход вулкана при побочных извержениях составлял 450 кг/с.

3. Класс извержения, расход магмы при извержении и продолжительность извержения не зависят ни от даты, ни от высоты места прорыва побочного кратера.

4. В полулогарифмическом масштабе с течением времени и по мере увеличения высоты мест прорывов побочных кратеров сейсмическая энергия, мощность, количество землетрясений и максимальный энергетический класс землетрясений роев, предварявших извержения, линейно убывали. Следовательно, чем выше место прорыва побочного кратера над уровнем-моря, тем слабее сейсмические явления.

5. Заблаговременность роя землетрясений не зависит значимо от времени и высоты места прорыва.

Методы прогнозирования и их эффективность

Метод прогнозирования. В основе разработки методов прогнозирования лежит изучение и понимание закономерностей вулканического процесса и механизма извержений. Само извержение является только одним из этапов в длительном процессе образования, накопления и перемещения магмы в глубинных частях вулкана и выхода ее на поверхность земли. Этот процесс сопровождается различными геологическими, геофизическими и геохимическими явлениями, которые предваряют извержения и могут наблюдаться и регистрироваться на поверхности земли. Их называют предвестниками вулканических извержений. На вулканический процесс оказывают какое-то влияние и общепланетарные явления, такие, как земные приливы, неравномерность вращения земли, тектонические движения, атмосферные осадки, изменения атмосферного давления, сезонные изменения температуры, а также внеземные процессы — движение планет, солнечная активность и др. Разработка методов прогноза вулканических извержений основана на установлении закономерностей связи предвестников извержений и указанных выше явлений с деятельностью вулканов [21].

По заблаговременности (предупреждению) методы прогноза делятся на долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный (оперативный). Условно можно принять срок заблаговременности долгосрочного прогноза более одного года, среднесрочного — от 1 мес до 1 года и краткосрочного — менее 1 мес. Вулканическое извержение — сложное и многообразное природное явление, и прогнозировать можно или отдельные его характеристики, или их совокупность, а применять для их прогноза один

или несколько методов. С практической точки зрения наиболее важным является прогноз времени, места, силы и опасности извержения. Для побочных извержений вулкана Ключевской разрабатывались долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный методы прогноза. Дадим их кратко характеристику, заранее подчеркнув, что они носили в основном методический характер.

Метод долгосрочного прогноза. Впервые подобный прогноз побочных извержений вулкана Ключевской был дан в 1969 г. П. И. Токаревым [17]; затем И. Т. Кирсановым с соавторами [7] и В. А. Широковым [25]. При этом использовались различные методы.

Метод прогноза П. И. Токарева [17] основан на детальном анализе прошлых извержений вулкана. Физической основой долгосрочного прогноза извержений полигенных вулканов является в среднем равномерное поступление магмы на поверхность земли (постоянство расхода вулкана α) в течение длительного времени и цикличности извержений. По известным датам (t_i) и массам изверженного материала (m_i) для непрерывного ряда n извержений какого-нибудь вулкана в интервале времени τ_1 определяются периоды вулканических циклов (T_i), средний расход

вулкана $\alpha = \left(\sum_1^n m_i \right) / \tau_1$, $\left(\tau_1 = \sum_1^n T_i \right)$, средний период вулканического

цикла $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_1^n T_i$ и дисперсия $\sigma_T^2 = \frac{1}{n} (T_i - \bar{T})^2$, средняя масса из-

верженного материала при извержениях $\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_1^n m_i$ и дисперсия

$\sigma_m^2 = \frac{1}{n} \sum_1^n (m_i - \bar{m})^2$. Считая, что отклонение периодов вулканических

циклов от среднего значения подчиняется закону нормального распределения, определяется наиболее вероятное время следующего извержения $t_{n+1} = t_n + \bar{T}$ и интервал времени $\tau_2 = 2\sigma_T = (t_{n+1} + \sigma_T) - (t_{n+1} - \sigma_T)$, в котором вероятность извержения $P_{n+1} = 2/3$. Интервал времени τ_2 принимается за время «тревоги». Масса магмы при ожидаемом извержении определяется по формуле $m_{n+1} = \alpha \bar{T} \pm \sigma_m = \bar{m} \pm \sigma_m$. За расчетную эффективность прогноза принимается величина $I_1 = p_{n+1}/p_1$, которая показывает, во сколько раз средняя плотность вероятности p_{n+1} в прогнозируемое время τ_2 больше средней плотности вероятности p_1 в рассматриваемый интервал времени τ_1 . При нормальном распределении средняя плотность вероятности извержений $p_1 = 1/2T$. Условно прогноз считается достаточно эффективным, если $I_1 \geq 1,33$, т. е. когда $\sigma_T/\bar{T} \leq 0,5$. В отличие от Ф. Е. Викмана [27], автором [17] функция распределения вероятностей принята симметричной относительно среднего значения, и при малых I_1 какая-то доля вероятности $n+1$ извержения попадает в интервал времени $t < t_n$. Однако, считая, что точность расчетов вероятности не превосходит 2,5%, и принимая $I_1 \geq 1,33$, с достаточной точностью этим можно пренебречь, зато расчеты при симметричной функции распределения значительно упрощаются. Прогнозы П. И. Токарев давал 4 раза.

Метод И. Т. Кирсанова с соавторами [7] основан на анализе пространственных и временных закономерностей расположения побочных кратеров Ключевского вулкана за 1920–1970 гг.

Метод долгосрочного прогноза сильных вулканических извержений В. А. Широкова [25] ($m \geq 10^{11}$ кг) основан на их связи с 19-летним лунным приливом. В. А. Широков установил, что большинство сильных вулканических извержений Камчатки, в том числе и побочных извержений вулкана Ключевский, связано с определенными фазами прилива. Метод заключается в определении интервалов времени фаз, в которые высокая

вероятность извержения. В пределах лунного цикла длительностью 18,6 выделено четыре фазы с вероятностью извержений 0,51, 0,37, 0,78, 0,65. Общая длительность фаз составляет 10,6, а расчетная эффективность прогноза $I_1=1,77$.

Метод среднесрочного прогноза разрабатывается В. А. Широковым [25]. Он основан на связи побочных извержений Ключевского вулкана с тектоническими землетрясениями с «промежуточной» глубиной очага (70–300 км), происходящими перед извержением в районе Северной группы вулканов Камчатки. В. И. Горельчик [13] обратила внимание на возрастание перед побочными извержениями частоты и энергии вулканических землетрясений I типа под вулканом Ключевской в пределах земной коры и рассматривает это явление как среднесрочный предвестник побочных извержений или усиления активности центрального кратера. Методы находятся в стадии разработки и испытания, и об их эффективности судить пока рано.

Метод краткосрочного прогноза. Метод краткосрочного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской разрабатывался П. И. Токаревым в 1966–1967 гг. [14]. Он основан на наблюдениях за сейсмическим режимом вулканов. Было установлено, что побочные извержения вулкана Ключевской всегда за 3–13 дней предваряются роями вулканических землетрясений II типа, причем в развитии роев проявляются определенные закономерности, которые могут быть использованы для прогноза места и времени извержений (см. предыдущие разделы). Метод краткосрочного прогноза подробно изложен в работах [14, 16].

Следует заметить, что не все рои вулканических землетрясений II типа [20] кончаются побочными извержениями. По оценке, сделанной нами ранее [19], извержениями завершается не менее 70% роев. В период работы сейсмостанции Ключи (1947–1986 гг.) в районе Ключевского вулкана произошло 8 роев II типа, а побочными извержениями закончилось только 7, т. е. 87,5%. Таким образом, можно считать, что вероятность побочного извержения после начала роя II типа равна 0,87.

Метод прогноза извержений по комплексу данных. При оперативном прогнозировании по сейсмологическим данным возможности побочного извержения вулкана Толбачик в июле 1975 г. П. И. Токаревым учитывался и долгосрочный прогноз [15], а при прогнозировании побочного извержения вулкана Ключевской в марте 1983 г. [19] также данные о состоянии центрального кратера (максимальные высоты полета бомб и подъема пепловой тучи, амплитуда вулканического дрожания). Однако связь этих явлений с началом побочного извержения настолько мало изучена и формализовать ее, чтобы использовать для прогнозов, пока не представляется возможным.

В. А. Широков [25] в 1985 г. предложил методику комплексного прогноза сильных ($m \geq 10^{11}$ кг) побочных извержений вулкана Ключевской по данным долгосрочного прогноза, основанного на использовании 19-летнего лунного цикла, среднесрочного, основанного на изучении тектонических землетрясений с глубиной очагов 70–300 км, и краткосрочного, учитывающего предваряющие рои землетрясений. «Время тревоги», когда ожидается сильное извержение, объявляется только при одновременном совпадении «активных фаз» каждого из трех предвестников. При этом весовые функции каждого предвестника выбраны одинаковыми. Метод на практике еще не проверен, но, по мнению В. А. Широкова, применение комплексного метода значительно повысит эффективность прогноза.

Реализация прогнозов, сделанных в 1969–1986 гг. Долгосрочные прогнозы побочных извержений вулкана Ключевской давались автором в 1969, 1978 [17], 1980 [19] и 1986 гг. [25]; И. Т. Кирсановым с соавторами в 1973 г. [7] и В. А. Широковым в 1972 и 1985 гг. [25].

По долгосрочному прогнозу П. И. Токарева [17] извержение, следующее после извержения 1966 г., ожидалось с вероятностью $2/3$ в интервале времени 1967—1974 гг., а ожидаемая масса изверженного материала оценивалась в 10^8 т. Место извержения не указывалось. Извержение началось 23 августа 1974 г., масса лавы составила $5 \cdot 10^7$ т. Прогноз оправдался, однако его эффективность была очень мала ($I_1 = 1,11$). Следующее извержение ожидалось с вероятностью $2/3$ в интервале времени с октября 1978 по август 1983 гг. с массой изверженного материала $m \sim 10^{11}$ кг. Расчетная эффективность прогноза $I_1 = 2,5$. Началось оно 5 марта 1980 г., т. е. прогноз времени оправдался, но масса материала оказалась $6 \cdot 10^8$ кг — меньше расчетной на два порядка. По прогнозу, сделанному в апреле 1980 г., следующее извержение ожидалось в интервале времени с июня 1985 по февраль 1989 г. Произошло оно 8 марта 1983 г. (прогноз времени не оправдался). В конце марта 1983 г. был дан прогноз развития побочного извержения [19]. Ожидалось, что расход магмы будет равен $2,2 \cdot 10^4$ кг/с, масса излившейся лавы составит 10^{11} кг, а извержение продлится около 2 мес. Как видно в табл. 1, эти величины отличаются от наблюдавшихся в действительности, но не более чем вдвое. 15 апреля 1986 г. был дан прогноз следующего извержения [26]. Оно ожидалось с вероятностью $2/3$ в интервале времени с июля 1987 по октябрь 1991 г. на склоне вулкана на высоте 2—4 км над уровнем моря. Область возможного извержения в координатах (H, t) показана на рис. 2 штриховкой. Побочное извержение произошло в конце февраля — начале марта 1987 г. из трещины на высотах 3800—2400 м, продолжалось оно 10 дней, было излито $5 \cdot 10^8$ кг лавы [23]. 28 января 1988 г. в 700 м от этого прорыва началось извержение лавы из трещины на высоте около 4000 м. По-видимому, оно является продолжением предыдущего извержения. Около 70% всех сделанных прогнозов оправдались, т. е. оправдываемость прогнозов близка к расчетной ($2/3$). Однако их эффективность очень мала и не превосходит 2,5 единицы.

По долгосрочному прогнозу В. А. Широкова [25], сильные извержения вулкана Ключевской могли происходить только в следующие интервалы времени: 1) V.1974—V.1976 гг.; 2) VII. 1978—X.1979 гг.; 3) IX.1981—XII.1985 гг.; 4) XI.1987—XI.1990 гг. За рассматриваемое время было два сильных извержения (VII.1974 и III.1983 гг.), и оба они произошли в прогнозируемое время. Эффективность прогноза равна 2,0.

По долгосрочному прогнозу И. Т. Кирсанова с соавторами [7], по первому варианту следующее после 1966 г. побочное извержение ожидалось в юго-восточном секторе вулкана на высоте 2000—2400 м над уровнем моря, время его было не определено, а по второму варианту извержение ожидалось на высоте 500—700 м в 1973 ± 1 г. (наиболее вероятно в северо-восточном секторе). Произошло оно в юго-западном секторе в августе 1974 г. на высоте 3400 м. Таким образом, прогноз высоты и места прорыва в обоих случаях не оправдался, а время извержения совпадало с прогнозируемым временем во втором варианте. Эффективность прогноза не более 2,0.

В заключение отметим, что при всех методах долгосрочного прогноза побочных извержений, несмотря на хорошую оправдываемость, их эффективность очень мала и не превосходит 2,5.

Среднесрочный прогноз времени сильных извержений находится в стадии испытаний с 1979 г. За это время произошло только одно сильное извержение (март 1983 г.) и оно не попало в «активную фазу», когда ожидалось извержение, т. е. прогноз не оправдался. Поэтому В. А. Широков [25] изменил методику выделения групп землетрясений, по которым ведется среднесуточный прогноз. По сделанным им оценкам эффективность среднесрочного прогноза не превышает 2,2. По прогнозу В. И. Горельчик, сделанному в апреле 1985 г. [13], побочное извержение ожидалось в конце 1985 — начале 1986 г. В рассматриваемый период

и до конца 1986 г. побочных извержений не было. Таким образом, из двух среднесрочных прогнозов не оправдался ни один.

Краткосрочный прогноз побочных извержений на Камчатке официально (с публикацией прогноза в печати до начала извержения) давался дважды П. И. Токаревым: в июле 1975 г. (вулкан Толбачик) [15] и в марте 1983 г. (вулкан Ключевской) [19].

Первое сообщение о возможности извержения вулкана Толбачик было дано П. И. Токаревым [15] в информационном сообщении 30 июня 1975 г. По сделанному заключению в период с 30 июня по 5 июля ожидалось извержение или центрального, или побочного кратера.

После получения новой сейсмической информации о рое землетрясений прогноз был уточнен и в информационном сообщении 3 июля было сообщено, что произойдет побочное извержение, а также указано место возможного извержения. Прогнозы оправдались. Извержение началось 5 июля в 21 час. 45 мин, по гринвичскому времени. Заблаговременность прогноза составила 6 сут, а его эффективность — не менее 350. Информационные сообщения с прогнозами регулярно передавались дирекции Института вулканологии, в президиум ДВНЦ АН СССР, обком КПСС и облисполком Камчатской области. Для населения Камчатки сообщения о возможности извержения были даны в областной газете 3 и 5 июля.

Прогноз места и времени начала побочного извержения вулкана Ключевской, начавшегося 8 марта 1983 г., был дан П. И. Токаревым [19] в «Записке о состоянии вулкана Ключевской» на имя директора Института вулканологии. По прогнозу побочное извержение ожидалось с вероятностью 0,7 в период с 4 по 8 марта 1983 г. на северо-восточном склоне конуса вулкана Ключевской. Возможная длительность извержения оценивалась в 2 мес, а ожидавшаяся масса лавы — 10^{11} кг. Извержение началось 8 марта в 2 км от предполагаемого места извержения. Продолжалось оно 112 сут, масса излившейся лавы составила $2 \cdot 10^{11}$ кг. Таким образом, прогноз с достаточной точностью оправдался. Расчетная эффективность прогноза $I_1 = 220$. Фактическая эффективность прогноза равна 270. О возможности извержения 5 марта было сообщено в президиум ДВНЦ АН СССР, председателю МССС при президиуме АН СССР и местным заинтересованным организациям, а для населения Камчатки — в областной газете 6 марта.

Подводя итог, необходимо отметить, что эффективность долгосрочных прогнозов извержений мала и не превосходит 2,5 единиц. Тем не менее они полезны при планировании исследований и наблюдений за состоянием вулканов, так как позволяют сосредоточить наблюдения на тех вулканах и в те периоды, где и когда вероятность извержений выше. Эффективность среднесрочного прогноза по имеющимся данным не превосходит 2 единиц. Расчетная эффективность краткосрочного прогноза извержений более 200. Действительная эффективность при хорошей организации службы прогноза будет значительно выше, особенно при непрерывном прогнозировании, когда прогноз постепенно улучшается по мере поступления новых данных о сейсмичности вулкана.

При создании службы прогноза необходимо иметь объективную оценку веса или значения различных методов прогноза и различных предвестников. По нашему мнению, вес метода прогноза или предвестника должен быть пропорционален его эффективности. Если обозначим эффективность метода прогноза через I_i , а его вес через W_i , то при n методах $W_i = I_i / \sum_1^n I_i$.

При комплексном прогнозе сильных извержений В. А. Широков [25] предлагает всем методам придавать одинаковый вес. Однако при прогнозировании побочного извержения в марте 1983 г. П. И. Токарев [19]

отдал предпочтение методу краткосрочного прогноза по сейсмологическим данным и наблюдениям за состоянием центрального кратера вулкана Ключевской. И это оправдало себя.

Рассчитаем веса методов прогноза по предлагаемой методике. Выше было сказано, что эффективность долгосрочного прогноза извержений не превосходит 2,5 единиц, среднесрочного — 2 единиц, а эффективность краткосрочного прогноза по сейсмологическим данным — более 200 единиц. Отсюда веса долгосрочного и среднесрочного методов прогноза около 0,01, а краткосрочного — около 0,98, т. е. на два порядка выше. Поэтому при прогнозировании побочных извержений необходимо отдавать предпочтение методу краткосрочного прогнозирования по сейсмологическим данным. Кроме того, необходимо иметь в виду, что он пригоден для прогноза и слабых извержений, а не только сильных, как метод комплексного прогноза, предлагаемый В. А. Широковым [25]. Однако это не означает, что методы прогноза по комплексу данных непригодны. Их надо развивать и совершенствовать по мере выявления новых предвестников извержений и появления новых методов прогноза.

Прогноз побочных извержений и состояния вулкана Ключевской. На основе полученных выше закономерностей побочных извержений вулкана можно сделать следующие прогнозы.

1. В ближайшие 10—30 лет высоты последующих побочных прорывов на склоне вулкана будут постепенно возрастать по закону $H=42,55 \cdot (t-1930)+480$ и находиться в интервале высот, ограниченных линиями $H_1=(1-0,5)H$ и $H_2=(1+0,5)H$ (t — дата — год извержения).

2. Последующие побочные извержения будут происходить по любому азимуту, радиально от центрального кратера.

3. При последующих побочных извержениях расход магмы, класс и продолжительность извержений будут близкими к средним значениям, приведенным в табл. 1.

4. При последующих побочных извержениях энергия, мощность, частота и максимальный энергетический класс землетрясений роев, предвещающих извержение, постепенно будут уменьшаться, а прогноз места и времени по сейсмологическим данным будет затруднен. Поэтому для прогноза места и времени начала следующих побочных извержений необходимо улучшить сеть сейсмических станций, ведущих наблюдения за вулканом Ключевской.

5. Следующее после 1988 г. побочное извержение с вероятностью $2/3$ ожидается в период с января 1991 г. по май 1995 г. на высоте $3200 \text{ м} \pm \pm 1600 \text{ м}$ над уровнем моря. Азимут может быть любым. Расход магмы составит около $2 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$, длительность — около 3-х мес, масса изверженного материала — около 10^{11} кг . Наиболее вероятное время извержения — март 1993 г. Расчетная эффективность прогноза $I_1=1,85$. Ожидаемый максимальный энергетический класс предвещающих землетрясений равен $8,0 \pm 0,7$. Заблаговременность роя землетрясений — 7 ± 3 сут. Угрозы населенным пунктам извержение представлять не будет. Возможно, что в расчетное время (1991—1995 гг.) произойдет два побочных извержения с интервалом в 1—2 года.

6. При постепенном перемещении мест прорывов побочных кратеров к центральному кратеру Ключевского вулкана настанет такой момент, когда они сольются с центральным кратером. В этот момент, по-видимому, будут наблюдаться какие-то процессы (пароксизмальное извержение центрального кратера, значительное разрушение конуса и т. д.), в результате которых закончится цикл побочных извержений вулкана Ключевской, начавшийся в 1932 г. Приняв за предельную высоту $H=4,6 \text{ км}$ и предельное расстояние $r=0,5 \text{ км}$, можно рассчитать этот момент по формулам зависимости $H(t)$ и $r(t)$, приводимым в предыдущих разделах этой статьи. Этот момент, рассчитанный по зависимости $H(t)$, наступит в 2027 г., а рассчитанный по зависимости $r(t)$, — в 1994 г. Зна-

чительное расхождение дат обусловлено тем, что зависимости $H(t)$ и $r(t)$ не строго линейны и носят оценочный характер. По-видимому, момент окончания цикла лежит между этими двумя датами. В статье [23] высказано предположение, что если тенденция увеличения высоты положения побочных кратеров будет продолжаться, то к концу нашего века или в начале следующего побочные прорывы достигнут вершины Ключевского вулкана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горельчик В. И. Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подготовки и развития прорыва Предсказанный в марте — июне 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 71—87.
2. Горшков Г. С. Извержение новых побочных кратеров Ключевского вулкана летом 1956 г. // Бюл. вулканол. станций. 1958. № 27. С. 28—38.
3. Двигалю В. Н., Кирсанов И. Т., Селезнев Б. В. Аэрофотограмметрические наблюдения на побочном извержении Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 74—76.
4. Иванов Б. В., Кирсанов И. Т. Латеральное извержение Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1980. № 5. С. 75—76.
5. Иванов Б. В., Андреев В. Н., Горельчик В. И. и др. Извержение Ключевской сопки в 1972—1974 гг. и образование побочных кратеров на юго-западном склоне вулкана // Геодинамика и вулканизм островных дуг северо-западного сектора Тихоокеанского кольца. М.: Сов. радио, 1978. С. 90—104.
6. Кирсанов И. Т. Извержение Ключевского вулкана в 1966 г. с прорывом побочных кратеров им. Пийпа // Бюл. вулканол. станций. 1968. № 44. С. 11—29.
7. Кирсанов И. Т., Пономарев Г. П., Штейнберг Г. С. Некоторые закономерности извержения Ключевского вулкана // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 93—98.
8. Набоко С. И. Новый побочный кратер Ключевского вулкана, прорвавшийся 23 октября 1946 // Бюл. вулканол. станций. 1949. № 16. С. 12—16.
9. Пийп Б. И. Извержение кратера Былинкиной // Бюл. вулканол. станций. 1954. № 20.
10. Пийп Б. И. Образование нового побочного кратера Белянкина // Бюл. вулканол. станций. 1954. № 22. С. 6—7.
11. Пийп Б. И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 312 с.
12. Пийп Б. И. Особенности извержений Ключевской сопки // Тр. Лаб. вулканологии. Вып. 13. 1958. С. 99—119.
13. Разработка и опробование системы прогноза вулканических извержений на Камчатке // Отчет о НИР (заключит.) ВНИИЦентр, № ГР 81068164. Инв. № 02860046458. М., 1986. 314 с.
14. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
15. Токарев П. И. Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439—442.
16. Токарев П. И. К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным // Бюл. вулканол. станций. 1977. № 53. С. 38—45.
17. Токарев П. И. Долгосрочный прогноз извержений вулканов // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 77—90.
18. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
19. Токарев П. И. Прогноз побочного извержения вулкана Ключевского в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология 1983. № 5. С. 3—8.
20. Токарев П. И. Асачинский рой землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 313.
21. Токарев П. И. Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108—119.
22. Токарев П. И., Широков В. А., Зобин В. М. Сейсмические явления, связанные с извержением побочного кратера им. Пийпа в октябре — декабре 1966 г. // Бюл. вулканол. станций. № 44. 1968. С. 30—41.
23. Федотов С. А., Хренов А. П., Жаринов Н. А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932—1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4.
24. Хренов А. П., Озеров А. Ю., Литасов Н. Е. и др. Побочное извержение Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный, 1983 г.) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 3—20.
25. Широков В. А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевского (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48—58.
26. Tokarev P. I. Forecasting flank eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // Hawaii Symposium on how volcanoes work, Hilo, Hawaii, January 19—25, 1987. P. 255.
27. Wickman F. E. Repose period patterns of volcanoes. Arkiv fur mineralogie, Band 4. N. 5. Stockholm, 1966. P. 291—367.