

**ОБ ИЗВЕРЖЕНИЯХ, ДЕФОРМАЦИЯХ, СЕЙСМИЧНОСТИ
КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА (КАМЧАТКА) В 1986-2005 гг.
И МЕХАНИЗМЕ ЕГО ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

© 2006 г. С.А.Федотов, Н.А.Жаринов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006.

Адрес для переписки: 684400, Камчатская обл., пос. Ключи, а/я 80., Жаринов Н.А.,

zhar@emsd.iks.ru, fedotov@kscnet.ru, karetn@online.ru

Статья опубликована в журнале ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2007, № 2

Рассматриваются извержения, сейсмичность деформации, свойства магматической питающей системы и механизм деятельности гигантского базальтового вулкана Ключевской, Камчатка. Приводятся сведения о 28 работах авторов на эти темы, вышедших в 1985-2006 гг. Дается описание активности Ключевского вулкана, его побочных и вершинных извержений в 1986-2005 гг. Рассмотрены сейсмичность Ключевского вулкана в 1986-2005 гг. и ее связь с извержениями. По данным геодезических измерений, центр магматического давления под вулканом в 1979-2005 гг. перемещался в интервале глубин 3-25 км. На основании разработанных ранее моделей и названных материалов 1986-2005 гг. даны описание и характеристики основных свойств магматической питающей системы Ключевского вулкана и подъема магм в пяти ее основных частях: у поверхности погружающейся тихоокеанской плиты (глубина ~160 км); в астеносфере (160-40 км); в области промежуточного магматического очага, где накапливаются глубинные магмы (40-20 км); в земной коре (20-5 км); в верхней части системы (от глубины 5 км под постройкой вулкана до его кратера на высоте 4.75 км). Сравнение роста количества продуктов вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана в 1978-2005 гг. показывает, что в следующие годы должна возрасти вероятность его побочных извержений.

*Посвящается 100-летию со дня рождения, б.ХІ 1906 г.,
выдающегося вулканолога члена-корреспондента АН СССР Б.И. Пийпа.*

ВВЕДЕНИЕ



Рис. 1. Вершинное извержение вулкана Ключевской в феврале 2005 г., вид с севера из пос. Ключи, 32 км от вулкана. Фото Н.А.Жаринова.

Ключевской вулкан находится в Северной группе вулканов Камчатки. Это гигантский стратовулкан (рис.1). Его правильной формы конус сложен лавовыми потоками и пирокластическим материалом, который преобладает в верхней его части. Высота его вершины, меняющаяся в ходе извержений, около 4750 м. Поражает то, что его возраст менее 7 тыс. лет. Это самый высокий действующий вулкан Европы и Азии. На склонах вулкана и его подножии находятся десятки конусов и многочисленные лавовые потоки побочных извержений. Ключевской – гигантский и очень активный базальтовый вулкан, который извергает в среднем 60 млн. т базальтов в год. Они составляют приблизительно $\frac{1}{4}$ часть общего годового количества пород, извергаемых всеми 70-ю вулканами Курило-Камчатского вулканического пояса, и около половины их ювенильных продуктов. Общие сведения о Ключевском вулкане и данные о его строе-

нии, извержениях, продуктах, полученные при многочисленных исследованиях с начала 1930-х гг. по 1990 г, приведены в фундаментальной книге «Действующие вулканы Камчатки» [44]. Это главный вулкан Камчатки и один из крупнейших вулканов мира. Ключевской вулкан принадлежит к числу центральных объектов всесторонних вулканологических исследований в нашей стране.

Непрерывные наблюдения и исследования были начаты 1 сентября 1935 г., когда вблизи его подножия в пос. Ключи открылась Камчатская вулканологическая станция АН СССР. Первые десятилетия ее исследований связаны с именами таких основоположников нашей вулканологии как академики Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и А.Н. Заварицкий, В.И. Влодавец, Б.И. Пийп, С.И. Набоко и др. В.И. Влодавец дал научное описание Ключевского вулкана [3], С.И. Набоко привела подробные данные о наблюдавшемся ею побочном прорыве Билукай в 1938 [24], а Б.И. Пийп написал большую монографию о Ключевской сопке, её извержениях в 1944-1945 гг. и в прошлом [26]. Эта классическая книга до сих пор является одной из работ, на которых основываются всесторонние последующие исследования Ключевского вулкана, его деятельности и связанных с нею явлений.

В начале 1960-х гг. член-корреспондент АН СССР Б.И. Пийп был организатором и первым директором Института вулканологии СО АН СССР в 1962-1966 гг. (В 1970 г. Институт вулканологии вошёл в состав ДВНЦ АН СССР, а в настоящее время является Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.). Приятно отметить, что Б.И. Пийп, проявлявший самый большой интерес к проблемам глубинной магматической деятельности и механизма вулканических извержений, всегда содействовал развитию геофизических и других исследований, необходимых для их решения.

6-го ноября 2006 г. исполняется 100 лет со дня рождения Бориса Ивановича Пийпа, и авторы настоящей статьи с глубоким уважением и благодарностью посвящают её этой замечательной дате.

В послевоенные 1940-е, 1950-е и 1960-е годы разносторонние исследования Ключевского вулкана, продуктов его извержений и землетрясений вели также многие другие вулканологи, среди которых был член-корреспондент АН СССР Г.С. Горшков, который обнаружил мантийные корни вулкана [11], А.Н. Сирин, сейсмолог-вулканолог П.И. Токарев [29].

В 1970-х и 1980-х годах расширились исследования по изучению извержений, истории развития вулкана, петрологии, геохимии, глубинного строения, деформаций, сейсмичности, питающих магматических очагов и каналов вулкана. В 1984-2003 гг. Ключевской вулкан ежегодно изучали экспедиции Института вулканологии ДВО РАН, сведения о них полезно дать в отдельном сообщении.

Авторы статьи участвуют в исследованиях Ключевского вулкана более 30 лет. В списке литературы в конце статьи приводятся 28 работ авторов периода 1985-2005 гг. по изучению Ключевского вулкана (кроме них, десятки публикаций помещены в тезисах отечественных и международных научных совещаний, симпозиумов и конгрессов). Авторы вели исследования в нескольких, указанных ниже направлениях.

Изучение побочных и вершинных извержений Ключевского вулкана и связанных с ними явлений [15-18, 39, 40, 44, 54-60, 64, 65 и др.].

Исследования деятельности Ключевского вулкана в 1932-1986 гг. и его возможного дальнейшего развития [42, 44, 55, 18 и др.]. Для этого периода уже имелись полные данные научных наблюдений. Важной особенностью этого периода было то, что в нем появились побочные извержения, постепенно поднимавшиеся от подножия вулкана к его вершине с высоты 450 м в 1932 г. до высоты 4500 м - в 1989 г.

Совместное рассмотрение деятельности, деформаций и землетрясений вулкана в 1971-1987 гг. и выяснение механизма его деятельности на основе полученных данных изложено в [38, 44, 54 и др.].

Результаты исследований механизма вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и в сходных структурах, проводившиеся в 1961-1991 гг., были обобщены в главе книги «Действующие вулканы Камчатки», 1991 г. [32].

На основе вулканологических, геофизических, геодезических и сейсмологических данных исследовались свойства магматической питающей системы самого Ключевского вулкана, рассчитывалось избыточное магматическое давление в ней, возможное количество радиальных даек вокруг корового магматического питающего канала Ключевского вулкана, уточнялась модель его деятельности, приводились данные о возможности дифференциации магм на разных глубинах [34 и др.].

Рассмотрены механизм и размеры возможного обрушения постройки Ключевского вулкана [1 и др.]. (Этот вопрос был очень актуален во время возникновения трещин шести побочных прорывов в верхней части конуса вулкана и их подъема к кратеру, которые происходили в 1987-1989 гг.)

Рассмотрена проблема прорыва магмой стенок магматических питающих каналов вулканов. Принималось, что они имеют форму вертикального цилиндра и окружены пластичной оболочкой. Показано, что начальное разрушение вокруг таких каналов происходит на всех глубинах в земной коре в виде вертикальных даек [14, 15, 20 и др.].

Рассчитаны размеры проточных магматических очагов, которые могли бы образоваться на глубинах 18 и 4 км под Ключевским вулканом, если бы происходили в значительных размерах плавление и вынос из этих очагов корового материала их стен [41 и др.].

Большой ряд других работ на названные темы, хронологический список 125 публикаций 1961-2004 гг. и обобщение полученных представлений и знаний о природе и механизме вулканической деятельности под вулканами островных дуг и сходных с ними структур приведены в книге [36] и ее заключении [37].

Важную помощь оказал опыт всесторонних исследований, которые были проведены в 1975-1984 гг. перед рассматриваемыми работами при изучении уникального Большого трещинного Толбачинского извержения, Камчатка, 1975-1976 гг. [2, 31, 61].

Названные выше работы, в целом, показывают природу, модель, свойства глубинной магматической деятельности, магматической питающей системы, подъема и накопления магм, механизм побочных и вершинных извержений Ключевского вулкана. Основные обобщения были сделаны в работах [34, 38, 42, 44 и др.]. В них рассматривались, главным образом, данные о деятельности вулкана в 1932-1986 гг. В течение последних 20 лет произошло много новых извержений, наблюдались изменения характера деятельности вулкана и был сделан ряд дополнительных теоретических исследований и модельных математических расчетов. Главной целью настоящей работы является сопоставление данных о деятельности, извержениях, деформациях, землетрясениях Ключевского вулкана в 1987-2005 гг. с названными выше нашими моделями, представлениями о природе и механизме его деятельности, их проверка, новые оценки вероятного дальнейшего развития, характера следующих извержений вулкана.

В разделе 1 рассматриваются сведения о деятельности и извержениях Ключевского вулкана, главным образом, в 1987-2005 гг.

В разделе 2 приводятся сведения о землетрясениях разных глубин и типов и вулканическом дрожании под Ключевским вулканом, наблюдавшихся в 1986-2005 гг. при извержениях и спокойном состоянии вулкана.

В разделе 3 приводятся геодезические данные о деформациях и перемещениях центра магматического давления под Ключевским вулканом, наблюдавшихся в 1986-2005 гг. в различных фазах его деятельности.

В разделе 4 данные о деятельности, деформациях и землетрясениях Ключевского вулкана за последние 20 лет сопоставляются с моделями и свойствами магматической питающей системы и его механизма деятельности, приведенными в работах авторов [1, 14, 34, 38, 42, 44, 54 и

др.]. Рассматриваются также работы других исследователей. Раздел 4 заканчивается обсуждением результатов. Ряд результатов и выводы приводятся в Заключении.

1. Активность вулкана Ключевской в 1986 – 2005 гг.

При написании данного раздела авторы использовали следующие источники информации. Во-первых, использованы материалы личных наблюдений за вулканом, полученные Н.А.Жариновым во время его работы на Камчатской вулканологической станции в г. Ключи с 1978 по 2006 гг.; использованы материалы опубликованных ранее работ о состоянии Северной группы вулканов Камчатки [16-18], приняты во внимание дополнительные данные, опубликованные в информационных выпусках о состоянии вулканов мира - *Bulletin of volcanic eruption*, № 56-60, 64, 65. Информация в этот сборник на протяжении многих лет (с 1989 по 1996 гг.) предоставлялась авторами ежегодно. Также учтены данные о текущем состоянии вулканов Камчатки, которые опубликованы в выпусках *Bulletin of the Global Volcanism Network* в 2003-2005 гг. [47-52].

Для построения модели работы вулканов и объяснения механизма его деятельности необходимы данные об его активности. В 1986-2005 годах периоды активности вулкана проявлялись в мощных вершинных и побочных извержениях на его склонах. Характеристики вершинных извержений вулкана и побочных извержений на его склонах приведены в табл. 1. Ниже, в хронологическом порядке, приводится краткое описание активности вулкана в эти годы. Дополнительные данные об извержениях и состоянии вершинного кратера в рассматриваемый период можно найти в работах [6, 9, 12, 19, 25, 43 и др.].

Таблица 1.

Характеристика вершинных извержений и на склонах Ключевского вулкана (1932-2005гг)

№ п.п.	Название извержения	Начало извержения, дата, годы	Продолжительность извержения.	Высота эруптивных центров, м	Площадь лавового потока, км ²	Мощность потока (средняя), м	Объём		Весовой объём		Индекс эксплозивности	Последовательность кристаллизации	Характер извержения
							лавы, км ³	пепла, млн. м ³	лавы, Q=2.5, т/м ³	пепла, Q=1.2, т/м ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Вершинные извержения (1945-2005 гг.)													
1	1945	01.01.1945	1 мес.	4750		-	0.100	300	250	360	59	Pl+Ol+Px	Пароксизмальное
2	1978-1984	06.1978	3 мес.	4750			0.040	6	100	7.2	7	Pl+Ol+Px	Излияние лавы по Крестовскому жалобу
3	1984	06.04.1984	18 мес.	4709		30	0.100	2	250	2.4	1	Pl+Ol+Px	Формирование внутрикратерных шлаковых конусов, с
4	Новый экструзивный цикл	1985-1986	5 мес.	4766		30	0.050	3	125	3.6	3	Pl+Ol+Px	излиянием лавовых потоков
5		1986-1987	5 мес.	4850		30	0.060	5	150	6.0	4	Pl+Ol+Px	на склоны вулкана по
6		1988	4 мес.	4850		30	0.050	5	125	6.0	5	Pl+Ol+Px	Крестовскому, Козыревскому и
7		1989-1990	6 мес.	4750		30	0.050	5	125	6.0	5	Pl+Ol+Px	Апахончичевскому желобам
8		1993	19.07.1993	4 мес.	4750			0.040	6	100	7.0	6.5	Pl+Ol+Px
9	1994	12.09.1994	1 мес.	4800			0.060	30	150	36	19	Pl+Ol+Px	
10	2003-2004	19.05.2003	7 мес.	4650			0.060	2	150	2.4	2	Pl+Ol+Px	
11	2005	16.01.2005	3 мес.	4700			0.050	10	125	12	9	Pl+Ol+Px	

Примечание. Pl- плагиоклаз, Ol- оливин, Px- пироксен.

IY ВВС – 4^е Всесоюзное вулканическое совещание.

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Извержения на склонах Ключевского вулкана (1932 – 1989 гг.)													
1	Группа Туйла												Три самостоя- ТЕЛЬНЫХ эруптивных центра по дугообразной трещине
	Киргурич	23.01.1932	12 мес.	450- 500	4.1	20- 25	0.090	6	225	7.2	3	OI+Px+PI	
	Туйла	01.06.1932											
	Биокось	10.1932											
2	Билюкай	07.02.1938	13 мес.	1000 -1900	14.0	20- 25	0.310	20	775	24	3	OI+Px+PI	С образованием взрыв- ных воронок
3	Юбилейный	19.06.1945	19 дней	1100 -1400	3.0	20	0.060	23	150	27.6	16	Px+OI+PI	С образованием взрыв- ных воронок
4	Апахончич	23.10.1946	29 дней	1500	2.4	15	0.040	0.7	100	0.8	1	PI+OI+Px	Один эруптивный центр
5	Былинкиной	20.11.1951	10 дней	950	0.5	30	0.015	2.5	38	3.0	7	PI+OI+Px	Два эруптивных цент- тра
6	Белянкина	07.06.1953	11 дней	1300- 1400	1.1	10- 15	0.010	1.0	25	12	37	PI+OI+Px	Четыре эруптивных центра
7	Вернадского и Крыжановского	27.07.1956	5 дней	1360- 1380	0.7	10- 15	0.008	-	2	-	-	PI+OI+Px	Два эруптивных цент- тра
8	Пийпа	06.10.1966	3 мес.	1900 -2100	4.7	20	0.090	10.0	225	12	5	PI+OI+Px	С образованием взрыв- ных воронок
9	IY ВВС	23.08.1974	3 мес.	3340 -3600	1.1	20	0.020	-	50	-	-	PI+OI+Px	С образованием взрыв- ных воронок
10	8 ^с марта	06.03.1980	7 дней	1600 -1800	0.2	2	0.0003	-	0.8	-	-	PI+OI+Px	Четыре эруптивных центра
11	Предсказанный	08.03.1983	112 дней	2900	3.3	25	0.050	-	125	-	-	PI+OI+Px	Один эруптивный центр
12	Предвиденный	24.02.1987	10 дней	2900 -3900	0.2	10	0.002	-	1	-	-	PI+OI+Px	Излияние лавового потока по трещинам
13	25 лет ИВ ДВО РАН	29.01.1988	230 дней	3900 -4100	0.9	40	0.034	-	85	-	-	PI+OI+Px	
14	23 февраля 1988	23.02.1988	25 дней	4200 -4400	0.3	5	0.0015	-	4	-	-	PI+OI+Px	Радиальные трещины
15	14 декабря 1988	14.12.1988	6 дней	3900 -4250	0.1	5	0.005	-	0.2	-	-	PI+OI+Px	Два эруптивных цент- тра
16	5 февраля 1989	02.02.1989	21 день	4500	0.2	5	0.001	-	2	-	-	PI+OI+Px	Один эруптивный центр
17	Скуридина	26.08.1989	198 дней	4200	2.6	10	0.026	-	100	-	-	PI+OI+Px	Один эруптивный центр

Сведения об извержениях и развитии деятельности Ключевского вулкана, поясняющие дальнейшее изложение, даны на рис. 2-4. На рис. 2 помещена карта побочных извержений Ключевского вулкана, которые происходили в 1932-1989 гг., а также сетей сейсмологических и геодезических наблюдений. На рис. 3 показано развитие деятельности базальтового вулкана-гиганта, высоты и объемы, а также последовательности его побочных и вершинных извержений, происходивших в 1932-2005 гг. На рис. 4 приведены графики приращения со временем объемов побочных и вершинных извержений и их полного суммарного объема за 1932-2005 гг. Изменение высот парогазовых и газопепловых выбросов из вершинного кратера в 1997-2005 г. показано в следующем разделе 2 статьи.

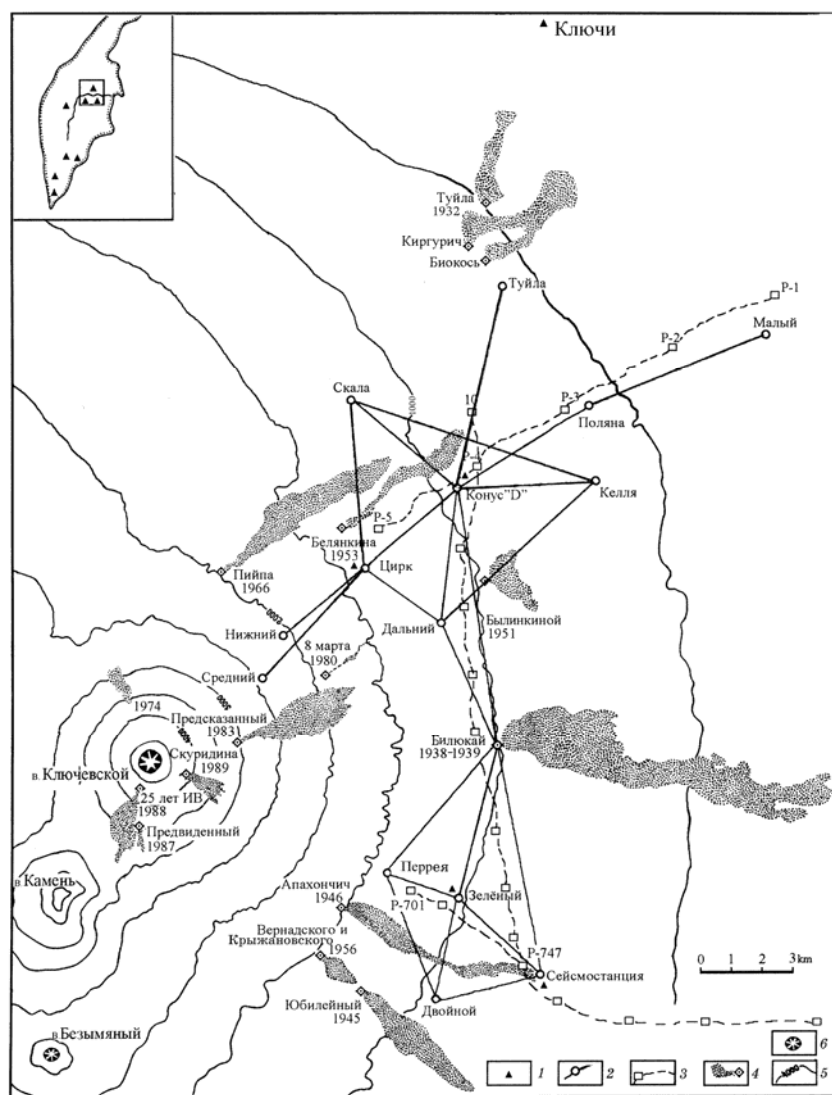


Рис. 2. Схема района исследований, расположения побочных извержений 1932-1989 гг., нивелирных профилей, линий геодезических сетей и сейсмических станций. 1- сейсмостанции; 2 - пункты линейных измерений; 3 – реперы нивелирных профилей; 4 –

лавовые потоки побочных извержений 1932-1989 гг.; 5 - горизонтали; 6 – кратер действующего вулкана.

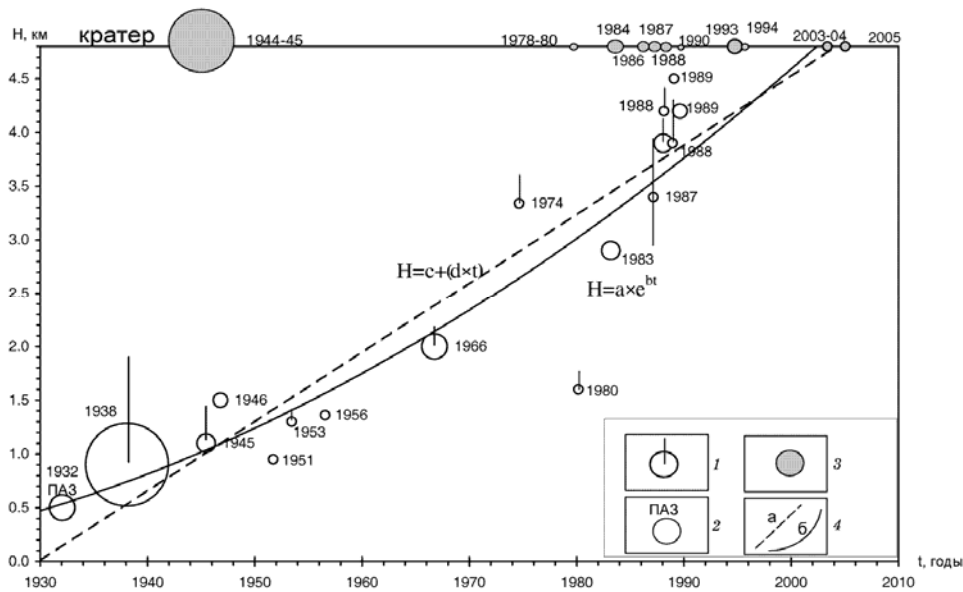


Рис. 3. График времен, высот и объемов побочных извержений на Ключевском вулкане в 1932-1989 гг., времен и объемов его вершинных извержений в 1944 – 2005 гг. 1 - побочный прорыв по трещине с излиянием лавового потока, вертикальные чёрточки показывают интервалы высот, на которых возникали трещины; 2 - побочное извержение в ареальной зоне (ПАЗ); 3 - вершинное эксплозивно-эффузивное извержение; 4 - линейная (а) и экспоненциальная (б) аппроксимации подъёма высот побочных прорывов Ключевского вулкана; размеры кружков пропорциональны объёму продуктов извержений (см. табл.).

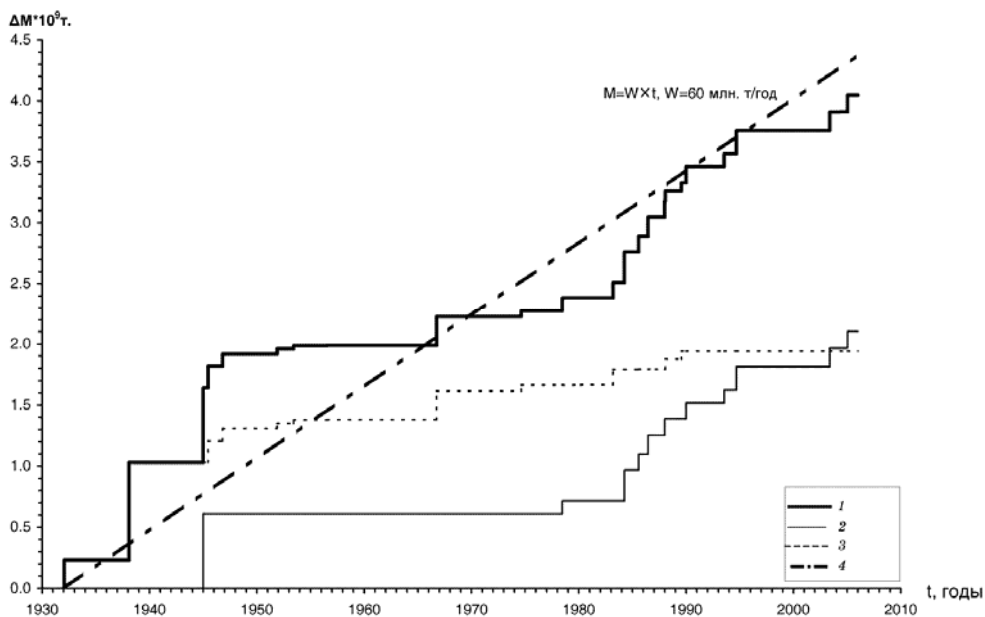


Рис. 4. Суммарный расход материала извержений Ключевского вулкана в 1932-2005 гг. 1 - суммарный расход; 2 - вершинные извержения; 3 - побочные извержения; 4 - сред-

ний расход за тысячелетия с начала образования вулкана; $M = W \times t$, $M \times 10^9 \text{ т}$ - вес изверженных продуктов за время t , годы; $W=60 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ – средний расход вулкана.

1986-1987 гг. В вершинном кратере вулкана продолжались частые взрыво-эффузивные извержения стромболианского и вулканско-стромболианского типов. 21 января 1986 г. закончилось вершинное извержение, которое продолжалось 5 месяцев, с начала сентября 1985 г. [16] (табл. 1, рис. 3, 4).

6.06-11.07.1986 г. - наблюдалось короткое вершинное взрыво-эффузивное извержение [16, 57]. К этому времени вершинный кратер был заполнен лавой, в кратере образовался шлаковый конус. Извержение началось как взрывное, затем продолжилось изливанием лавы в западный желоб на склоне вулкана Ключевской (табл. 1, рис. 3, 4).

Морфометрические карты изменения профиля вершины Ключевского вулкана и расход вещества через его вершинный кратер в 1968-1988 гг. приведены в работах [12, 44 и др.].

27.11.1986-06.03.1987 г. В этот период времени также наблюдалась смена взрывного этапа на взрыво-эффузивный. Вершинное извержение завершилось побочным прорывом, который происходил с 23.02.1987 по 12.03.1987 г. (прорыв «Предвиденный»). Эффузивный период вершинного извержения характеризовался мощным изливанием лавы во все три вершинных желоба: западный, северо-западный и юго-восточный. Расход пирокластического материала в кульминационные моменты извержения составлял 100 т/сек. Изливание лавы сопровождалось бурной фреатической деятельностью в леднике и на склонах вулкана, а также образованием грязевых потоков. Зимнее вершинное извержение 1987 года прекратилось одновременно с побочным прорывом «Предвиденным». Состояние покоя на вулкане продолжалось до конца июля 1987г. [58] (табл. 1, рис. 3, 4).

28.07-11.10.1987 г. происходило вершинное взрыво-эффузивное извержение. Во время затишья между двумя терминальными извержениями на вершине внутрикратерного шлакового конуса образовался колодцеобразный провал диаметром до 260 м [12 и др.]. Поэтому лава во время последовавшего вершинного извержения на склоны вулкана почти не поступала. Провал был заполнен новым шлаковым конусом, и к 19.09.1987 г. [12] абсолютная отметка верши-

ны достигала 4809 м. И только к концу извержения 11-12 сентября произошло излияние лавы на склон вулкана Ключевской в его северо-западный желоб.

1.12.1987-10.02.1990 г. В этот критический период времени вулкан Ключевской практически непрерывно находился в состоянии извержения вершинного кратера или побочных прорывов на склонах вулкана. В ходе извержений этих лет высоты побочных прорывов, как и предполагалось ранее [38], достигли максимальных отметок (4200-4500 м). Район побочных прорывов, особенно верх конуса на высотах 3900-4500 м, стал местом интенсивного трещинообразования. Изменение высот, подъём побочных прорывов и их трещин с 1932 по 1989 гг. показаны в табл. 1 и на рис. 2, 3.

Как и в предыдущие годы, активизация вулкана началась со слабой эксплозивной деятельности 1 декабря 1987 г. С 14 по 26 декабря в северо-западном (СЗ) желобе, от кромки вершинного кратера до подножия конуса вулкана, наблюдалось излияние лавы. В 1988 году лава поступала почти постоянно по одному – северо-западному (СЗ) или по двум (СЗ и ЮВ) или трем сразу (еще и по западному) желобам [17, 59]. Перерывы в излиянии лавы составляли от 2-3 до 10-20 дней. Эффузивная деятельность имела длительный перерыв с начала ноября до середины декабря 1988 г. Эксплозивная деятельность продолжалась с перерывами в течение всего 1988 года. Всего в 1988 г. вулкан был активен 4 месяца (табл. 1, рис. 3, 4).

На фоне вершинного извержения 29 января 1988 г. на ЮВ склоне вулкана на радиальной трещине, на отметке 4000 м, образовался новый эруптивный центр побочного прорыва, названный прорывом им. 25-летия ИВ (Института вулканологии) (табл. 1, рис. 2). Побочный прорыв продолжался 230 суток, с 28 января 1988 по 14 сентября 1988 г. От эруптивного центра до кромки кратера образовалась трещина прорыва. В ходе вершинного и побочного извержений 23 февраля 1988 года на этой трещине образовалась серия фумарольных выходов. В целом, побочное извержение имело эксплозивно-эффузивный характер. Объем продуктов побочного извержения 1988 г. составил 0.0336 км^3 (по материалам аэрофотосъемки) (табл. 1, рис. 2, 3, 4).

Сразу после окончания побочного прорыва 25-летия ИВ, с 14 сентября 1988 г. наблюдалось усиление эффузивной деятельности вершинного кратера (табл. 1). Шлаковые конусы, росшие в нем, перекрыли провал 1987 г; абсолютная отметка вершины вулкана 19.09.1988 г. достигла 4835 м [12]. Вершина конуса была достроена до своего предела – высота остроконечного конуса была около 4900 м. Несмотря на непрерывную активность вулкана, сброса давления в питающей системе вулкана не произошло. С конца ноября 1988 г на северо-восточном склоне вулкана возобновился процесс трещинообразования в интервале высот 2200-3000 м. Образование трещин сопровождалось парением и небольшим грязевым потоком.

С 14 декабря 1988 г. в течение 6 дней происходило излияние лавы в ледник на склоне вулкана на высоте 2800 м. Поступление лавы вызвало образование лахара длиной 10-12 км.

Второй эруптивный центр образовался 17 декабря 1988 г. на высоте 4400 м на верхнем продолжении трещины от 14 декабря 1988 г. 22 декабря 1988 г. на восточном склоне на высоте 3500 м образовалась еще одна субрадиальная трещина.

В 1989 г. сохраняется высокий уровень эффузивной активности вершинного кратера, а также продолжается процесс интенсивного трещинообразования на склонах вулкана. 13-15 января происходит выжимание лавового потока на восточном склоне, на высоте 3800 м. 6 февраля на юго-юго-восточном склоне, выше прорыва 25-летия ИВ, на высоте 4400 м образовался эруптивный центр и 16 февраля над этим центром вырос шлаковый конус. От конуса вверх по склону проходила радиальная трещина. Извержение продолжалось 21 день, объем продуктов извержения был близок 0.001 км^3 [60].

26 июля 1989 г. на системе радиальных трещин, на высотах 4300-4400 м, начался побочный прорыв, названный им. Скуридина (табл. 1, рис. 2, 3). Извержение происходило на радиальной трещине, которая распространилась от вершинного кратера до отметки 4000 м. Ширина трещины на высотах 4300-4400 м, в местах начала излияния лавы, достигала 7-10 м. Ширина зоны трещин, включая оперяющие разрывы, составляла 200-250 м. В ходе побочного извержения вдоль трещины прорыва происходила миграция эруптивных центров. Последний центр об-

разошелся на отметке 4000 м. Это побочное извержение продолжалось 198 дней, до 10 февраля 1990 года. Объем извергнутых продуктов был близок 0.026 км^3 . Побочное извержение сопровождалось взрывной деятельностью вершинного кратера [64].

Серия из 6 побочных извержений в верхней части конуса Ключевского вулкана в 1987-1989 гг. и одновременных вершинных извержений была очень важным и интересным явлением, которое впервые наблюдали на Ключевском вулкане. Она должна быть предметом отдельных исследований. Примечательно, что вершина конуса не обрушилась после того, как была расколота несколькими радиальными трещинами. После этой серии извержений дальнейшая эруптивная деятельность Ключевского вулкана в 1990–2005 гг. происходила в вершинном кратере.

23.01.1990-30.06.1993 гг. К концу побочного извержения им. Скуридина вновь отмечено увеличение активности вершинного кратера. 23 января 1990 г. началась интенсивная Stromboli-лианская деятельность с выбросом раскаленных бомб на высоту до 200 м. Эруптивная колонна с небольшим содержанием пепла поднималась на высоту до 2 - 3 км над кромкой кратера. 24 января в пос. Ключи выпал пепел в количестве 30 г/м^2 . 29 января 1990 г. произошла кульминационная фаза извержения.

В ходе вершинного извержения (23.01-06.02.1990 г.) были разрушены шлаковые конусы предыдущих извержений и был сформирован новый кратер диаметром до 500 м и глубиной до 200 м. Вершинное и побочное извержения закончились 6 и 10 февраля 1990 г., соответственно. После окончания извержений в течение всего года по всему кратеру наблюдалось интенсивное парение, отмечались единичные взрывы или серии взрывов с выбросами пепла. Пепел выпадал в пос. Ключи 16 марта и 4 мая 1990 г. Количество выпавшего пепла менялось от 1.5 г/м^2 до 250 г/м^2 , соответственно. Наличие в пепловых тучах облаков рыжего цвета указывало на то, что происходили обвалы внутренних стенок кратера.

1991-1992 гг. В эти годы продолжалось дальнейшее затухание слабого вулканского извержения, которое началось в 1990 г. В течение 1991 г. наблюдалась фумарольная деятельность

и редкие пепловые выбросы [65]. В деятельности вершинного кратера наступила пауза, которая продолжалась до 30 декабря 1992 г.

1993 год. С 30 декабря 1992 г. до начала февраля 1993 г. проходило слабое извержение вершинного кратера.

Сильное продолжительное вершинное извержение последовало с 15 марта по сентябрь 1993 г. [43, 65]. В ходе извержения было выделено три этапа: взрывной - с 15 марта до 18 июля; взрывно-эффузивный - с 19 июля по 15 августа и третий, заключительный этап, взрывной – с 16 августа до начала сентября. Извержение началось с появления над кратером вулкана пепловых выбросов высотой 1-2 км, с начала июля над кратером появилось свечение в ночное время, 4-6 июля наблюдалось фонтанирование лавы в кратере и взрывы с выбросами пепла.

Во время первой, взрывной стадии в вершинном кратере образовался провал диаметром 500 м и глубиной 186 м [12 и др.].

Вулканско-стромболианская фаза извержения продолжалась до 19 июля. В 4 ч утра 19 июля фонтанирование лавы резко усилилось. Вершинный кратер к этому времени был заполнен лавой, которая стала поступать на склон вулкана, в его северо-западный желоб. Продвигаясь по желобу, фронт лавового потока достиг ледника. Это вызвало фреатические взрывы, высота которых достигала 3-4 км. Эруптивная туча, насыщенная пеплом, продвигалась на запад в сторону пос. Козыревск. Количество пепла в пос. Козыревск в 50 км от вулкана достигло 30 г/м^2 . Пепел был ювенильный, цвет его менялся от темно-серого до черного. В целом пепел был представлен обломками вулканического стекла размерности грубого помола.

К концу июля в северо-западном желобе сформировался мощный лавовый поток. За 5 дней, к 24 июля, поток спустился до 2300 м, 30-31 июля взрывно-эффузивное вершинное извержение продолжалось, в это время наблюдалось фонтанирование лавы до 1300 м над кратером. На отметках 2600-2700 м происходили мощные фреатические взрывы, высоты которых достигали 2-3 км. По руслу реки Крутенькая прошел лахар.

Результаты аэровизуальных наблюдений и аэро съемка показали, что провал в вершинном кратере, существовавший до извержения, был снова заполнен лавой и шлаком. К 3-4 августа в кратере сформировался шлаковый конус высотой до 100 м. Объем продуктов извержения в вершинном кратере составил 15 млн. м³ (табл. 1, рис. 3, 4). С начала сентября до конца 1993 года вулкан находился в состоянии умеренной эксплозивной деятельности.

1994 год. Продолжались только вершинные извержения. До начала сентября 1994 г. на вершине вулкана наблюдалась слабая фумарольная деятельность. С 7 сентября по 2 октября происходило мощное эксплозивно-эффузивное вершинное извержение.

Вершинное извержение началось 7 сентября с появления над вершинным кратером слабых парогазовых выбросов. Подробное описание извержения дано в работах [25 и др.]. Так же, как и в 1993 году, извержение 1994 г. происходило в три этапа: эксплозивный (7-11 сентября), эксплозивно-эффузивный (12-30 сентября) и пароксизмальный (1 октября). 2 октября 1994 г. извержение закончилось.

На первом, эксплозивном, этапе в основном наблюдались парогазовые выбросы, иногда пепловые выбросы. Так как вершинный кратер к началу извержения 1994 г. был заполнен шлаковым конусом, то уже на 5-й день извержения потоки раскаленной лавы начали поступать на склоны вулкана. В начале, 12 сентября, поток лавы прошел в ЮЗ желоб, его длина была 1.5 км, а 13 сентября лавовый поток начал спускаться по СЗ желобу. За сутки потоки лавы прошли 3.2 км и спустились до отметки 3100 м. Одновременно со сходом лавовых потоков наблюдались выбросы раскаленных бомб на высоту от 300-500 до 700 м. Эксплозивно-эффузивная деятельность стабильно продолжалась до 28 сентября 1994 г.

29-30 сентября на вулкане наблюдались периоды ослабления, затишья и вновь усиления эруптивной деятельности. Пароксизмальный этап начался в 5 ч утра 1 октября усилением эруптивной деятельности. Выбросы раскаленных бомб и пепла во время пароксизмального этапа извержения достигали 2-2.5 км и 7-8 км соответственно. Шлейф пепловой тучи распространился на расстояние свыше 2 тыс. км. По ССЗ склону вулкана изливались лавовые потоки. Во

фронтальных частях лавовых потоков происходили фреатические взрывы, образовывались грязевые потоки (лахары). Несмотря на отсутствие большого снежного покрова, грязевые потоки имели значительную протяженность (до 25-30 км). Отдельные рукава грязевых потоков достигли р. Камчатка.

По северо-западному, западному, южному и восточному склонам вулкана спускались пирокластические потоки длиной от 2 до 5 км. Извержение продолжалось 9-10 часов. В ходе извержения на дневную поверхность поступило 0.06 км^3 лавы и 0.03 км^3 пепла (табл. 1, рис. 3, 4). 2-го октября эксплозивная деятельность резко упала, уменьшилась также эффузивная активность. Наблюдалось сокращение длин лавовых потоков до 1 км.

После пароксизмального извержения в октябре 1994 г. на вершине вулкана появился крупнейший колодцеобразный провал глубиной более 500 м.

Пароксизмальное извержение 7 сентября – 2 октября 1994 г. завершило период длительной, почти непрерывной активности вулкана, продолжавшейся с 1974 г. Далее наступила продолжительная пауза между извержениями.

1995-2002 гг. После извержения 1994 года в активности вулкана наступило почти полное затишье, слабая фумарольная деятельность иногда чередовалась с пепловыми выбросами. Во время облета вулкана в конце августа 1995 г. на вершинном кратере вулкана был отмечен провал глубиной 700-800 м. Дальнейшее заполнение провала шло за счет обрушения стенок кратера (сверху) и поступления жидкой лавы (снизу).

До 2000 года над центральным кратером происходила умеренная фумарольная деятельность. С начала 2000 г. из вершинного кратера вновь стали происходить выбросы, а с конца августа 2002 г. начали появляться выбросы с пеплом. Выбросы происходили: 22.08; 14.09; 17.09; 24.12. Наиболее мощный выброс был отмечен 24 декабря 2002 г. Высота подъема эруптивной колонны достигала во время этого выброса 4.0 км над вершинным кратером (раздел 2, рис. 8а).

2003 г. В начале 2003 г. на вершинном кратере была обнаружена термальная аномалия [47]. Первые три месяца 2003 г. на вулкане продолжалась умеренная фумарольная деятель-

ность. С конца марта и в апреле над вулканом вновь появляются пепловые выбросы. 18 мая 2003 г. впервые после окончания вершинного извержения в 1994 г. отмечено свечение в кратере вулкана [48]. Эту дату можно считать началом нового вершинного извержения вулкана Ключевской. В течение года происходило увеличение количества пепловых выбросов, высота их также увеличивалась с 200-300 м в апреле-мае до 2.5-3.0 км над уровнем моря в октябре-ноябре (рис. 8). По спутниковым данным длина пеплового шлейфа в начале сентября достигала 170 км [49, 50].

2004 г. Периоды усиления активности вулкана чередовались периодами ослабления. В январе 2004 г. визуально наблюдалась парогазовая деятельность с выбросами пепла на высоту 300-1000 м над кратером; регулярно отмечалось интенсивное свечение над кратером. С 24 по 26 января произошло усиление активности вулкана [51]. 24 января в 13 ч 50 мин на вулкане отмечен парогазовый выброс на высоту до 2 км над кратером. Вечером того же дня отмечались непрерывные взрывы. Временами наблюдались периоды непрерывного фонтанирования лавы в центральном кратере. 25.01 на вулкане наблюдались мощные пепловые выбросы на высоту 2-2.5 км над кратером. С 26.01 интенсивность взрывов на вулкане уменьшилась. Шло заполнение вершинного кратера. По предварительным оценкам, объём лавы в кратере к январю 2004 года достиг 0.06 км^3 (табл. 1). Оценка величины объема выполнена с учетом размеров незаполненного кратера вулкана.

2005 г. Начало новой активизации вершинного кратера вулкана связывается с появлением свечения над вершиной в середине января 2005 года. С 16 января по 6 апреля 2005 года проходило очередное эксплозивно-эффузивное вершинное извержение вулкана Ключевской. Начало извержения точно определено по появлению свечения над вершинным кратером в ночное время 16 января и по спутниковым данным [52]. В дневное время наблюдались пепловые выбросы с частотой 3-5 в минуту. В последующие дни с 20.01 по 02.02.2005 г. в темное время суток наблюдалось фонтанирование лавы над вершиной вулкана. Днем продолжались пепловые выбросы.

С утра 1 февраля в пос. Ключи наблюдался один из пеплопадов. В 10 часов местного времени в результате выбросов из центрального кратера произошло таяние снега, образовался грязевый поток. Поток прошел по руслу р. Крутенькая в 10 км на восток от пос. Ключи. Общая длина грязевого потока была близка 25 км.

Постепенно эксплозивное извержение перешло в эксплозивно-эффузивное. На склон вулкана Ключевской по северо-западному желобу с 7 февраля начал изливаться лавовый поток. К 7 февраля общая протяженность потока была более 4.5 км. По высоте поток спустился до отметки 3000 м над уровнем моря. В последующие дни активность вулкана продолжала оставаться, по-прежнему, на высоком уровне: наблюдалось непрерывное излияние лавы на СЗ склон вулкана, фонтанирование лавы на высоту 500-600 м, фреатические взрывы при контакте раскаленной лавы со льдом. В ходе аэровизуального облета вулкана 16 февраля установлено, что в истоке на краю кратера ширина лавового потока достигала 50-60 м, поток спустился по склону до отметки 2300 м.

Стабильная эксплозивно-эффузивная деятельность вулкана продолжалась до конца марта 2005 г. Высота выбросов раскаленной лавы временами (25 февраля) превышала 1 км над вершиной вулкана.

25 февраля прошел еще один грязевый поток. Мощность потока в 8 км к востоку от пос. Ключи (рис. 2) доходила до 5-6 м при ширине 20 м и длине до 18-20 км. Внизу поток, при выходе на равнину, растекался широким фронтом. Наибольшая ширина в конце потока достигала 500-600 м.

Фонтанирование лавы и ее излияние на СЗ склон вулкана сопровождалось фреатическими взрывами. Высота одного из них 5 марта достигла 8 км над уровнем моря. Периодически во время извержения выпадал пепел. Выпадение пепла наблюдалось в пос. Ключи 8 и 24 марта. Во время усиления эксплозивной деятельности 24 марта в пос. Ключи наблюдался мощный пеплопад, высота эруптивной колонны в это время была более 3 км. Вес пробы пепла, отобранной в пос. Ключи с 1 м² был близок к 150 г. В результате эксплозивной деятельности в вершинном

кратере образовался шлаковый конус. Высота вулкана достигла отметки 4746 м. Шлаковый конус возвышался над кромкой вершинного кратера.

Извержение закончилось 6 апреля 2005 г. После этого срока эксплозивная деятельность с выбросами пепла прекратилась, до конца года продолжалась только мощная парогазовая активность (табл. 1, рис. 3, 4, 8a). Дополнительные сведения об извержениях 2003-2005 гг. приведены также в [19].

Отметим свойства и общие закономерности извержений Ключевского вулкана. Как правило, подготовка извержений начиналась с усиления фумарольной деятельности вулкана, последующего появления пепловых выбросов. Затем наблюдалось дальнейшее усиление эксплозивной деятельности в виде появления раскаленной пироклаستيкулы, бомб. Эксплозивный характер извержений свидетельствовал о том, что из питающей магматической системы поступала обогащенная газами лава. Следующий этап активности - это переход в эффузивную фазу извержения или чередование эффузивной и эксплозивной фаз извержений. Наступление эффузивной фазы извержения свидетельствовало о дегазации магмы.

По данным [12 и др.], все более или менее крупные события на Ключевском вулкане, в том числе вершинные извержения 1968-1988, сопровождаемые побочными прорывами, завершались образованием провалов в вершинном кратере.

С 1986 по 2005 гг. Ключевской вулкан в течение 10 лет находился в состоянии извержений вершинного кратера и (или) побочных извержений. За 20 лет извержений (с 1986 по 2006 гг.) на дневную поверхность поступило более 1200 млн. т продуктов извержений (лавы и пепла). Расход продуктов извержений за это время был близок к среднему за тысячелетия с его образования, 60 млн. т / год (табл. 1, рис. 3, 4).

Побочные прорывы и истоки лавовых потоков, поднимавшиеся по склонам вулкана с высоты 450 м в 1932 г. до высоты 4200 м - в 1989 г., прекратились, достигнув уровня 200 м по вертикали от кромки вершинного кратера. В 1990-2005 гг. извержения происходили только в вершинном кратере. Несмотря на то, что при более, чем 6 побочных и нескольких вершинных из-

вержениях 1987–1989 гг., когда вершина вулкана на высотах 2900-4200 м была расколота радиальными трещинами, не было ее обрушений.

В 1988 г. высота вулкана достигла 4835 м и форма её вершины стала близкой к остроко-
нечному конусу. После окончания серии извержений 1981-1989 гг. в последующих годах нача-
лись новые провалы вершины. Глубины провалов после пароксизмальных извержений достига-
ли 500 м и более. Большой интерес представляет выяснение природы этих явлений.

2. Характеристика сейсмичности Ключевского вулкана, связь сейсмичности с извержениями

Первая сейсмостанция для изучения сейсмичности в районе Ключевского вулкана была
открыта в пос. Ключи в 1946 г. С этого времени были начаты систематические сейсмологиче-
ские наблюдения в районе Северной группы вулканов Камчатки [5, 29]. По многолетним де-
тальным сейсмологическим исследованиям была выполнена оценка общей сейсмичности вбли-
зи вулкана Ключевской [7, 9, 10, 38 и др.]. Выявлены следующие ее основные свойства.

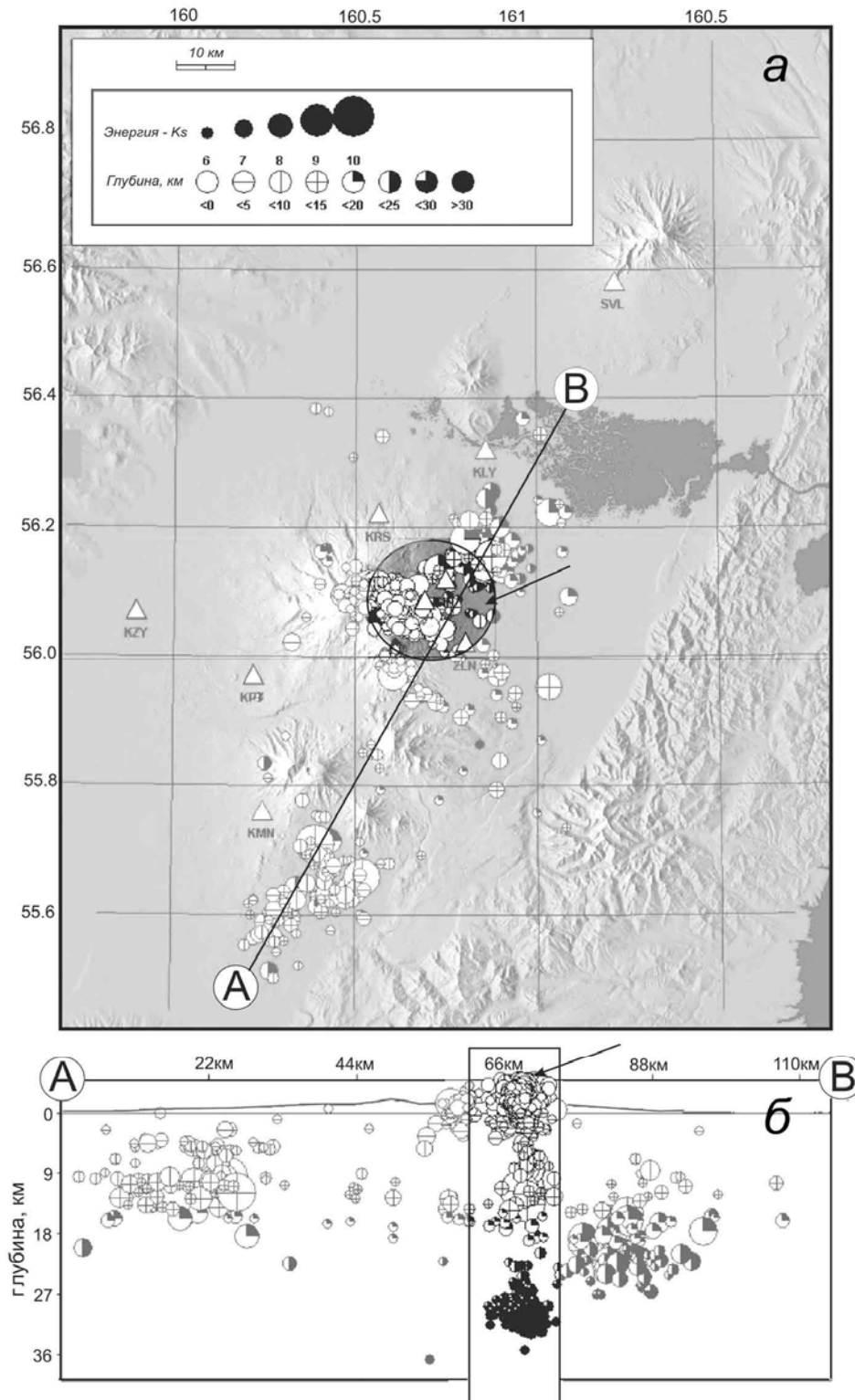


Рис. 5. Сейсмичность района вулкана Ключевской в 1999-2005 гг. На карте (а) затемненным кругом показана центральная эпицентральная зона вокруг вулкана Ключевской, диаметр зоны 25 км; на разрезе (б) – проекция эпицентров землетрясений на вертикальную плоскость по линии А-В. На рис. 5а в условных обозначениях показаны величины энергетических классов K_s и глубины очагов землетрясений, км. На рис. 5б в вертикальном прямоугольнике показан разрез для центральной эпицентральной зоны вулкана, выделенной на рис. 5а.

1. Сейсмичность в районе Ключевского вулкана сосредоточена в нескольких сейсмоактивных зонах. Наиболее активная зона располагается вокруг центрального кратера вулкана (рис. 5). Центральная зона показана на рис. 5а окружностью радиусом 12.5 км. С этой центральной зоной связаны вершинные и побочные извержения последних десятилетий.

2. Данные сейсмологических наблюдений показывают, что сейсмичность под Ключевским вулканом в пространстве и во времени распределяется неравномерно по глубине и меняется во времени [9, 10, 38 и др.]. Это показывают рис. 6 и 7.

Наблюдаются большие различия в распределении числа и энергии землетрясений на различных глубинах под Ключевским вулканом. Выделяются две активные зоны: первая в интервале глубин от 20 до 40 км и вторая - на глубинах от 5 км ниже уровня моря до вершины вулкана. Между этими двумя зонами располагается менее активная сейсмическая зона. Это показали ранее исследования, выполненные В.И. Горельчик с соавторами за период с 1978 по 1996 гг. [9]. Сейсмологические наблюдения за последующие годы, с 1997 по 2005 годы, подтверждают эти выводы (рис. 6, 7).

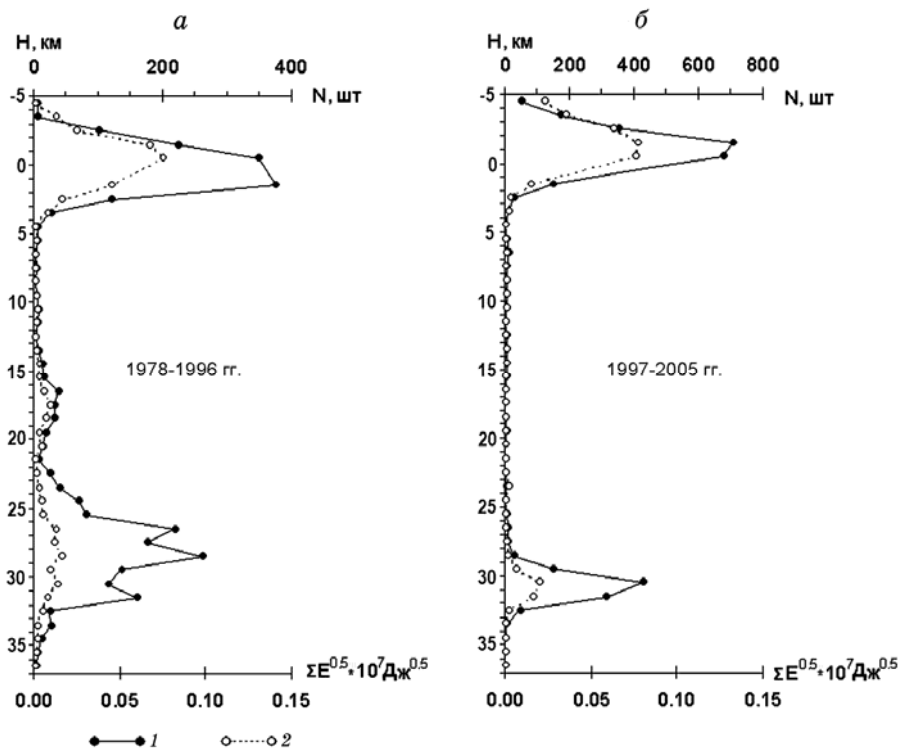


Рис. 6. Зависимость числа землетрясений (1) и суммарных условных деформаций (2) от глубины H за 1978-1996 гг. (а), за 1997-2005 гг. (б) для $K_s \geq 5,5$.

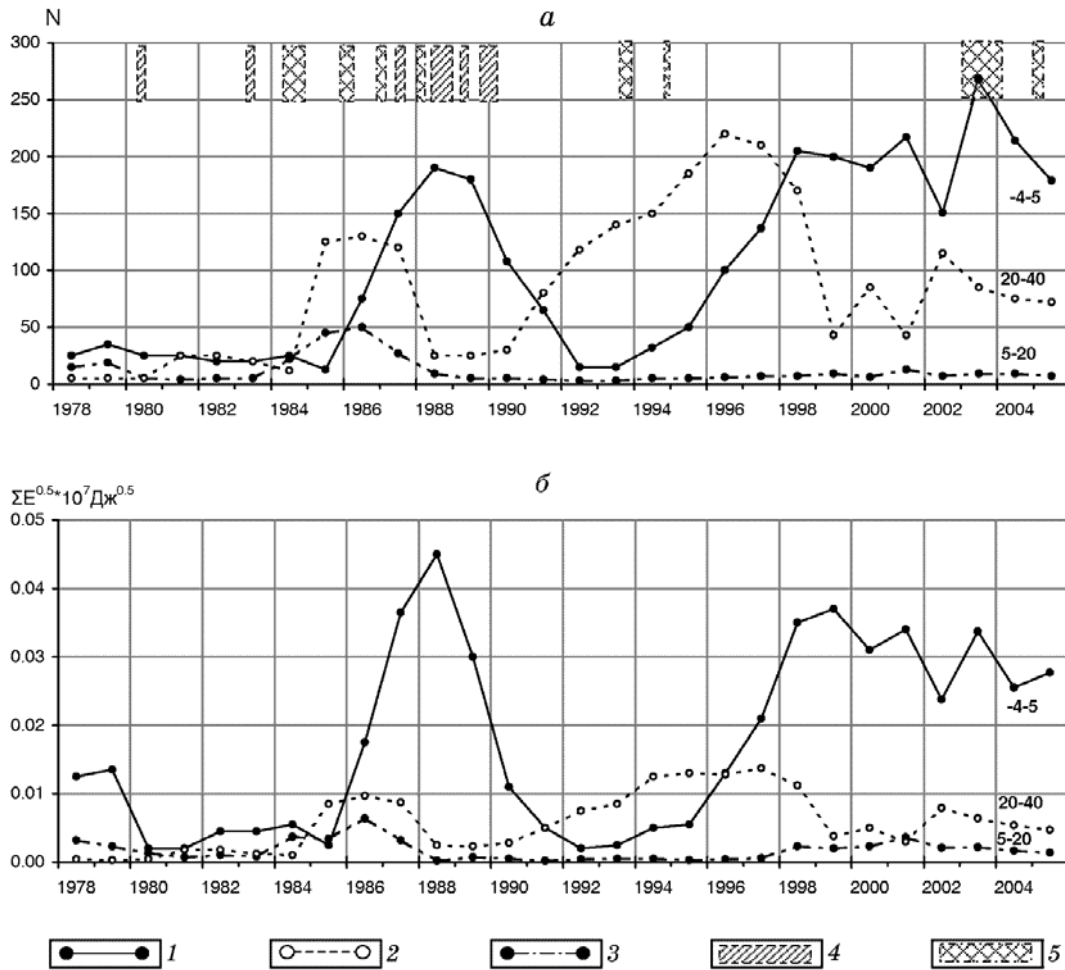


Рис.7. Графики изменения среднегодовых значений N числа землетрясений энергетического класса $K_s \geq 5,5$ (*a*); графики условных деформаций для этих землетрясений, $\Sigma E^{0,5} 10^7 \text{Дж}^{0,5}$ (*б*), где E – энергия землетрясений; графики построены для трёх характерных интервалах глубин: 1- от 4 км выше уровня моря до глубины 5 км; 2 - глубины 20-40 км; 3 - глубины 5-20 км; 4 – время побочных извержений; 5 – время вершинных извержений.

3. Установлена определенная связь между расположением очагов землетрясений и состоянием вулкана: в периоды покоя или подготовки вершинных извержений, когда в питающем очаге (или очагах) происходит накопление магмы, очаги землетрясений под Ключевским вулканом приурочены преимущественно к глубоким горизонтам земной коры (от 20 до 35-40 км). Перед извержениями происходит перемещение очагов землетрясений в верхние горизонты земной коры и в постройку вулкана (рис. 7, 8). По данным [28], во время вершинных извержений 2003-2004 и 2005 гг. происходило прекращение длительного роя землетрясений на глубинах 20-

35 км при одновременном большом усилении сейсмичности в постройке вулкана. После этих вершинных извержений сразу возобновлялись многочисленные слабые землетрясения на глубинах 20-35 км.

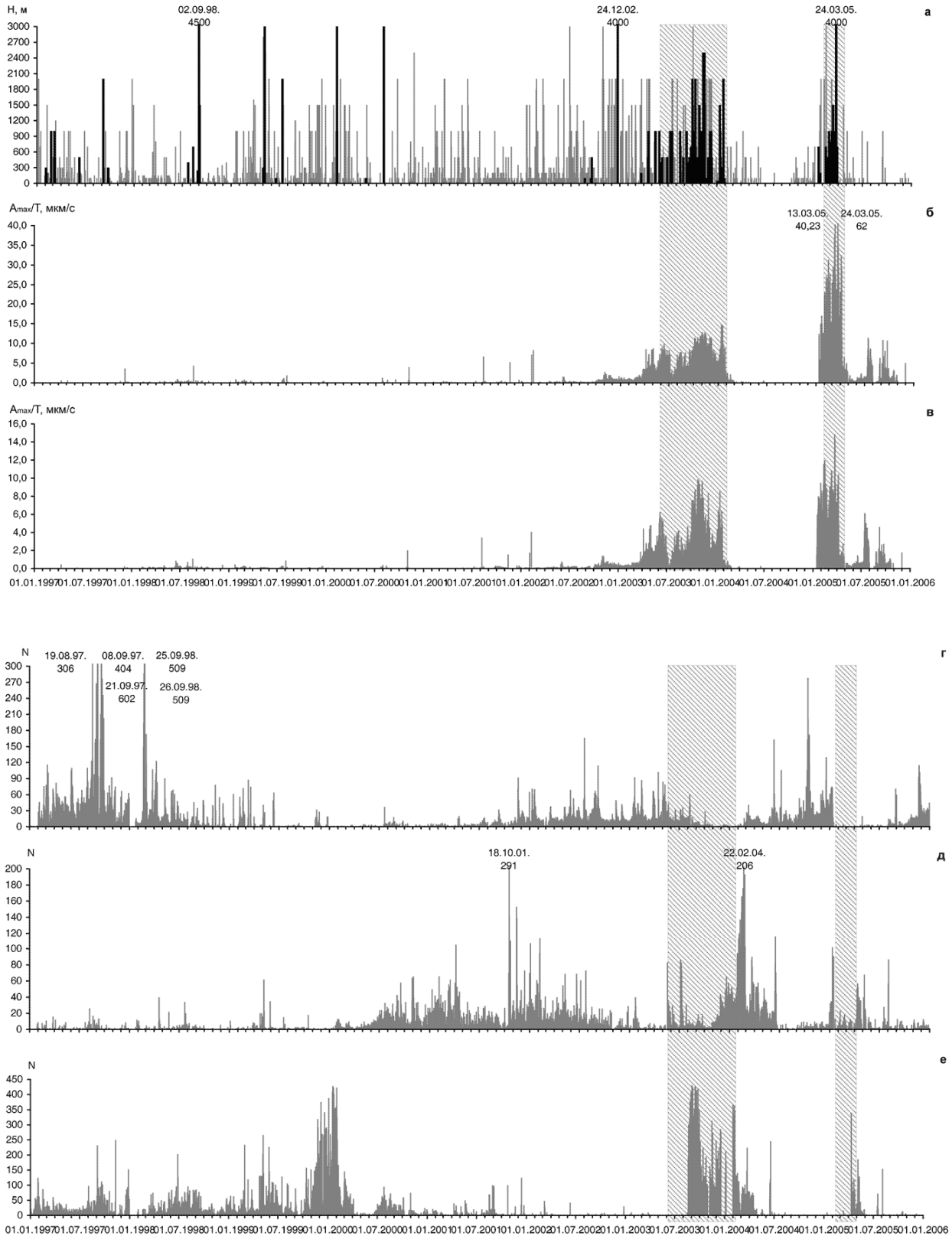


Рис. 8. Суточные характеристики сейсмической и вулканической активности вулкана Ключевской в 1997-2005 гг.: *a* - изменение высоты парогазовых (светлые линии) и газо-пепловых выбросов (залитые линии; высоты более 3.0 тыс. м указаны); *б* – вулканическое дрожание $A \text{ max} / T \text{ мкм/с}$; *в* – $A \text{ ср} / T \text{ мкм/с}$ – среднее значение вулканического дрожания; *г* – число вулканических землетрясений I – типа; *д* – число вулканических землетрясений II - III типа; *е* – число вулканических землетрясений IV типа. Вертикальной штриховкой показаны периоды вершинных извержений 18.05.2003 – 26.01.2004 и 16.01.- 06.04.2005 гг. Тип землетрясений дан по классификации П.И.Токарева [30]. Характеристики сейсмической активности приведены по результатам оперативной обработки данных на станции «Ключи» сотрудниками Ключевского отряда КФ ГС РАН.

4. Форма сейсмических сигналов, тип землетрясений соответствуют определенным глубинам, отражая процессы, которые происходят на этих глубинах (рис. 8).

П.И.Токарев выделил следующие типы вулканических землетрясений [30].

Землетрясения I типа: сходны с местными тектоническими, на записях преобладают объемные волны, происходят на глубинах 5-30 км, не связаны непосредственно с извержениями (рис. 8 *г*).

Землетрясения II типа: периоды продольных и поперечных волн больше, чем у землетрясений I типа; регистрируются интенсивные поверхностные волны; наблюдаются на глубинах 0-5 км и в теле вулкана; происходят роями, связаны с движением магмы в выводном канале; предвещают и сопровождают побочные извержения (рис. 8*д*).

Землетрясения III типа: сходны с землетрясениями типа II, но имеют более длинные периоды колебаний и более интенсивные поверхностные волны; происходят роями в постройке вулкана непосредственно перед началом побочных извержений (рис. 8*д*).

Землетрясения IV типа: взрывные землетрясения, сопровождающие извержение в кратере вулкана (рис. 8*е*).

Землетрясения V: вулканическое дрожание.

Ниже будет кратко рассмотрена сейсмичность в центральной сейсмоактивной зоне, расположенной вокруг Ключевского вулкана, за период с 1986 по 2005 гг. Более подробные сведения

изложены в работе [6]. На рис. 8 показаны активность вулкана Ключевской и характеристики сейсмичности в центральной сейсмоактивной зоне в 1997-2005 гг.

В 1986-1987 гг. сейсмическая активность Ключевского вулкана, связанная с его вершинными и побочными извержениями, захватывала все горизонты земной коры от собственно конуса вулкана до глубин 25-35 км. Наибольшая плотность эпицентров проявлялась на глубинах от 5 км ниже уровня моря до 4 км выше уровня моря, а также в интервале глубин 20-35 км (рис. 7). Отметим, что в 1986-1987 гг. вершинный кратер извергался в течение 30% времени, одновременно в течение 3-х недель происходил побочный прорыв «Предвиденный» на склоне вулкана. Вершинные извержения Ключевского вулкана сопровождалось роями землетрясений на глубинах менее 5 км, непрерывным вулканическим дрожанием (ВД), взрывными землетрясениями. Периоды покоя между вершинными и побочными извержениями характеризовались увеличением числа землетрясений на глубинах 20-30 км (декабрь 1985 - сентябрь 1986 гг.) и октябрь-декабрь 1986 г. Во время вершинного извержения в январе - феврале 1987 г. сейсмичность перемещается в верхние горизонты земной коры, появляется интенсивное ВД. На рис. 7 кратковременные вершинные извержения не показаны. В это время шла подготовка побочного прорыва «Предвиденный». Побочное извержение предвлялось роем землетрясений, описание этого роя дано в работе [38].

Начало вершинного извержения 28 июля 1987 г. предвлялось роем землетрясений: одного энергетического класса [33] $K_s=9.2$ и четырех более слабых. Извержение продолжалось 3.5 месяца до 11 октября 1987 г. В течение всего времени извержения сейсмическая активность под Ключевским вулканом наблюдалась на всех глубинах (рис. 7). В это же время отмечались необычные глубокие землетрясения в слое от 20 км и ниже. Землетрясения в нижних горизонтах земной коры и в переходном от коры к мантии слое (20-40 км) отличались низким предельным энергетическим классом (6.5), одинаковой формой записи и более длинными периодами колебаний (0.6-0.8 с). Такие события в дальнейшем В.И. Горельчик отнесла к глубоким длиннопериодным землетрясениям (ГДП) [8].

В 1988–1989 гг. сейсмическая активность Ключевского вулкана продолжала оставаться вокруг вершинного кратера и была представлена землетрясениями I-IV типов (по классификации П.И. Токарева [30]) и вулканическим дрожанием. В основном, землетрясения регистрировались в постройке вулкана и в приповерхностных горизонтах земной коры на глубинах менее 5 км (рис. 7). Размер области, охваченной землетрясениями, был близок 7 км. В этой же области происходили рои землетрясений, которые предвляли и сопровождали вершинные и побочные извержения. На глубинах 5 - 20 км в 1988-1989 гг. было отмечено всего несколько землетрясений с $K_s=7,3$. Нижние горизонты земной коры были более активны. На этих глубинах многочисленные, но слабые землетрясения образовали область с размерами 9x6 км, простирающуюся с СЗ на ЮВ [17].

Особенностью сейсмической активности в 1988-1989 гг. было возникновение роёв землетрясений. Продолжительность роёв была от 2 до 28 суток, общее количество роёв в течение двух лет составило 11. Энергетический класс K_s менялся от 6.0 до 8.9. Все рои происходили на глубинах менее 5 км, за исключением роя 2-30 августа 1989 г. В этом случае отмечались отдельные землетрясения с глубиной очага 15-20 км. В 1988-1989 гг., во время завершения подъёма побочных прорывов к вершине вулкана, вулкан Ключевской почти непрерывно находился в состоянии повышенной активности: в этот период времени произошло три побочных прорыва, почти постоянно был активен вершинный кратер (см. 1 раздел). Вершинные и побочные извержения сопровождалась ВД. Преобладающие периоды ВД находились в интервале 0.5–1.0 с.

Перед завершением работы побочного прорыва им. Скуридина на высоте 4200 м (26.07.1989-10.02.1990 г.) с 23 января по 6 февраля 1990 г. наблюдалось значительное увеличение количества поверхностных землетрясений и увеличение амплитуды ВД. В этот период число землетрясений превышало 100 в сутки, амплитуда ВД достигала 22 мкм/с.

Период после окончания вершинного и побочного извержений в феврале 1990 г. сопровождался неглубокими взрывными землетрясениями и периодическим ВД, а также были отмечены небольшие рои землетрясений. Наиболее продолжительные рои происходили с 13.03 по

03.04.1990 г. и с 19.09 по 04.10.1990 г. В конце апреля после окончания роя сейсмическая активность перемещается в нижние горизонты земной коры, в переходный слой от коры к мантии (рис. 7). Такая же картина наблюдалась после окончания осеннего роя 19.09-04.10.1990 г.

Слабо текущее вершинное извержение вулканского типа 1991-1992 гг. сопровождалось неглубокими поверхностными землетрясениями и, иногда, низкочастотным ВД. С середины 1991 г. отмечается устойчивое увеличение глубин гипоцентров землетрясений. Землетрясения образовывали рои на глубинах 20-35 км. Рои продолжались от нескольких дней до недель.

В целом 1986-1990 гг. были примечательным периодом в деятельности и развитии Ключевского вулкана. Наблюдалась большая активизация вулкана: произошли более четырех вершинных и шести побочных извержений; сильно возрос расход продуктов извержений; побочные извержения происходили на высотах 3900-4500 м и приблизились к вершине (раздел 1, табл. 2, рис. 3, 4).

В 1986-1990 гг. завершился подъём побочных прорывов от подножия вулкана на высоте 450 м в 1932 г. до 4500 м - в 1989 г. После этого эруптивная деятельность вулкана сосредоточилась в его вершинном кратере.

Эти явления сопровождалось увеличением почти в 10 раз числа землетрясений на глубинах 0–5 км и в постройке вулкана и, одновременно, уменьшением в 5 раз числа землетрясений на глубинах 20-40 км (рис. 7), где может находиться промежуточный магматический очаг Ключевского вулкана.

Вершинные извержения 1993 г. (с января 1993 по февраль 1993 г. и с 15.03 по 2.10.1993 г.) сопровождалось землетрясениями на глубинах до 5 км и 20-40 км и возрастающим, по мере развития извержения, ВД. В кульминационную фазу извержения 19 июля 1993 г. амплитуда ВД достигала 30 мкм (рис. 8б). Слабые глубокие землетрясения происходили в начальный период в январе-феврале и в первой половине июля, за месяц до кульминационной фазы извержения. Наиболее активны были глубины 20-40 км (рис. 7).

В 1994 г. увеличение частоты глубоких землетрясений отмечалось несколько раз, а именно: в конце февраля – начале марта, в мае-июне и в августе, непосредственно перед вершинным извержением, проходившим с 7 сентября по 2 октября 1994 г. (рис. 7). Весь период вершинного извержения 1994 года сопровождался непрерывным ВД. Амплитуда ВД достигла максимума во время пароксизмальной фазы извержения и была близка 16-20 мкм. Через два дня после окончания извержения амплитуда ВД снизилась почти до фоновых значений [8].

После окончания вершинных извержений 1994 года сейсмическая активность под Ключевским вулканом в 1995-1996 гг. проявлялась в виде появления отдельных всплесков ВД, поверхностных землетрясений и большого числа глубоких землетрясений (рис. 7).

Данные о высотах парогазовых и газо-пепловых выбросов в кратере Ключевского вулкана, показаны рис.8а, и пять характеристик его сейсмичности в 1997-2005 гг. приведены на рис. 8 б-е.

В 1997-2005 гг. сейсмическая активность продолжалась по-прежнему в интервале глубин 20-35 км, на глубинах 0–5 км и в постройке вулкана, причем в 1997-1998 гг. количество глубоких землетрясений было почти на порядок больше и иногда доходило до 500 в сутки (рис. 5, 7, 8з).

С начала 2000 г., в связи с активизацией вершинного кратера, увеличилось количество поверхностных землетрясений (рис. 8е).

С конца 2002 года вновь проявляется активность на глубине 20-30 км. Усиление сейсмической активности продолжалось и в начале 2003 года. Вулканическое дрожание, равное в начале года 0.2-0.5 мкм, увеличилось к концу марта до 1.5-3.0 мкм (рис. 8 б, в); продолжала оставаться активной зона глубин 20-35 км (рис. 8 з). За этими явлениями последовало сильное вершинное извержение 18.05.2003-28.01.2004 гг. (табл. 1, рис. 8).

После начала вершинного извержения 18 мая 2003 года сейсмичность перемещается в верхние горизонты земной коры и в постройку вулкана (рис. 7, 8). После извержения происходит обратный процесс: постепенно уменьшается количество поверхностных землетрясений (в

январе 2004 г.), увеличивается число землетрясений в промежуточной зоне, и вновь появляются землетрясения глубокие (глубина 20-35 км) (рис. 8).

Такой же показательный процесс миграции землетрясений с больших глубин к поверхности и обратно наблюдался перед вершинным извержением, проходившим с 16.10.2005 по 06.04.2005 г. и после него (рис. 8) и работа [28].

В ходе многих выполненных исследований выявлены свойства и особенности сейсмичности под вулканом Ключевской. Отметим некоторые из наблюдавшихся в течение 20 последних лет.

1. Среднегодовое число землетрясений на глубинах менее 5 км и расход вулкана имели максимум в 1986-1990 гг. во время более чем 6 побочных, 4-х вершинных извержений и образования многих радиальных трещин в верхней части конуса.
2. Перед и во время вершинных извержений происходило прекращение глубоких землетрясений, наблюдалось перемещение очагов землетрясений с глубины 20-35 км вверх на глубины 0-5 км ниже уровня моря и в постройку вулкана.
3. Перед вершинными и побочными извержениями появляются рои землетрясений, что является одним из главных прогнозных критериев. В то же время, необходимо учитывать, что окончание извержений также может сопровождаться роями землетрясений.

3. Вертикальные смещения на профиле Киргурич в 1979-2005 гг., их интерпретация

Для изучения деформаций земной поверхности на северо-восточном склоне вулкана Ключевской создана геодезическая сеть, включающая пункты линейно-угловых построений и нивелирные профили (рис. 2). Наиболее продолжительные и представительные результаты получены по повторным нивелировкам, выполненным на радиальном профиле «Киргурич» от площадки Р1 до площадки Р5. Установка реперов на профиле «Киргурич» проведена в 1978 г., начальная нивелировка выполнена в 1979 г. С 1979 по 1989 гг. нивелировки выполнялись от исходного репера, расположенного в 31 км от кратера; с 2001 по 2005 гг. работы проводились от

площадки P1 до площадки P5, расположенных в 26 и 11 км от кратера, соответственно. В последнем случае за исходный репер был принят центральный репер площадки P1. По мере выполнения нивелировок было определено, что на большом удалении от вулкана, изменения превышений лежат в пределах ошибок измерений. Поэтому было принято решение сократить длину профиля, что позволило сократить объем работ.

Значительные изменения вертикальных смещений обнаружены до начала побочного прорыва «Предсказанный», происходившего с 6 марта по 28 июня 1983 г., а также с 2001 по 2005 гг. (табл. 1, рис. 2 и 3).

При интерпретации деформаций поверхности вулкана предполагается, что эти деформации произошли в результате изменения давления в питающей магматической системе вулкана. В вулканологической практике [53, 62, 63] рассматривается три вида источника давления для моделирования деформаций поверхности вулкана: шаровая полость, горизонтальный диск и цилиндрическая полость. От выбора вида источника давления зависит форма расчетных деформаций. Расхождения глубины источника от вида модели могут достигать 2-5 км. В то же время принятые модельные источники давления относятся к полубесконечному упругому полупространству без учета рельефа местности, что тоже вносит определенную ошибку.

Несмотря на эти расхождения, важно не абсолютное значение глубины источника давления, а величина перемещения этого источника во времени. В данной работе в качестве эффективного источника давления рассматривается расширяющаяся сфера.

Данные нивелировок использованы для оценок глубины и размеров источника давления. Для расчетов взяты соотношения, полученные в [13]:

$$U_z = -2\Delta P \cdot R_0^3 \times \frac{(1-\nu^2)}{C} \times \frac{Z_0}{(r^2 + Z_0^2)^{3/2}} \quad (1)$$

где U_z - вертикальные смещения, C - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона, ΔP – избыточное давление в источнике, R_0 - радиус источника давления (шаровой полости), Z_0 - глубина источника давления.

Осесимметричный источник давления является наиболее простой моделью. Вертикальные деформации, вызванные таким источником, должны монотонно убывать с расстоянием от кратера. В действительности могут существовать несколько питающих магматических очагов, расположенных на разных глубинах, а также ответвления питающего канала. В благоприятном случае объем дополнительных источников давления мал по сравнению с центральным эффективным источником давления, и вертикальные смещения соответствуют соотношению (1). Проверка сделанных предположений, выполненная авторами в [54], показала, что относительные смещения нарастают по мере приближения к вулкану. Это означает, что центр расширения расположен под вулканом, и предположения о сферическом источнике допустимо. На рис. 9 показано, что непосредственно измеренные вертикальные смещения возрастают по мере приближения к вершинному кратеру Ключевского вулкана.

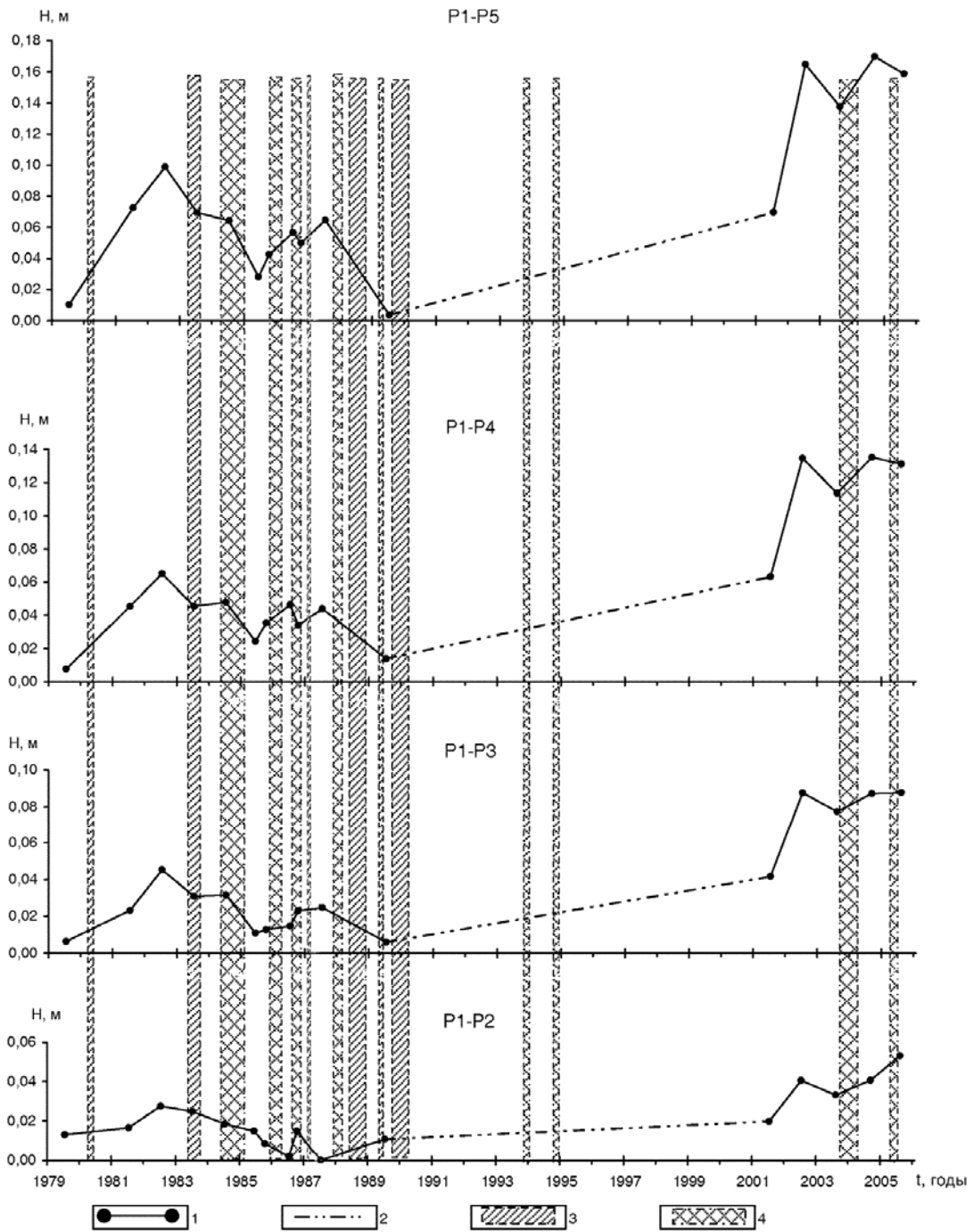


Рис. 9. Вертикальные смещения на профиле «Киргурич» за 1979 - 2005 гг., северо-восточный склон вулкана Ключевской. 1 - вертикальные перемещения между соответствующими площадками; 2 – длительные перерывы в наблюдениях; 3 – интервалы побочных извержений; 4 – интервалы вершинных извержений.

Глубину центра давления можно оценить двумя способами. При логарифмировании уравнения (1) получим:

$$\lg U_z = \lg A + \lg B, \quad (2)$$

$$\text{где } A = -2\Delta P \times R_0^3 \times \frac{(1-v^2)}{C}; \quad (3)$$

$$B = \frac{Z_0}{(r^2 + Z_0^2)^{3/2}} \quad (4)$$

Множитель A учитывает избыточное давление ΔP , геометрические размеры источника давления R_0 и упругие свойства окружающей его среды v и C . Учитывая, что свойства среды, избыточное давление и объем на небольших отрезках времени не могут значительно изменяться, принимая постоянными эти величины, можно рассчитать величины A для различных периодов наблюдений и затем оценить объёмы эффективного источника давления, соответствующие этим датам наблюдений. При постоянных значениях $\lg A$ форма графика $\lg U_z(Z_0, r)$ зависит только от глубины эффективного центра давления Z_0 . В этом случае оценка Z_0 производилась путем совмещения наблюденных кривых с теоретическими кривыми, рассчитанными для разных Z_0 [38].

Во втором способе величины Z_0 определялись из соотношения:

$$K = \frac{U_z(r_i)}{U_z(r_{i+1})}, \quad (5)$$

где r – горизонтальное расстояние репера i от центра кратера, U_z – изменения превышений реперов i и $i+1$ относительно исходного репера, удалённого от источника давления на расстояние, где вертикальные смещения малы [54]. В нашем случае это расстояние близко 20-30 км. Из (1) и (5) следует, что

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(K^{2/3} \times r_i^2) - r_{i+1}^2}{1 - K^{2/3}}} \quad (6)$$

Величины Z_0 находились для пар реперов, расположенных ближе к центральному кратеру в верхней части склона, где величины U_z значительно больше ошибок измерений (рис. 9). Ошибки определения глубины центра эффективного давления, определённые двумя способами, лежат в пределах $\pm 1-3$ км при абсолютных изменениях глубин от 3 до 25 км.

Определив Z_0 , из (1) и (3) или из (6), можно найти значения множителя A и далее оценить

R_0 :

$$R_0^3 = \frac{A \times C}{2\Delta P(1 - \nu^2)} \quad (7)$$

$$R_0^3 \equiv V \quad (8).$$

В выражение (8) для оценки объёма принято, что объём пропорционален третьей степени радиуса (R_0^3) эффективного источника давления.

Величина модуля Юнга C для разных глубин определялась по соотношениям:

$$C = 2\nu_s^2 \times \rho(1 + \nu); \quad \nu_s = \frac{\nu_p}{\kappa}, \quad (9)$$

где ρ - плотность, ν_p и ν_s - скорости P и S волн, $\nu = 0,25$. Значения ν_p , κ и ρ в постройке Ключевского вулкана и в земной коре нами определены по данным глубинного сейсмического зондирования и гравиметрических исследований [7 и др.]. Избыточное давление магмы определяли из соотношения:

$$\Delta P(H) = (\rho - \rho_m) \times g\Delta H, \quad (10)$$

где ρ_m - плотность базальтовой магмы, g - ускорение силы тяжести, ρ - плотность окружающих пород, ΔH - увеличение глубины. Расчёт величины модуля Юнга и избыточного давления для различных глубин приведен в работе [54].

Рассмотрим изменения величин Z_0 и рассчитанные изменения величин объёма δV , которые происходили в 1979-2005 гг.

Период 1979-1987 гг. характеризуется неглубоким расположением глубины эффективного центра давления. Напомним, что этот период характеризовался продолжительными вершинными и побочными извержениями (табл.1, рис. 3, 10). В этот временной интервал во время побочных прорывов наблюдалась наименьшая глубина эффективного источника давления (от побочного извержения 1983 г. до побочного извержения 1987 г.). Активная деятельность Ключевского вулкана закончилась в начале февраля 1990 г. К этому времени эффективный центр давления переместился вниз на глубины до 25 км. Перемещение центра давления на большие глубины

после окончания периода длительных побочных и вершинных извержений может быть связано с опустошением поверхностных магматических источников питания к этому времени.

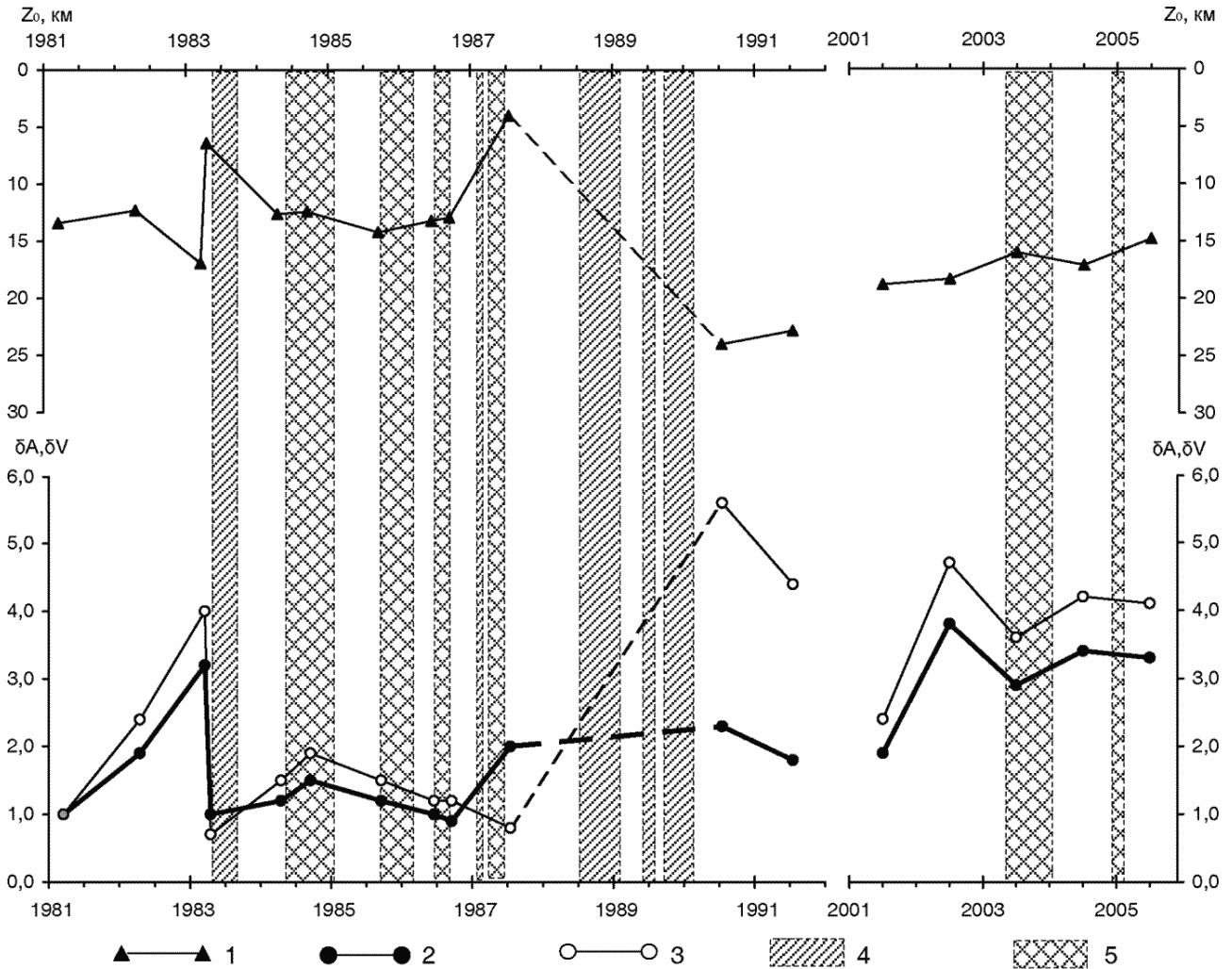


Рис. 10. Изменение глубины Z_0 эффективного источника магматического давления

под вулканом, относительные изменения величины $A = \frac{(2\Delta P \times R_0^3)}{C}$ и относитель-

ные приращения δV -объёма источника магматического давления в 1981 - 2005 гг.: 1

- изменение глубины эффективного источника давления; 2 - график относительной вели-

чины $\delta A = \frac{A_i}{A_{1981}}$; 3 - относительные изменения величины объёма источника магматиче-

ского давления $\delta V = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_{1981}}$; 4 - интервалы побочных извержений; 5 - интервалы вершин-

ных извержений.

В дальнейшем, начиная с середины 1990 г., наблюдается миграция центра давления в верхние слои земной коры. В 2003-2005 гг. после вершинных извержений эффективный центр

давления располагается уже на глубинах 15-16 км. Относительные величины δA и δV в 1990-2005 гг. близки. Наибольшее изменение δV отмечено в 1990-1991 гг. Как было отмечено ранее, к февралю 1990 г. закончился длительный период вершинных и побочных извержений. Но уже через 2.5 года произошло следующее вершинное извержение в 1993 г. и затем еще одно мощное вершинное извержение в 1994 г. На рис. 10 эти извержения не показаны, так как в этот период геодезические наблюдения не выполнялись. За полтора года до начала вершинного извержения 2003 года объём источника давления увеличился в 2 раза, после извержения наблюдалось некоторое уменьшение и затем вновь прирост объема источника давления перед извержением 2005 года.

Отмеченные особенности увеличения относительных размеров источника магматического давления наблюдались и перед побочными прорывами 1983 и 1987 гг.

В заключение раздела 3 отметим ряд важных свойств магматической питающей системы Ключевского вулкана, которые показали исследования вертикальных деформаций, проводившиеся на склонах вулкана в 1981-2005 гг.

В магматической питающей системе происходило значительное накопление магмы перед сериями извержений 1983-1990 и 2003-2005 гг.

Центр эффективного избыточного магматического давления перемещался в ходе деятельности вулкана в интервале глубин 25-5 км – от вероятной области накопления глубинных магм до неглубоких слоев, подстилающих постройку вулкана. В таком случае одним из основных мест накопления магм между извержениями может быть коровая часть питающего магматического канала и окружающая его разогретая оболочка, находящаяся в интервале глубин 25-5 км [36].

Наиболее высокое положение центра эффективного давления (4-6 км) наблюдалось в связи с побочными извержениями.

4. О свойствах магматической питающей системы, механизме деятельности, состоянии и следующих извержениях Ключевского вулкана

Более 30 лет авторы исследуют извержения гигантского базальтового Ключевского вулкана, связанные с ними сейсмичность и деформации, свойства его магматической питающей системы и механизм его деятельности. Последовательность исследований, расчетов и основных работ названа во Введении. Обобщение результатов проводилось в работах [32, 34, 36, 37, 38, 44 и др.].

Указанные работы основывались в значительной мере на данных о деятельности Ключевского вулкана в 1932-1986 гг. Они дополнены в разделах 1-3 этой статьи сведениями о деятельности, извержениях, землетрясениях и деформациях Ключевского вулкана в 1987-2005 гг.

Кроме наших работ, названных выше и во Введении, в последующие годы появился ряд публикаций других авторов, посвященных сейсмичности, образованию магм и механизму деятельности Ключевского вулкана. Среди них надо отметить работы В.И. Горельчик с сотрудниками о сейсмичности Ключевского вулкана, ее связи с глубинной деятельностью и о природе необычных многочисленных длиннопериодных землетрясений, происходящих на глубинах 20-40 км под Ключевским вулканом [5, 6, 8, 9]. Глубинная модель литосферы, строение земной коры, источники магматического питания и землетрясения под Ключевским вулканом рассмотрены в работе [4]. Точные последние сведения о землетрясениях Ключевского вулкана и их связи с деятельностью были получены для периода 2001-2005 гг. [28]. Данные об изменениях вершинного кратера, вершинных извержениях Ключевского вулкана и их взаимосвязи в 1969-1992 гг., полученные по аэрофотограмметрическим наблюдениям, приведены в работах [12, 44 и др.]. Рассматривались свойства выводного канала и жерла вулкана и изменения, происходящие в них при извержениях [19].

В данной статье мало затрагиваются вопросы петрологии, геохимии, образования магм, обсуждавшиеся в [44 и др.]. Но надо отметить, что в работах по этим проблемам получены выводы о том, что одной из главных причин магнообразования под вулканами Курило-Камчатской дуги, в том числе и под Ключевским вулканом, является поток летучих, подни-

мающийся в астеносферу от верхней границы погружающейся океанической плиты и тихоокеанского фокального слоя [27, 45 и многие другие].

Названные сведения, работы и данные, в целом, подтверждают свойства модели магматической питающей системы и механизма деятельности Ключевского вулкана, развитой в работах [32, 34, 36, 37, 38, 42, 44 и др.], и позволяют также дополнить и уточнить модель. Так, например, в работе [15] рассматриваются условия образования даек под Ключевским вулканом при нестационарном тепловом режиме.

Кратко опишем основные свойства рассматриваемой модели, отмечая возможные ее уточнения.

Напомним перед этим, что полное описание рассматриваемой модели содержится в работах [32, 36, 37 и 44], а уравнения и соотношения, позволяющие рассчитывать свойства магматических питающих систем вулканов, их даек, каналов, очагов, величины избыточного магматического давления, тепловую мощность струй и облаков извержений, вероятную продолжительность и количество продуктов извержений, вероятный характер деятельности вулканов, приведены в работах, содержащихся и названных в книге [36]. Важный пример их использования содержится в работе [35].

Итак, по рассматриваемой модели, глубинные процессы под Ключевским вулканом развиваются снизу вверх следующим образом.

Верхняя граница погружающейся тихоокеанской плиты и сейсмофокального слоя, находящаяся под Ключевским вулканом, глубина около 160 км.

Положение пояса вулканов Курило-Камчатской дуги на земной поверхности определяется процессами, происходящими в сейсмофокальном слое и у верхней границы плиты. В очагах землетрясений сейсмофокального слоя у Камчатки и Курильских островов выделяется количество энергии, которое на два порядка превышает тепловую энергию пород, извергаемых всеми вулканами Курило-Камчатской дуги [32]. У верхней, более активной части сейсмофокального слоя может находиться источник энергии вулканической деятельности. По геохимическим дан-

ным [45 и др.], от верхней границы погружающейся плиты может подниматься поток флюидов, способствующих плавлению вещества мантии. Область образования первичных магм Ключевского вулкана может начинаться под ним на глубине около 160 км и должна иметь большой объем. Размеры площади верхней границы плиты, с которой собирается энергия, летучие и первичные расплавы Ключевского вулкана, могут значительно превышать 1000 км². При подъеме расплавов и летучих к земной поверхности происходит их очень большая концентрация, так как площадь кратеров вулканов меньше названной площади плиты в 10⁴-10⁵ раз [37 и др.].

Астеносфера, область образования и подъема магм к промежуточному очагу Ключевского вулкана, глубины 160-40 км.

Под вулканами в астеносфере уменьшаются скорости сейсмических волн и увеличивается их поглощение [32, 36 и др.]. Это показывает, что в больших объемах астеносферы под вулканами может происходить частичное плавление вещества астеносферы, сегрегация и образование магм. При частичном и особенно при полном плавлении значительно уменьшается плотность вещества, и в вязкой астеносфере начинается гравитационная конвекция. Подъем менее плотного вещества может происходить в форме диапиров, астенолитов и магматических колонн. По расчетам, наиболее быстро подъем может происходить в вертикальных астеносферных магматических колоннах; их радиус для камчатских вулканов может равняться 0.3-1.0 км [36, 37 и др.]. В этих колоннах может происходить дифференциация магм. Декомпрессия, происходящая при подъеме вещества мантии в астеносфере, способствует плавлению; при остановках течения магмы в колоннах возможно возникновение вертикальной конвекции в них [21, 23].

Избыточное магматическое давление в астеносферных колоннах возрастает по мере уменьшения глубины и достигает своих максимальных значений на тех глубинах, где плотность магмы становится равной плотности окружающих пород. По расчетам, если колонна заполнена основной магмой со средней плотностью 2.85 г/см³, а боковое давление стен жерла в постройке невелико, то основание непрерывного магматического канала, протягивающегося из астеносфе-

ры до кратера Ключевского вулкана, должно находиться на глубине около 60 км, и на глубине до 50 км, если средняя плотность магмы в колонне равна 2.65 г/см^3 . Избыточное магматическое давление в таком канале может достигать максимальных значений 1000-2000 бар на глубине 30 км [36 и др.]. Магма должна быстро выжиматься из астеносферы в вышележащие слои литосферы, коромантийный слой и земную кору. Мала вероятность образования крупных очагов жидкой магмы в астеносфере под Ключевским вулканом [37].

Промежуточный магматический очаг в коромантийном слое, глубина 40-20 км.

Подъем магм из астеносферы, происходящий путём гравитационной конвекции, заканчивается под литосферой и земной корой, где резко возрастает вязкость среды. Так как средний расход базальтового Ключевского вулкана равен $60 \times 10^6 \text{ т/год}$, то это означает, что из астеносферы поднимаются более $25 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ магм, которые накапливаются в интервалах времени между извержениями в лежащей под ней части магматической питающей системы вулкана. Наиболее благоприятные условия для накопления глубинных основных магм должны быть в коромантийном слое, где прочность окружающих пород пониженная, а избыточное магматическое давление или интрузивное давление максимально и может достигать 1000-2000 бар при средней плотности магм 2.85 г/см^3 .

Сейсмологические данные подтверждают, что такой промежуточный магматический очаг существует под Ключевским вулканом на глубинах 20-35 км и имеет поперечные размеры до 12 км [4]. Объем очага около 550 км^3 , что вдвое превышает объем вулкана, 250 км^3 . Температура среды вокруг промежуточного магматического очага равна $600-800^\circ\text{C}$, не менее 400°C [34]. В такой среде возможны только пластические или упруго-пластические деформации [36].

При непрерывном поступлении магмы в промежуточный магматический очаг Ключевского вулкана увеличивается его объем, могут образоваться различные интрузии, часть которых может быть связана с гравитационной конвекцией в верху астеносферной колонны. Вокруг очага и интрузий должны меняться напряженное состояние среды и происходить пластические и упруго-пластические деформации. Они могут вызывать многочисленные слабые землетрясения.

Своеобразие длиннопериодных землетрясений, возникающих в этой области, описаны в работах [8, 9 и др.]. Авторам данной статьи представляется, что возникновение трещин в упруго-пластической среде при движении магмы является более вероятной причиной этих длиннопериодных землетрясений, чем импульсы давления в магме, заполняющий существующие трещины.

Промежуточный магматический очаг должен быть одним из основных мест дифференциации магм в питающей системе Ключевского вулкана. Он может быть источником побочных извержений ареальной зоны вокруг вулкана, которые находятся на расстояниях 12 и более км от вершины и изливают высокомагнезиальные базальты [34, 36, 46 и др.]. Из промежуточного магматического очага магма поднимается в земную кору по следующей коровой части магматической питающей системе вулкана.

Важное свойство промежуточного магматического очага Ключевского вулкана проявилось в 2001-2005 гг. во время сильных вершинных извержений вулкана в VII 2003 - I 2004 г. и I-IV 2005 г. (табл. 1, рис. 3, 8). По данным [28], в 2001-2005 гг. на глубинах 20-35 км наблюдалось большое количество слабых землетрясений (рис. 5). Но их рой прерывался во время названных вершинных извержений, а интенсивная сейсмичность наблюдалась в это время под вулканом на глубинах менее 5 км (рис. 8). Это говорит о том, что во время сильных вершинных извержений происходит отток магмы из промежуточного очага на глубинах 20-35 км.

Коровый участок магматической питающей системы вулкана, глубина 20-5 км. Магматический питающий канал или каналы поднимаются с глубин 20-5 км к верхней части магматической питающей системы, периферическим очагам и вулканической постройке Ключевского вулкана. Различные свойства этого участка питающей системы рассмотрены в работах [34, 36]. Радиус квазистационарного питающего магматического канала заключен в пределах 25-250 м. Избыточное давление магмы в нем может превышать 400 бар. Вокруг вертикального цилиндрического магматического канала должен находиться слой окружающих пород, нагретых до 600°C и более. Его толщина на глубине 10 км может превышать 200-300 м. Он образует пластическую

оболочку вокруг магматического канала, препятствующую прорывам магмы из канала в окружающую среду. В том случае, если такие прорывы происходят, то они имеют форму вертикальных даек на всех глубинах, кроме малых глубин [14, 15].

За время существования вулкана, которое может достигать 7000 лет, из питающего канала вулкана в окружающую среду на глубинах 20-30 км могло внедриться, по верхним оценкам, около 4000 даек, в среднем по 1-2 дайки в год, общим объёмом 700 км^3 . Их число убывает на порядок на расстоянии примерно 8 км от кратера. Объем среды, окружающий питающий магматический канал на глубинах 0-20 км и в постройке вулкана на расстояниях до 8 км от кратера, может быть заполнен на 1/6 часть вертикальными дайками прошлых извержений.

На глубинах 5-20 км происходят вулканические или вулканотектонические землетрясения. Их количество и энергия условных деформаций меньше, чем на глубинах 20-35 км или в постройке вулкана и подстилающих её породах от вершины вулкана до глубин 5 км [6 и др.] (рис. 6). На глубинах 5-20 км возникают рои землетрясений, связанные с побочными извержениями вулкана, которые могут указывать места внедрений магмы во вмещающие породы. Землетрясения начинаются на расстоянии примерно 1 км от центральной оси питающего канала. Это объясняется тем, что внутри этой области температура нагретых пород выше 650°C [34].

По геодезическим данным определялось изменение глубины эффективного источника давления под Ключевским вулканом. В 1981-1987 гг. она менялась от 3 до 15 км, что было в хорошей корреляции с меняющейся глубиной центра выделившейся сейсмической энергии [36, 38, 44, 54 и др.]. Похожие явления наблюдались в 1991-2005 гг. (рис. 7 и 10). Возможно, что меняющиеся глубины эффективного центра источника давления указывают места возникающих скоплений магм внутри пластической оболочки канала или внедрения крупных радиальных даек других интрузий из канала в окружающую среду.

В питающем магматическом канале на глубинах 20-5 км должна происходить дифференциация магм, возможны вертикальная конвекция и опускание более плотной магмы в промежуточный очаг. Здесь в значительной мере может происходить формирование тех базальтов, кото-

рые извергались из вершинного кратера и при всех побочных извержениях на склонах постройки Ключевского вулкана на высотах более 950 м в 1944-2005 гг. [46 и др.].

Магматическая питающая система в постройке Ключевского вулкана и подстилающих ее слоях от глубины 5 км до вершины вулкана на высоте 4750 м:

Это сложная, очень активная завершающая часть магматической питающей системы вулкана. В ней находятся вертикальный питающий канал, многочисленные радиальные дайки, трещины и кратеры побочных извержений, сложная постройка гигантского стратовулкана, его вершинный кратер и могут быть горизонтальные пластовые и конические внедрения и периферические магматические очаги вулкана. Сквозь эту часть магматической питающей системы проходит вертикальный питающий канал, заканчивающийся в жерле вулкана. Его радиус должен быть значительно меньше радиуса вершинного кратера, равного 350 м.

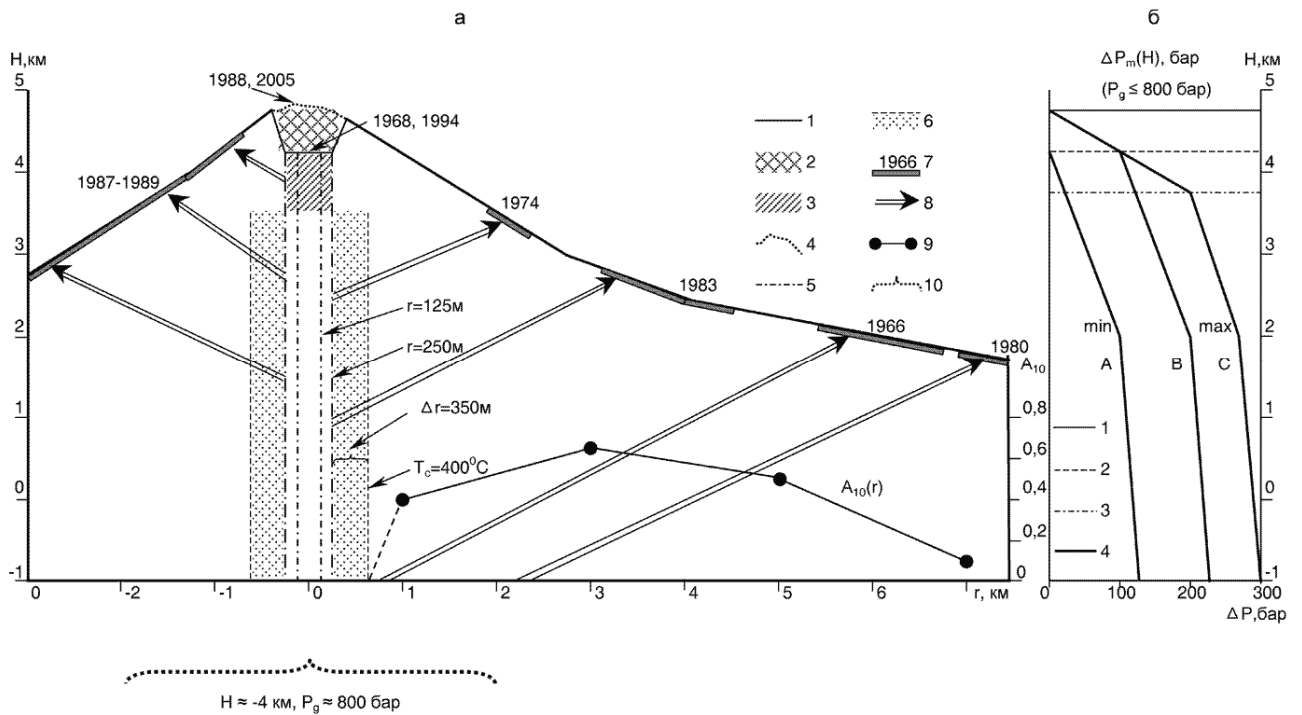


Рис. 11. Условия для возникновения побочных и вершинных извержений Ключевского вулкана: а - расположение побочных извержений 1966 - 1989 гг. на склонах конуса, изменения вершинного кратера в 1984-2005 гг., схема вертикального питающего канала. 1 - склон конуса; 2 - дно провала в вершинном кратере в 1968 и 1994 гг.; 3 - «пробка» в верхней части канала; 4 - поверхность заполненного кратера в 1988 и 2005 гг.; 5 - границы вертикального питающего канала при радиусах 125 и 250 м; 6 - пластическая (вязкоупругая) оболочка вокруг питающего канала толщиной 350 м с темпера-

турой $T \geq 400^\circ \text{C}$; 7 - места и годы побочных прорывов на склонах конуса вулкана; 8 - вероятное направление внедрения радиальных питающих даек побочных извержений; 9 - изменение сейсмической активности $A_{10}(r)$ в постройке вулкана выше дневной поверхности с удалением от оси вулкана; 10 - возможное положение периферического магматического очага на глубине 4 км под земной поверхностью; б - зависимость избыточного магматического давления ΔP , бар от высоты вулкана H , км в верхней части его питающего канала. 1 - высота вулкана при заполнении вершинного кратера, наблюдавшегося в 1988 и 2005 гг.; 2 - уровень дна вершинного кратера после его провалов в 1968 и 1994 гг.; 3 - возможный уровень низа «пробки» в жерле вулкана; 4 - графики А, В и С избыточного магматического давления $\Delta P_m(H)$, бар при различных условиях в верхней части канала; P_g - давление газов (пояснения в тексте).

Строение центральной части Ключевского вулкана от его вершины на высоте 4750 м до глубины $H = -1$ км под уровнем моря и на расстоянии $r = 0-7$ км от центра вулкана, а также условия возникновения его побочных и вершинных извержений 1966 - 2005 гг. показаны на рис. 11 а, б. На рис. 11а показаны вершинный кратер и изменения высоты верха магматической колонны в нем, места побочных извержений 1966-1989 гг. (в 1991-2005 гг. их не было), схематическое строение вертикальной магматической колонны в постройке вулкана и возможное положение периферического магматического очага на глубине 4 км под вулканом, а также изменения сейсмической активности $A_{10}(r)$ в постройке вулкана по мере удаления от его центра.

Уровень кромки вершинного кратера находится на высоте около 4700 м. Его поперечные размеры 700 м. Вершина вулкана располагается выше 4700 м, когда вершинный кратер заполнен до краев и в нем появляются шлаковые конусы, возвышающиеся над кромкой кратера. 19 сентября 1988 г. абсолютная отметка вершины вулкана достигла 4835 м [12]. После пароксизмальных извержений происходит опустошение вершинного кратера, и его дно опускается на величину 500 и более м; такое опускание наблюдалось в последние годы в октябре 1994 г. [12 и др.]. Соответствующие изменения вершины вулкана показаны на рис. 11а.

Поперечник дна вершинного кратера около 300-500 м. Вероятно, что диаметр вертикальной питающей колонны в постройке вулкана не превосходит эту величину. На основании этого

и данных предыдущих исследований [34, 36 и др.] принимается, что радиус колонны может быть равен 125 и 250 м (рис. 11а).

Данные аэрофотограмметрических наблюдений [12 и др.] подтверждают нижнюю оценку. Колодцеобразные провалы, возникавшие при разных уровнях дна кратера в 1968, 1972, 1984 и 1987 гг. в его наиболее активной части, почти совпадают по положению в плане и по размерам. Эти данные свидетельствуют о том, что подводящий канал вулкана вертикален и имеет диаметр, близкий к 250 м.

Предполагается, что в верхней части питающей колонны может находиться «пробка» мощностью 500 м, сложенная продуктами предыдущих вершинных извержений (рис. 11а).

Вокруг магматической питающей колонны, существующей несколько тысяч лет, должна быть зона разогретых окружающих пород. По расчетам [34, 36 и др.], толщина оболочки вокруг колонны, нагретой до температуры более 400°C , в основании Ключевского вулкана равна 350 м (рис. 11а). В этой оболочке должны преобладать неупругие деформации и отсутствовать вулкано-тектонические землетрясения. Нанесен график изменения сейсмической активности A_{10} в постройке вулкана на расстояниях $r = 1-7$ км от его центра (рис. 11а). Величина A_{10} равна количеству землетрясений энергетического класса $K_s = 10$, происходящих в год на площади 10^3 км^2 (шкала для энергетической классификации камчатских землетрясений приведена в работе [33]). График $A_{10}(r)$, приведённый на рис. 11а, взят из работы [34] и относится к периоду 1971-1985 гг. A_{10} является одним из основных параметров, определяющих интенсивность образования упругих разрывов и сейсмического процесса.

Под постройкой вулкана, в толще осадочных пород на глубине около 4 км может существовать периферический магматический очаг [36, 41 и др.]. По верхним оценкам, величина его радиуса может достигать 2 км. Его положение схематически показано на рис. 11а.

Оценки избыточного магматического давления магмы ΔP_m в вертикальной магматической колонне в постройке вулкана приведены на рис. 11б. При расчётах принималось, что плотность постройки вулкана выше уровня 2 км является средней между плотностью лав и пеплов Ключ-

чевского вулкана и равна $\rho_c=2.0$ г/см³, плотность пород основания вулкана от высот 2 км до глубины 1 км под вулканом $\rho_c=2.4$ г/см³, а плотность магмы в канале $\rho_m=2,5$ г/см³. На рис.11б показаны три варианта расчётов: А, В и С. В варианте А принимается, что магматическая колонна начинается на дне глубокого открытого кратера глубиной 500 м. В варианте В принимается, что вершинный кратер от его кромки на высоте 4700 м до глубины 500 м заполнен свободным столбом магмы, а ниже рост избыточного давления магмы ΔP_m (Н) замедляется литостатическим давлением окружающих пород. В варианте С предполагается, что свободный столб магмы и пирокластики высотой 1 км находится в кратере от уровня его кромки до основания предполагаемой пробки на глубине 1 км, где его давление равно 200 бар. Графики ΔP_m (Н) на рис.11б и предыдущие аналогичные расчёты [34 и др.] показывают, что избыточное магматическое давление в питающем канале внутри постройки Ключевского вулкана может равняться 100-300 бар на высоте 2 км над уровнем моря и меняться от 150 до 300-400 и более бар в слоях осадочных пород и в основании вулкана на глубинах 1-3 км под ним. Изменения зависят от высоты верха подводящей магматической колонны. Величины давления минимальны в случае, когда верх колонны находится на 500-1000 м ниже кромки кратера. Избыточного давления величиной 150-400 бар достаточно для образования новых даек и силлов.

Все крупные события на Ключевском вулкане в 1968-1994 гг. завершились проседанием магматической колонны и образованием провалов в вершинном кратере. Начало заполнения провала свидетельствует о новой активизации вулкана [12 и др.].

Ещё более высокое давление могут иметь газы, выделяющиеся при кипении магм в верхней части магматического питающего канала вулкана.

Известно [22 и др.], что кипение основных магм с температурой 1000-1200°С возможно на глубине 0.5 км, если содержание воды в магме равно 1 вес %, возможно на глубине 3,3 км, если содержание воды 3 вес %, и на глубине 7.5 км, если содержание воды 5 вес %; присутствие углекислоты увеличивает глубину вскипания магм. Содержание воды в первичных магмах Ключевского вулкана равно 2.2-2.9 мас. % [46]. Судя по этим цифрам, кипение базальтовых магм в

питающем канале Ключевского вулкана может происходить в интервале глубин от ~3 км под вулканом до высоты ~1 км в толще основания вулкана. Давление вулканических газов, выделяющихся на глубине около 3 км, может превышать 800 бар. Выше уровня вскипания магмы давление газов может значительно превышать давление магмы, если газы находятся в протяженных вертикальных каналах.

В рассматриваемой верхней части магматической питающей системы Ключевского вулкана, под подножием вулкана и в его постройке, происходит непрерывное разделение глиноземистых базальтов на обогащенную газами часть, которая будет извергаться через вершинный кратер, и дегазированную часть, которая может изливаться при побочных извержениях на склонах и подножии конуса вулкана на расстояниях до 12 км от вершины.

В верхней части магматической питающей системы происходит окончательное формирование материала побочных и вершинных извержений.

Примерно одинаковое избыточное магматическое давление нужно для разрушения пробки в жерле вулкана и начала вершинного извержения и для образования побочных прорывов дегазированной магмы [34, 36].

Накопление в верхней части магматической питающей системы значительного количества свободных газов усиливает фумарольную деятельность и вероятность извержений в вершинном кратере.

После описания свойств пяти частей магматической питающей системы Ключевского вулкана рассмотрим его состояние.

В те периоды времени, когда магматическая питающая система Ключевского вулкана находится в состоянии, близком к среднему, вероятно следующее развитие его деятельности. Сначала сильная фумарольная деятельность и небольшие извержения в вершинном кратере, заполняющие его, главной причиной которых является высокое давление газов. Затем внедрения дегазированной магмы, образование даек и появление побочных прорывов.

Общее количество изверженных продуктов Ключевского вулкана распределяется следующим образом между его побочными и вершинными извержениями. В 1932-1990 гг. при побочных извержениях Ключевского вулкана появилось 63.2-70.4 % (~67 %) общего веса продуктов извержений, в том числе 81 % его лав и 9-16 % пирокластики. В то же время из вершинного кратера было извергнуто 29.6-36.8 (~33%) общего веса его продуктов, в том числе 19 % лав и 84-91 % пирокластики. Если количество газов пропорционально объему пирокластики, то более 90 % газов выделяется через вершинный кратер [34]. После вершинных извержений 1993, 1994, 2003-2004 и 2005 гг. весовая доля продуктов вершинных извержений возросла с 33% до 53 % (табл. 1, рис. 4).

Так как общий расход продуктов извержений Ключевского вулкана мало меняется во времени [38, 42, 54 и др.], то аномальное увеличение доли дегазированных продуктов побочных извержений показывает, что в верхней части магматической питающей системы накапливается повышенное количество обогащенных газами магм; вследствие этого повышается вероятность того, что следующее извержение будет вершинным. И наоборот, преобладание продуктов вершинных извержений в течение значительного периода времени может свидетельствовать о появлении избытка дегазированной магмы в верхней части магматической питающей системы вулкана и о том, что повышается вероятность побочных извержений. Рассмотрим с этой точки зрения кумулятивные графики продуктов вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана за 1932-2005 гг. (рис. 4).

В 1984-2005 гг. преобладала деятельность вершинного кратера, и доля их в суммарном весе всех продуктов извержений Ключевского вулкана за 1932-2005 гг. увеличилась за эти годы с 0.6×10^9 т до приблизительно 2.2×10^9 т или с $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$, достигнув 2.2×10^9 т из 4.1×10^9 т. В то же время с 1991 до 2005 вообще не было побочных извержений, и их доля уменьшилась с $\frac{3}{4}$ до $\frac{1}{2}$, до 1.9×10^9 т из общего количества 4.1×10^9 т.

В дальнейшем будут происходить и вершинные, и побочные извержения со средним расходом $\sim 60 \times 10^6$ т/год. Однако, судя по приведенным цифрам и рис. 4, в 1984-2005 гг. в верхней

части магматической питающей системы Ключевского вулкана должна была существенно увеличиться доля дегазированной магмы. Из этого следует, что после сильных вершинных извержений Ключевского вулкана 1984-2005 гг. (табл. 1) возросла вероятность возникновения его новых побочных извержений. Оценки такого рода, сделанные в 1988 г. [38], оправдались: в 1989-2005 гг. преобладали вершинные извержения.

Во Введении и выше, в разделе 4, была кратко описана модель магматического питания Ключевского вулкана и его деятельности, разрабатываемая в течение 30 лет. В целом, новые данные, приведенные в разделах 1-3, подтверждают ее. Способы и уравнения для расчета свойств магматических питающих систем и механизма извержений вулканов мало затрагиваются в этой обзорной статье. Они собраны и приведены в книге [36] и др. работах.

В данной статье из-за ее размеров почти не рассматривается ряд других важных вопросов и проблем: прогноз извержений Ключевского вулкана, успешно начатый П.И. Токаревым [29 и др.], изменения в его вершинном кратере, устойчивость его конуса, природа и причина подъема его побочных извержений - от подножия вулкана на высоте 450 м - в 1932 г. до вершины вулкана на высоте 4500 м - в 1989 г.; связь деятельности вулкана с природными циклами, с землетрясениями с промежуточной глубиной очага, изменения состава его продуктов, петрологические и геохимические данные о происхождении магм Ключевского вулкана, роль летучих и вулканических газов, строение и свойства земной коры и верхней мантии под ним и другие.

Изучавшиеся в статье и названные выше вопросы могли бы рассматриваться в книге, посвященной проведенным большим длительным исследованиям этого крупнейшего вулкана Курило-Камчатской дуги, Европы и Азии, и быть среди основных задач его всестороннего дальнейшего изучения.

Заключение

Отметим ряд главных результатов и выводов этой обзорной статьи, полученных на основании данных об извержениях, сейсмичности и деформациях Ключевского вулкана в 1986–2005

гг. и предшествующих годах, и исследованиях механизма вулканической деятельности, произошедших с 1965 г. [36 и др.].

1. В 1987-2005 гг. произошли важные события и периоды деятельности Ключевского вулкана. В 1987-1989 гг. завершился подъём побочных прорывов с высоты 450 м к вершине вулкана, начавшийся в 1932 г. В 1987-1989 гг. произошла группа из 6 побочных и более 3 вершинных извержений; радиальные трещины, возникшие на склонах, и истоки лавовых потоков поднялись с высоты 2900 до 4500 м, всего на 200 м ниже кромки его вершинного кратера (поперечник около 700 м). Вершина конуса в 1988 г. достигла высоты 4835 м и приобрела форму, близкую к остроконечному конусу. Надо отметить, что во время такой интенсивной деятельности, происходившей в самой верхней части конуса вулкана на высотах 3900 и более могли возникнуть обрушения его конуса, но этого не случилось. Во время этих событий, в 1987-1988 гг., предполагалось, что вероятность сильного вершинного извержения больше, чем побочного [38, 42]. Это оправдалось: в 1990-2005 гг. эруптивная деятельность вулкана сосредоточилась в его вершинном кратере, где происходили пароксизмальные извержения и глубокие провалы дна кратера.

2. Рассматривались различные данные о сейсмичности Ключевского вулкана на глубинах до 40 км за 1978-2005, 1997-2005 и другие годы. Большинство землетрясений происходило на глубинах 20-35 км и на глубинах от 5 км под вулканом до его вершины. В первом интервале глубин происходит накопление глубинных магм в промежуточном магматическом очаге вулкана и возможно образование интрузий. На малых глубинах происходит накопление и формирование магм вершинных и побочных извержений, внедряются радиальные дайки, происходят рои землетрясений, связанных с извержениями. Примечательны перемещения землетрясений с глубин 20-35 км вверх во время активизации вулкана, а также прекращение землетрясений на глубинах 20-35 км во время больших вершинных извержений. Они свидетельствуют о том, что во время этих извержений происходит отток магмы из промежуточного магматического очага и о том, что под Ключевским вулканом существует непрерывный магматический канал, поднимающийся от промежуточного магматического очага на глубинах 20-35 км к вершине вулкана.

3. В 1979-2005 гг. проводились повторные измерения вертикальных деформаций по профилям на расстояниях до 30 км от вершины Ключевского вулкана. По этим данным глубина центра эффективного магматического давления под вулканом менялась в эти годы от 3 до 25 км. Были отмечены подъёмы центра давления с глубин 17 и 14 км до глубины 5 км перед большими побочными извержениями 1983 и 1988-1989 гг. (табл. 1), а также повышения глубины центра давления перед сильными вершинными извержениями 2003-2004 и 2005 гг.

4. Приведены основные свойства пяти частей магматической питающей системы Ключевского вулкана, которые протягиваются вертикально от глубин около 160 км до вершины вулкана.

Глубина ~160 км. Здесь находятся верхние границы погружающейся плиты и сейсмофокального слоя, источники летучих, энергии и расплавов.

Глубина 160-40 км. Это область астеносферы и переходного слоя от коры к мантии, больших объемов частичного плавления, образования магматических питающих колонн, поднимающихся с глубины 50-60 км до кратера Ключевского вулкана.

Глубина 4-20 км. Сюда выжимаются, поднимаются глубинные магмы, происходит их накопление в промежуточном магматическом очаге.

Глубина 20-5 км. Здесь находится коровая часть магматического питающего канала вулкана, окружённая разогретой пластической оболочкой.

Глубины от 5 км до вершины вулкана. Здесь происходит вскипание магм, формирование газонасыщенных магм вершинных извержений и дегазированных магм побочных извержений, их накопление перед извержениями. Избыточное магматическое давление может меняться в зависимости от уровня верха магматической колонны в выводном канале.

Сведения о свойствах этих частей и механизме вулканической деятельности кратко описаны в разделе 4. Более подробные сведения об их свойствах, способы расчета магматических питающих каналов, очагов и оценок возможной длительности и объемов извержений приведены в книге [36].

5. Наблюдения и исследования 1987–2005 гг. подтверждают приведённую модель магматического питания и деятельности гигантского базальтового Ключевского вулкана. Полученные результаты развивают теорию магматических питающих систем и механизма извержений вулканов.

6. Названная модель может уточняться и дополняться при ведении дальнейших работ по механизму вулканической деятельности, применяться при исследованиях по петрологии и геохимии, при прогнозе извержений и вулканической опасности Ключевского вулкана, а также при сравнительном изучении Ключевского вулкана и других гигантских базальтовых вулканов мира.

Авторы искренне благодарны большому кругу своих соавторов за их плодотворное участие в исследованиях, А.П. Хренову за многолетнее сотрудничество и обсуждение вопросов о вещественном составе Ключевского вулкана, С.Л. Сенюкову за карту сейсмической активности в районе Северной группы вулканов в 1997-2005 гг., Л.И. Гонтовой за интересные сведения о строении земной коры и мантии под вулканами Камчатки, Ю.В. Демянчуку, А.А. Коневу за помощь в получении и обработке данных полевых геодезических работ.

Данная работа выполнена при поддержке Программы № 16 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 2.7., и проектов РФФИ № 05-05-64730 и № 06-08-08169.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адушкин В.В., Зыков Ю.Н., Федотов С.А.* Механизм разрушения вулканической постройки вследствие потери устойчивости и оценка возможных размеров обрушения Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 81-95. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1995. Vol. 16, N 6. P. 667-684.)
2. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 гг., Камчатка) / Отв. ред. С.А.Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.
3. *Влодавец В.И.* Ключевская группа вулканов // Тр. вулканологических станций. 1940. Вып.1. С. 86-98.
4. *Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сенюков С.Л.* Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 2004. №3. С. 3-11.
5. *Горельчик В.И.* К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГ и Г ДВО РАН, 2001. С. 341-351.
6. *Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение его современной магматической деятельности (хроника событий 1987-1996 гг. и особенности связанной с ними сейсмичности) // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 3352-372.
7. *Горельчик В.И., Степанов В.В.* Сейсмичность района северной группы вулканов Камчатки в 1971-1972 гг. // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 198-218.
8. *Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 373-382.

9. *Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Сторчеус А.В.* Глубинные вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21-34.
10. *Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность района Северной группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 1988. №1. С. 90-100.
11. *Горшков Г.С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703-705.
12. *Двигало В.Н.* Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968 – 1988 гг. по аэрофотограмметрическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. 1991. №5. С. 3 – 18.
13. *Ефимов А.Б., Демин С.С.* Исследование напряженно-деформированного состояния вблизи магматического очага // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С.16-27.
14. *Ефимов А.Б., Ершова Т.Я., Федотов С.А.* О прорывах магмой питающего канала, образовании даек и других пластовых интрузий под Ключевским вулканом // Вулканология и сейсмология. 1996. № 1. С. 3-23. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1996. Vol. 18, N 6. P. 1-24.)
15. *Ефимов А.Б., Ершова Т.Г.* О термомеханическом режиме системы, окружающей магматический канал // Вулканология и сейсмология. 1998. №4-5. С. 79-87.
16. *Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Белоусов А.Б. и др.* Извержения и сейсмический режим северной группы вулканов в 1986-1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 3-20.
17. *Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Жданова Е.Ю. и др.* Извержения Северной группы вулканов Камчатки в 1988 – 1989 гг., сейсмологические и геодезические данные // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 3-33.
18. *Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Состояние вулканов Шивелуч и Ключевской в 1999 г., долгосрочный прогноз их деятельности // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 30-38.
19. *Иванов В.В.* Новый эруптивный цикл Ключевского вулкана и прогноз его развития (за период 2003-2005 гг. и далее) // Материалы ежегодной конференции, посвящённой дню вулкано-

лога, 30 марта – 1 апреля 2005 г. Петропавловск – Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2005. С. 87 – 95.

20. *Иванов А.И., Федотов С.А.* О прорыве оболочки магматического очага // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 3-13.
21. *Кадик А.А.* Вынос тепла из глубинных очагов вулканов в условиях естественной конвекции магмы // Вулканизм и глубины Земли. Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания 28-31 мая 1969 г. М.: Наука, 1971. С. 341-344.
22. *Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.* Вода в магматических расплавах. М.: Наука, 1971. 268 с.
23. *Кадик А.А., Френкель М.Я.* Декомпрессия пород коры и верхней мантии как механизм образования магм. М.: Наука, 1982. 120 с.
24. *Набоко С.И.* Извержение Билукая в 1938 г. // Тр. Лаб. вулканологии. 1947. Вып. 5. С. 122-134.
25. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дрознин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3-16.
26. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. Вып.11. 311 с.
27. *Селиверстов Н.И.* Гидроконвекционная гипотеза островодужного магматизма // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2003. №1. С.15-31.
28. *Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами в 2001-2005 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 94-100.
29. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 117 с.
30. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.

31. *Федотов С.А.* Большие трещинные извержения, их теория. Механизм Толбачинского извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение (1975 – 1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. Гл. XVI. С. 537-575.
32. *Федотов С.А.* О механизме вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и в сходных структурах // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т.1. Гл. 1. С. 18-35.
33. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
34. *Федотов С.А.* Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23-45. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1994. Vol. 15, N 3. P. 287-314.)
35. *Федотов С.А.* Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымском вулкане на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3-37. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1998. Vol. 19, N 5. P. 525-566.)
36. *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
37. *Федотов С.А.* О природе и механизме вулканической деятельности (результаты исследований 1957-2004 гг., перспективы) // *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. Заключение. С. 423-438.
38. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 4-42. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1990. Vol. 10, N 2. P. 165-225.)
39. *Федотов С.А., Иванов Б.В., Двигало В.Н. и др.* Деятельность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С.3-23.
40. *Федотов С.А., Иванов Б.В., Гущенко И.И. и др.* Вулканическая деятельность в Курило-Камчатской зоне в 1980-1984 гг. // Вулканология и сейсмология. 1986. №. 2. С.3-20.

41. Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменения их размеров во времени по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С.3-15.
42. 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. С.3-16. (Engl. transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1990. Vol. 9, N 4. P. 501-521.)
43. Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др. Извержения вулканов Ключевской и Шивелуч в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. с. 117-131.
44. Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Отв. Ред. С.А.Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Т. 1. Гл. 6. С. 106-155. (На русском и английском.)
45. Чурикова Т.С., Дорендорф Ф., Вернер Г. Природа геохимической зональности вкост простираия Камчатской островной дуги // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 173-190.
46. Хубуная С.А., Соболев А.В. Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // ДАН. 1998. Том 360. №1. С. 100-102.
47. Bulletin of the Global Volcanism Network. February 2003. V. 28. №2. P. 15.
48. Bulletin of the Global Volcanism Network. July 2003. V. 28. №. 7. P. 9-10.
49. Bulletin of the Global Volcanism Network. November 2003. V. 28. № 11. P. 8-9.
50. Bulletin of the Global Volcanism Network December. 2003. V. 28. №12. P. 8-9.
51. Bulletin of the Global Volcanism Network. April. 2004. V. 29. № 4. P. 10.
52. Bulletin of the Global Volcanism Network. March. 2005 V. 30. № 3. P. 6-7.
53. Dieterich H., Decker W. Finite element modeling of surface deformation associated with volcanism // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 29. P. 4094-4102.

54. *Fedotov C.A., Gorelchik V.I., Zharinov N.A.* Deformation, Earthquakes and Mechanism of Activity of Kliuchevskoy Volcano // IAVCEI Proceedings in Volcanology. Vol.3. Springer-Ferlag Berlin Heidelberg. 1992. P. 20-44.
55. *Fedotov S.A., Khrenov A.P. et Zharinov N.A.* Le volcan Klyuchevskoy: son activite de 1932 a 1988 et son Developpement Possible // L.A.V.E. 1989.№.18. P. 11-24.
56. . *Fedotov S. A., Zharinov N.A., Krenov A.P.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March, 1989. № 26. P.43.
57. *Fedotov S. A., Zharinov N. A., Krenov A.P.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March, 1990. № 27. P.33-34.
58. *Fedotov S.A., Zharinov N.A.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March, 1991. № 28. P.55-57.
59. *Fedotov S.A., Zharinov N.A., Gorelchik V.I., Zhdanova E.Y.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March, 1992. № 29. P. 65-68.
60. *Fedotov S.A., Zharinov N.A., Zhdanova E.Y.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March, 1993. № 30. P. 57-59.
61. The Great Tolbachik Fissure Eruption: geological and geophysical data 1975-1976. Ed. Fedotov S.A. and Markhinin Ye.K. Cambridge University Press. 1983. 341 p.
62. *Mogi K.* Relation between eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them // Bull. Earth. Res. Inst. 1958. V. 36. P. 99-134.
63. *Yokoyama I.* A model for the crustal deformation around volcanoes // J. Phys. Earth. 1971. V. 19. P. 199-207.
64. *Zharinov N.A.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March,1995. № 32. P. 84.
65. *Zharinov N.A., Khubunaya S.A., Demyanchuk Yu.V., Dvigalo V.N.* Kliuchevskoy // Bull. of Volcanic eruptions. March,1996. № 33. P. 79-84