

УДК 551.21

© 1994 г. ДРОЗНИН В. А., МУРАВЬЕВ Я. Д.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ
ВУЛКАНА АВАЧИНСКИЙ НА КАМЧАТКЕ (ЯНВАРЬ 1991 г.)**

Приведены результаты изучения извержения вулкана Авачинский в январе 1991 г. Анализируются данные по инфракрасной съемке и геохимической съемке, по динамике и энергетике эруптивного процесса. Сделаны предварительные оценки возможной вулканической опасности грязевых потоков, пеплопадов, геохимического загрязнения окружающей среды для окрестностей г. Петропавловска-Камчатского. Последнее извержение было эффузивно-эксплозивным, с индексом эксплозивности 0,64%. Тепловая мощность составила $2,565 \cdot 10^{10}$ МДж. Рассмотренные вулкано-гляциальные процессы типичны для Авачинского вулкана, а приведенные результаты могут лечь в основу оценок для более сильных извержений.

THE POWER AND ECOLOGICAL ASPECTS OF THE AVACHINSKY VOLCANIC ERUPTION IN KAMCHATKA, by Droznin V. A. and Muravyev Ya. D. The paper presents the results of study of the Avachinsky volcanic eruption which took place in January 1991. Data from the infrared survey, geochemical survey, dynamics and power of the eruption process are analyzed. Preliminary assessments are made of possible volcanic hazards to the Petropavlovsk-Kamchatsky environs from mud flows, ashfalls and geochemical contamination of the environment. The 1991 Avachinsky eruption was of the effusive-explosive type, the explosivity index 0.64%. The heat capacity was $2.565 \cdot 10^{10}$ MJ. The volcano-glacial processes that occurred at Avachinsky are common to this volcano and the presented results may be the basis of future estimates for greater eruptions.

(Received April 13, 1993)

Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Один из активных вулканов Камчатки — Авачинский, после 46 лет покоя возобновил эруптивную деятельность небольшим эффузивно-эксплозивным извержением 13—26 января 1991 г. Начиная с 1737 г. [7] извержения Авачинского вулкана происходили в 1772, 1779, 1827, 1855, 1878, 1881, 1894—1895, 1901, 1909, 1926, 1938, 1945 гг. [4, 5]. Кроме того, возможно, были извержения вулкана в 1789, 1828—1829, 1837 и 1927 гг. [6]. Судя по приведенным в литературных источниках сведениям, к сильным (пароксизмальным) извержениям этого вулкана можно отнести события 1737, 1779, 1827, 1855, 1894, 1926 и 1945 гг., которые происходили в среднем через $34,5 \pm 15$ лет.

Для пароксизмальных извержений вулкана Авачинский характерна мощная эксплозивная деятельность, кульминацией которой может быть выброс огромного объема раскаленного материала на окружающие склоны за несколько часов.

В результате, как правило, образуются грязевые потоки (лахары) и водные паводки, принимающие иногда катастрофические размеры. Так, извержения 1827 и 1926 гг. способствовали сходу мощных лахаров по Халактырской и Елизовской «сухим» рекам, доходивших до побережья Тихого океана с одной стороны и влившихся в р. Авача — с другой [5, 11]. Помимо грязевых потоков большую опасность для населенных пунктов Авачинской низменности представляют пеплопады, особенно для технических средств (авиации, электрокоммуникаций и т. п.), и ухудшение качества воды и атмосферного воздуха. Ряд химических элементов (хлор, сера, фтор и др.) поступают в окружающую среду, во много раз превышая предельно допустимую концентрацию (ПДК), что оказывает существенное

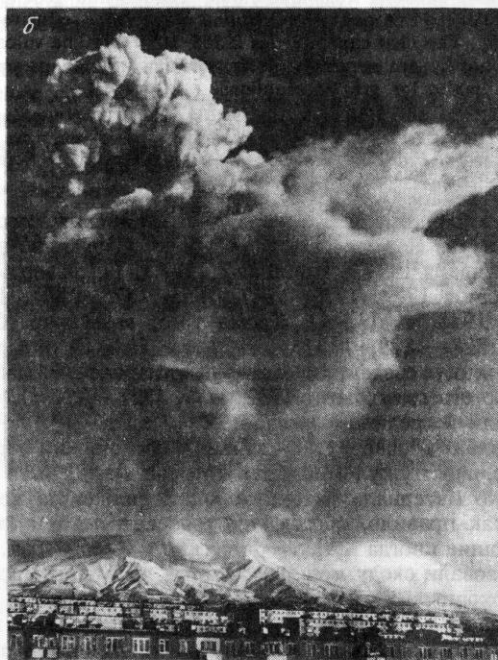


Рис. 1. Формирование эруптивной тучи над вулканом после первого (а) и второго (б) взрывов 13 января 1991 г. Фото В. А. Подтабачного

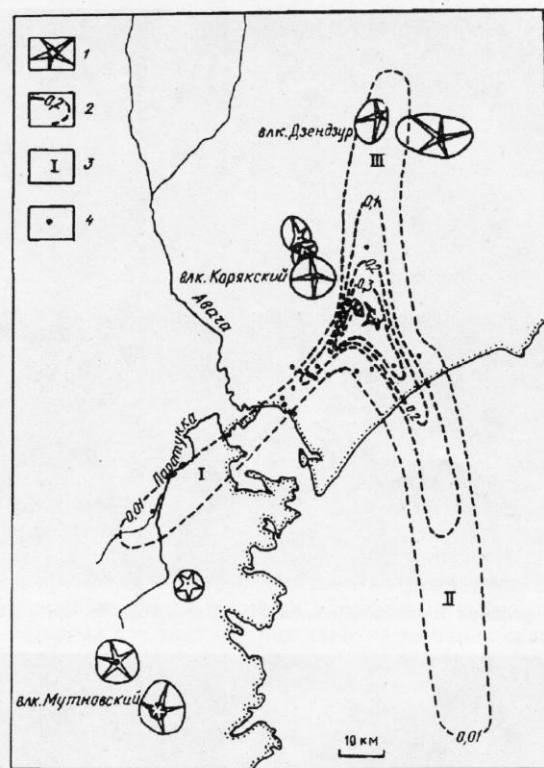


Рис. 2. Распределение пеплопадов извержения вулкана Авачинский на территории Восточной Камчатки: 1 — стратовулканы; 2 — изолинии массы тефры, отложенной на поверхности земли, кг/м²; 3 — главные пеплопады в ходе извержения 13 (I), 16 (II) и 17 января (III); 4 — основные точки измерений массы пепла

воздействие на физическое состояние и психику людей. П. Т. Новограбленов [11] описывает неприятные ощущения у населения г. Петропавловска-Камчатского во время пеплопадов извержения Авачинского вулкана в 1926 г.: «... в воздухе стоял несколько красноватый пепельный туман, ощущался резкий запах хлора и серы. Глазам было больно, пепел скрипел на зубах». Подобные ощущения были отмечены и жителями с. Пушино, которое находится в 120 км от вулкана.

Несмотря на то что извержение вулкана Авача в январе 1991 г. было незначительным по мощности, в ходе его развития отмечались (в слабой форме) все основные виды вулканических процессов, опасные для населения и народного хозяйства: пеплопады, лавовые потоки, раскаленные лавины, небольшие лахары, загрязнение природных вод и атмосферы химическими примесями и т. д.

Наблюдения за извержением 1991 г. Извержение началось 13 января в 11 ч 58 мин местного времени двумя взрывами с пятиминутным интервалом. Первый взрыв был преимущественно парогазовый с незначительной пепловой нагрузкой, а второй — пепловый (рис. 1). Верхняя граница облака, определенная по фотографиям из разных пунктов, достигала 4,2 и 7,0 км над уровнем моря. Пеплопад, сформировавшийся после второго взрыва, прошел на юг узкой полосой и достиг траверса вулкана Вилючик (рис. 2). После этих событий над кратером наблюдалась умеренная фумарольная деятельность с высотой парогазовых облаков до 250—300 м.



Рис. 3. Эруптивная колонна и пепловый шлейф над вулканом вечером 16 января. Фото В. А. Подтабачного

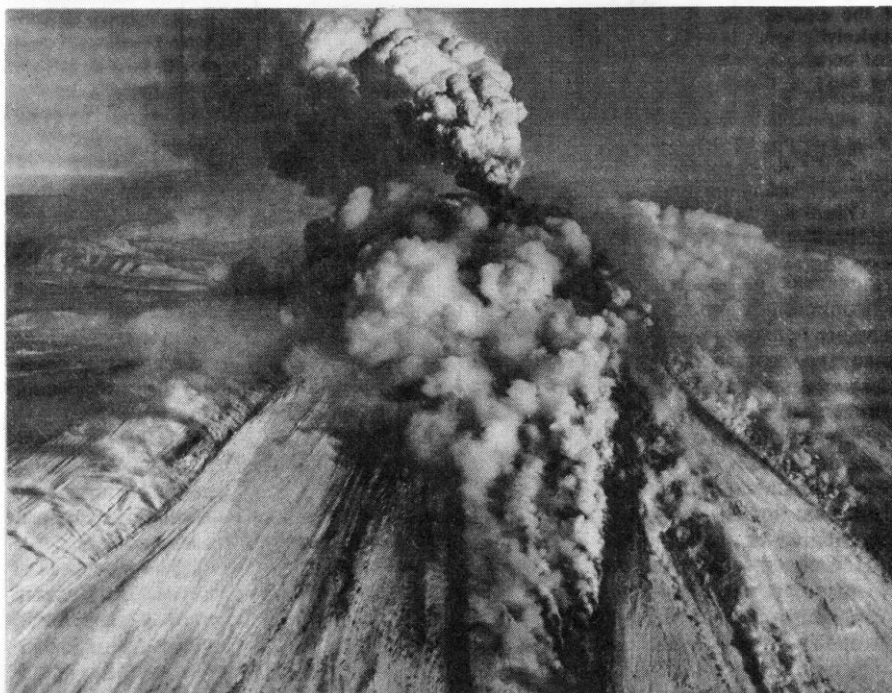


Рис. 4. Характер деятельности вулкана в максимальную фазу извержения 17 января. Фото Я. Д. Муравьева

Таблица 1

Распределение пирокластики извержения вулкана Авачинский в январе 1991 г.

Изолинии зон пеплопада, кг/м ²	Площадь зоны пеплопада, км ²	Средний удельный вес пепла в зоне, кг/м ²	Масса пепла, выпавшего в зоне, т
>1,0	1	1,200	1200
0,5—1,0	14	0,650	9100
0,3—0,5	70	0,350	24500
0,1—0,3	455	0,185	66150
0,01—0,1	1760	0,035	61600
< 0,01	2200	0,0035	7700
Сумма	4500	0,038	170250

Примерно через сутки при облете вулкана на вертолете было замечено выдавливание магмы из жерла в южной части днища кратера. К вечеру 16 января лава полностью заполнила кратер и начала переливаться через кромку на южные склоны молодого конуса вулкана.

По наблюдениям группы телеметрии ОМСП Института вулканологии, после двух часов ночи 16 января взрывы в кратере участились и постепенно усилились, но к утру стали реже и появился низкочастотный гул; выяснилось, что в юго-восточном направлении прошел пеплопад. В просветы облачности прослеживалась верхушка эруптивной колонны на высотах 4 км над уровнем моря (рис. 3), развернутая дугой на юго-юго-восток. По данным ИСЗ «Метеор», шлейф этого пеплопада протянулся в сторону океана на расстояние до 240 км. К ночи эксплозивная активность упала и высота парогазовых выбросов уменьшилась до 200—300 м, в то время как поступление лавы на внешние склоны продолжалось с прежней интенсивностью.

17 января после 10 ч 30 мин началось усиление эксплозивной деятельности вулкана. В 11 ч 20 мин произошел выброс вида «цветной капусты» на высоту до 600 м и начал формироваться шлейф пеплопада в северном направлении в сторону вулкана Дзендзур. По-видимому, это был кульминационный период извержения: пепловые выбросы происходили каждые 5—7 мин, скатывание раскаленных лавин отмечалось одновременно в северо-западном, южном и юго-восточном секторах конуса (рис. 4), образовавшийся грязевый поток двумя рукавами спустился к подножию горы Монастырь, достигнув отметки 900 м. Поступление лавы с постепенным снижением интенсивности, по-видимому, продолжалось до 24 января, а редкие раскаленные лавины при слабой фумарольной деятельности отмечались еще 26—27 января. Судя по всему, активные процессы в кратере вулкана прекратились к утру 28 января 1991 г.

Согласно измерениям В. Н. Двигало [16], общий объем лавового материала на конец извержения составил 12,71 млн. м³, причем только третья часть его излилась за пределы кратера, сформировав на юго-западном склоне конуса лавовый поток длиной 1600 м и общей площадью 0,33 км².

В табл. 1 приведены результаты расчетов количества изверженной пирокластики по измерениям массы выпавшего пепла в 50 пунктах. Суммарная площадь трех пеплопадов (рис. 2) составила 4500 км², а масса — 170 тыс. т. В результате пеплопада, прошедшего 13 января (I) на расстояние до 100 км, на поверхности отложилось не более 30 тыс. т пепла. Самый мощный пеплопад (II) отмечен 16 января: эруптивный шлейф прослеживается на космических снимках до 220—240 км, а масса выпавшего пепла составила 90 тыс. т. Третий пеплопад прошел на север более 100 км, а масса пепла могла превышать 50 тыс. т.

В ходе извержения впервые на Камчатке выполнены регулярные измерения динамики лавового потока методом тепловой съемки из наблюдательного пункта Института вулканологии. Проведение ИК-съемки интересно прежде всего в методическом отношении из-за большой длины трассы (26 км).

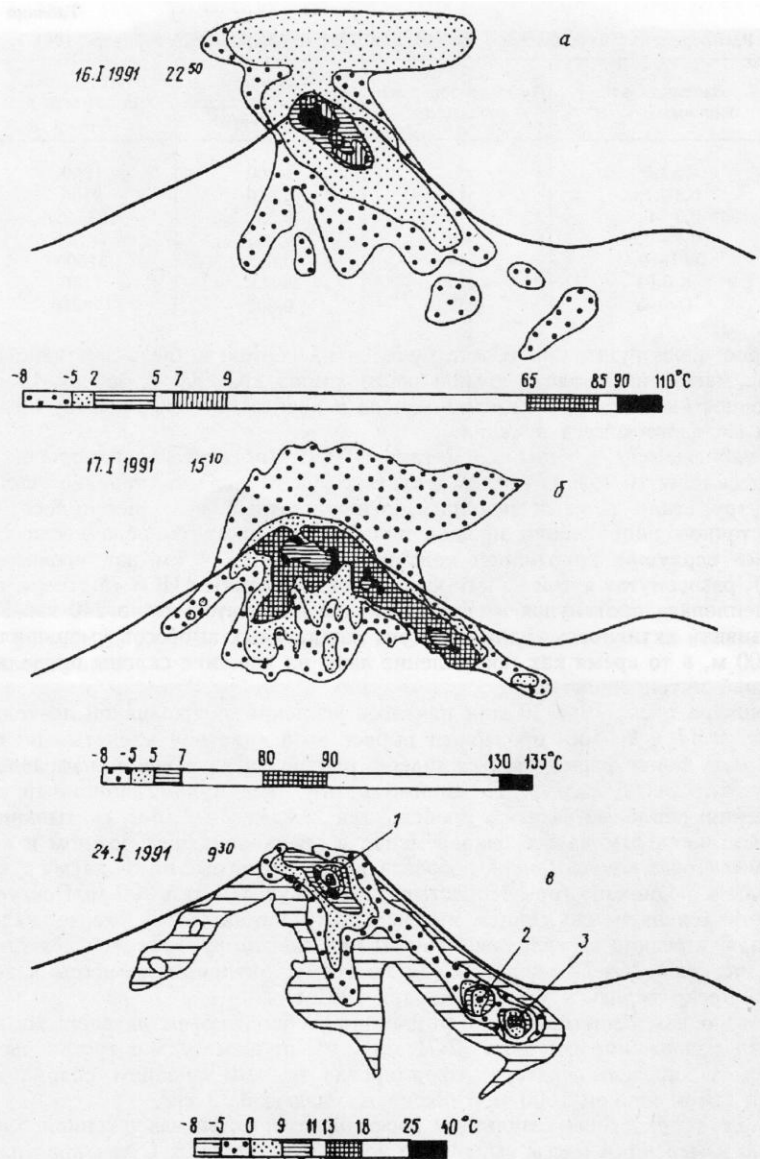


Рис. 5. Картина теплового излучения во время извержения в значениях температуры, регистрируемой на расстоянии 26 км, на 16, 17 и 24 января 1991 г. (а—в соответственно). Остальные обозначения см. в тексте

На снимках можно проследить важные детали хронологии формирования лавового потока (рис. 5). Так, 16 января к 22 ч длина потока составляла не более 300 м, хотя раскаленными лавинами уже были сформированы тепловые аномалии будущего его ложа и отложений грязевого потока и по визуальным наблюдениям в ночное время можно было бы полагать, что поток гораздо длиннее. К 10 ч утра 17 января длина лавового потока достигла 1060 м. Судя



Рис. 6. Структура инфракрасного излучения при остывании лавы и формировании фумарольных полей на вулкане Авачинский после извержения 1991 г.

по съемке, в 10 ч 21 января поток уже сформировался в длину, однако еще не началось образование двойного выступа в нижней части. Точка 2 (рис. 5) как тепловая аномалия на фронте лавового потока проявляется с 9 ч 20 мин 22 января. Максимальная температура 23 января фиксируется уже не на фронте потока (точки 1 и 2), а в точке 3 — месте образования раскаленных лавин.

В теоретическом отношении методики измерений интересно, что на снимках от 16 января фиксируются тепловые аномалии от выбросов в кратере, хотя их температура по мощности регистрируемого сигнала составляет 100° С. Немногим более высокие температуры (до 130° С) отмечены 17 января. Максимальные аномалии в последующие дни не превышали 40° С.

Структура теплового излучения при остывании лавы и формировании фумарольных полей на вулкане после 23 января приведена на рис. 6. Основным результатом количественных измерений и в этом случае заключается в том, что температура поверхности лавы, светящейся темно-красным цветом в ночное время, с расстояния в 25—26 км фиксируется как соответствующая температуре 100—130° С. Если предположить, что истинная температура была в пределах 500—600° С, то обычной схемой расчета поглощения в атмосфере нельзя объяснить значения измеренных температур.

В 1963 г. на кратере Авачинского вулкана выполнены геотермические измерения. Впоследствии, с 1978 г., эпизодически проводили инфракрасную съемку. Ее результаты позволяли констатировать, что до 1985 г. мощность и характер тепловыделения на кратере вулкана оставались неизменными. Обработка снимков ИК-съемки, полученных 12 марта 1988 г., показала возникновение тепловой аномалии в южной части днища кратера (рис. 7). Как выяснилось позже, именно на этом участке и вскрылось 13 января 1991 г. эруптивное жерло начавшегося извержения.

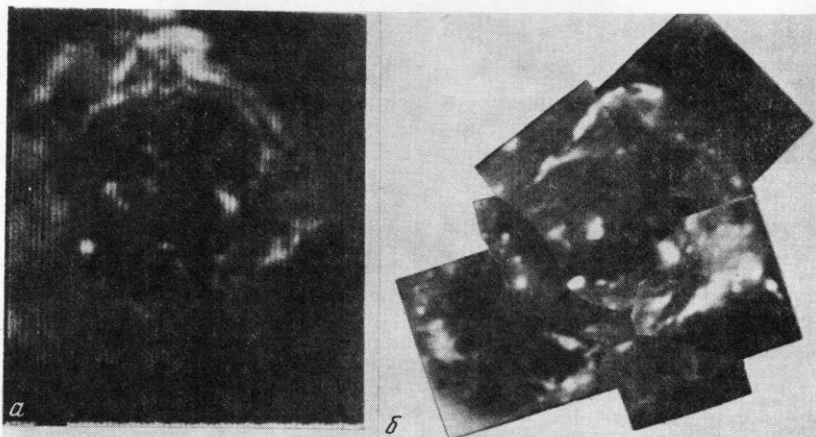


Рис. 7. Структура ИК-излучения кратера вулкана, на 6 сентября 1982 г. (а) и 12 марта 1988 г. (б), свидетельствующая о возникновении тепловой аномалии (показано стрелкой) в южной части дна кратера

Энергетические аспекты извержения. Энергетический эффект извержения, как известно, связан с выносом эндогенного тепла на дневную поверхность и в основном определяется массой и теплосодержанием изверженного материала. Согласно В. Н. Двигало [16], объем лавы, заполнившей кратер, составил 8,5 млн. м³, а излившаяся на склон — 4,24 млн. м³. Используя предложенное в работе [13] значение теплосодержания для изверженного вулканом пирокластического материала в 1 МДж/кг, получим (приняв плотность пород 2000 кг/м³) значения тепловой энергии 17,0·10⁹ и 8,48·10⁹ МДж соответственно. В согласии с оценками массы пеплопадов, тепловая энергия составила 3·10⁷, 9·10⁷ и 5·10⁷ МДж для первого, второго и третьего соответственно.

Таким образом, суммарный энергетический эффект извержения вулкана Авачинский 1991 г. составил 25,65·10⁹ МДж.

Динамика извержения, или его тип, характеризуется индексом эксплозивности: долей материала, поступившего в результате эксплозий, по отношению ко всей массе изверженного вещества. Извержение 1991 г. было эффузивно-эксплозивным, и средний индекс эксплозивности составил 0,64%. Индекс эксплозивности также можно рассматривать как долю тепла, рассеиваемого вулканом в атмосферу непосредственно в процессе извержения, по отношению ко всему теплу, вынесенному на дневную поверхность.

Магма, как отмечено еще А. Н. Заварицким, инертна по отношению к извержению — она лишь носитель тепла. Незначительная часть ее тепла работой передается вулканическому газу, расширением которого в целом и определяется характер извержения. Для реконструкции понимания механизма извержения необходимо определение количества газа, принимающего в нем участие, т. е. вычленение доли тепловой энергии, обуславливающей процесс извержения. Решению этой задачи посвящено большое число исследований, однако в практическом отношении результативность их недостаточна.

Чтобы получить значения представляющей интерес величины, воспользуемся соотношением из обобщающей работы С. А. Федотова [14]:

$$H = 4(3,8 \cdot 10^{-3} Q U^{-1} S^{-1})^{1/3}, \quad (1)$$

где H — высота верхней границы шлейфа, м; Q — тепловая мощность источников,

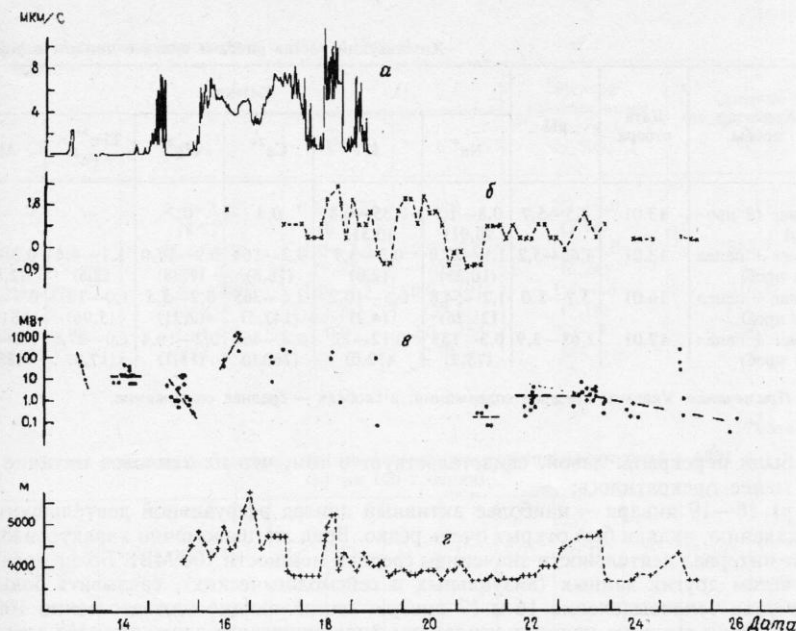


Рис. 8. Динамика извержения вулкана Авачинский в январе 1991 г. по данным инструментальных и визуальных наблюдений: а — среднееквадратическое значение амплитуды вулканического дрожания U по П. П. Фирстову (мкм/с); б — тепловая мощность Q парогазовой деятельности (МВт), расчет по формулам работы [14]; в — логарифм отражаемости $\lg Z$ у кромки кратера; г — высота H парогазового шлейфа по данным метеорологического радиолокатора (м)

ккал/с; U — скорость ветра на высоте шлейфа, м/с. Влияние температуры воздуха ($T^{\circ}K$) и градиента температур в атмосфере $\Gamma(^{\circ}C/км)$ учитывается формулой

$$S = g/T(\Gamma_c + \Gamma),$$

где Γ_c — адиабатический градиент температуры для сухого воздуха, равный 9,8 $^{\circ}C/км$.

Преобразуя формулу (1), получим расчетную зависимость

$$Q = 0,965 H^3 U \frac{\Gamma_c + \Gamma}{T} \cdot 10^{-6}, \text{ МВт.} \quad (2)$$

График расчетных значений тепловой мощности по выражению (2) в целом отражает динамику извержения. Можно выделить несколько участков, различающихся по мощности тепловыделения (рис. 8):

- а) 13 января — пепловые выбросы;
- б) 13—14 января — мощность тепловыделения колеблется от 10 до 100 МВт (в среднем ~ 20 МВт) с тенденцией к небольшому уменьшению. Значение тепловой мощности совпадает с тепловой мощностью вулкана на межэруптивной стадии, составившей на 1964 г. без учета разгрузки через донные фумаролы ~ 30 МВт [15];
- в) в ночь с 14 на 15 января, когда началось вулканическое дрожание, данных по высоте шлейфа нет;
- г) в течение дня 15 января уменьшение тепловой мощности до 0,1 МВт. Такое падение тепловой мощности, когда фумаролы Авачинского вулкана еще

Химический состав снега и снега с пеплом в районе

Характер пробы	Дата отбора	pH	Катионы					
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣFe ²⁺ + Fe ³⁺	Al ³⁺
Снег (3 пробы)	13.01	4,5—5,7	0,8—1,1 (0,91)	0,35—0,8 (0,51)	0,4	0,2	—	—
Снег + пепел (8 проб)	13.01	4,63—5,2	1,1—22,0 (10,31)	0,3—3,9 (2,0)	9,2—164 (76,5)	0,2—17,0 (7,38)	1,1—4,4 (2,5)	0,5—5,0 (2,88)
Снег + пепел (8 проб)	16.01	3,7—5,0	1,2—54,8 (21,25)	0,5—10,2 (4,2)	3,6—365 (142,5)	0,2—5,5 (2,21)	1,0—12,2 (5,96)	0,5—142 (51,7)
Снег + пепел (8 проб)	17.01	2,68—3,9	0,3—133 (73,2)	0,12—22 (12,0)	0,8—462 (260,0)	0,2—19,4 (11,1)	1,0—27,8 (17,9)	1,1—426 (236)

Примечание. Указаны пределы содержания; в скобках — среднее содержание.

извержения вулкана Авачинский в 1991 г. (мг/л)

Анионы				Недиссоциированные молекулы H ₄ SiO ₄	Средняя минерализация, мг
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻		
0,7	2,4—2,88 (2,72)	0,6—1,22 (0,8)	0,0	2,2—3,0 (2,73)	8,1
0,7—24,8 (7,7)	28,8—528 (241,0)	1,0—2,4 (1,32)	0,2—2,0 (0,9)	1,0—4,0 (3,24)	355,7
2,5—223 (81,2)	9,6—1287 (458,0)	1,0—7,3 (2,76)	0,6—101 (37,2)	1,5—16 (7,16)	814,1
69,1—1199 (682,7)	17—1491 (854,6)	0,0	2,0—263 (159,2)	7,2—91 (54,7)	2362

Таблица 3

Состав снеговых вытяжек из пеплов извержения вулкана Авачинский в 1991 г. (мг на 100 г пепла)

Номер пробы	Дата отбора	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣFe	Al ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	H ₄ SiO ₄	Общая минерализация, мг
146	13.01	54	8	404	13	17	25	17	1357	—	6	5,2	1906
149		10,8	—	500	—	62,5	28	—	1480	—	11	15	2107
150		27,4	4	219	5	9	10	4	682	—	2,3	3	966
156		71	11	551	57	—	—	22	1770	5,4	6,7	13,5	2508
158		80	9	678	95	—	—	—	2243	4	8,5	19	3136
159		66	11,5	621	77	—	—	149	1479	3	6	4	2416
161		56	10	402	64	—	—	103	1357	4	3,5	—	2000
A-1	17.01	57	10	386,5	4	12	150,5	236	1361	—	97,5	8	2322
202	19.01	73	25	324	—	91,5	90	138	1114	6	231	68,5	2161
203		43,5	8,5	206	5	15,5	86	91	489	—	217	28,5	1190
204		11	—	119	18	18	18	67	257	—	22	—	531
210	4.02	68	11	514	5	2,5	140	263	1662	10	50	4	2730
211		40	5	799	27	—	—	124	2000	11	78	7	3090
A-2	17.01	68	11	253	11	20	225	623	858	—	170,5	397	2636
A-3		38,5	6	135	5,5	8	124,5	350	434,5	—	77	26	1205

* Точки отбора проб показаны на рис. 9.

—50,2° С на высоте 8000 м и —18° С — на 3000 м) составлял 6,4 °С/км. Тепловая энергия пепла (см. выше) ≤ 10¹⁴ Дж. Расчетное значение превышения высоты облака над кратером H = 3300 м, т. е. абсолютная высота облака должна быть ~ 6000 м. По оценкам отдельных наблюдателей, эруптивное облако достигало высоты 8 км (превышение 5300 м). Это значение, по-видимому, является завышенным и, согласно уравнению (4), соответствует тепловой энергии в 5,5 раза большей, что мало вероятно.

Отметим, что тепло остывающего лавового потока не участвует в формировании парогазового шлейфа. Не трудно показать, используя соотношения теории теплообмена, что через ~ 20 ч теплоотдача с поверхности лавового потока после резкого уменьшения в дальнейшем начинает изменяться незначительно. При температуре поверхности лавового потока 100° С мощность теплоотдачи 3 кВт/м². Для кратера при площади 10⁵ м² это составляет 300 МВт, а для лавового потока при площади поверхности 3,3·10⁵ м² — 1000 МВт.

не были перекрыты лавой, свидетельствует о том, что их тепловое питание тем не менее прекратилось;

д) 16—19 января — наиболее активный эпизод эффузивной деятельности. К сожалению, вулкан был открыт очень редко. Вряд ли правомочно характеризовать этот интервал деятельности значением средней мощности 100 МВт. Более логично, с учетом других данных (визуальных и сейсмологических), связывать большие значения тепловыделения 16 и 17 января, составляющие соответственно 1000 и 400 МВт, с выносом пепла и усилением вулканического дрожания. Но тогда по аналогии следует полагать, что усилению дрожания 18 и 19 января также соответствует усиление эффузивной деятельности. В эти дни на графике тепловой мощности отмечается существенный разброс значений. Так, 19 января, когда вулкан был открыт непродолжительное время, в 10 ч 35 мин высота шлейфа составляла 625 м, а через 15 мин отмечалась лишь слабая фумарольная деятельность.

Отметим, что для выноса 16 января 90 тыс. т пепла, или 9·10⁷ МДж, при мощности 1000 МВт необходима продолжительность действия источника в течение суток. Такое же соотношение мощности тепловыделения и объема пепла наблюдается и 17 января. Учитывая точности определения мощности тепловыделения и объема пепла, можно говорить о сходимости оценок.

Согласно соотношению, предложенному Е. К. Мархининым [10], можно выполнить оценку весовой доли летучих компонентов C по высоте полета бомб (H, м):

$$2gH = 8 \cdot 10^3 C (2C^{0,3} - 1). \quad (3)$$

При высоте полета бомб 16 января до 600 м получим C = 1,2%. Теплосодержание водяного пара 2,7 МДж/кг. Следовательно, мощность тепловыделения, связанная с вулканическим газом, составит ~ 30 МВт, а общий вынос ~ 10⁷ МДж, т. е. ~ 7% от тепла, вынесенного с пеплом;

е) 19—30 января — мощность тепловыделения существенно снизилась, до 1 МВт. В отдельные моменты отмечались кратковременные выбросы тепла (25 и 30 января) и некоторое усиление тепловыделения (до нескольких мегаватт) 23 января.

Данные по количеству пирокластики за 13 января дают возможность оценить фактическую достоверность соотношения [15]

$$H = 1,24(1 + \Gamma/\Gamma_0)^{-3/8} Q^{1/4} \quad (4)$$

для расчета высоты облака H (м) от мгновенного источника по его тепловой энергии Q (Дж). На момент выброса градиент температур Γ в атмосфере (при

Следует обратить внимание на то, что соотношение (1), как и другие зависимости из работы [14], могут не отвечать тому рассредоточенному выносу тепла по периферии кратера, которое создается на Авачинском вулкане, так как они рекомендованы для точечных источников. Также необходимо обратить внимание на возможность прогрева стенок кратера лавовым материалом, заполняющим его, и вследствие этого на возможность выпаривания воды из вмещающих пород, что может затруднить оценку газового выноса.

Оценка влияния извержения на окружающую среду. Суммарное воздействие извержений вулканов на экологическую обстановку окружающих территорий складывается из характера извергнутых продуктов, индекса explosивности, вулканохимического загрязнения природных вод и атмосферы вулканическими газами и пеплом. Степень вулканической опасности зависит от мощности извержения и наличия на склонах вулкана несущих агентов (воды, снега, льда).

Изучение влияния пеплопадов на химический состав атмосферных осадков методом геохимической снегосъемки позволяет оценить вклад explosивной вулканической деятельности в загрязнение окружающей среды. Кроме того, водные вытяжки из пеплов (особенно их анионная часть) дают возможность качественно судить о летучих компонентах магмы, так как отбор проб эруптивных газов остается редким событием в вулканологической практике.

В ходе извержения Авачинского вулкана, а также в течение холодного времени года после его завершения отобрано более 40 образцов снега, загрязненного пирокластическим материалом; макрокомпонентный состав образцов приведен в табл. 2. Отбор образцов, приготовление снеговых вытяжек и химический анализ выполняли по методике, использованной для оценки выноса летучих и петрогенных элементов извержения вулкана Чикурачки в 1986 г. [10, 12]. В связи с разным количеством пепла в снеговых вытяжках (чаще < 100 г) и разного объема талой воды в пробах результаты анализа пересчитывали на стандартную навеску сухого пепла для получения данных, сопоставимых с материалами по извержениям других вулканов. Фоновое поступление химических примесей с атмосферными осадками определено по нескольким пробам чистого снега, выпадавшего как до извержения, так и после его завершения. Это позволило скорректировать степень вулканохимического загрязнения с учетом фонового уровня (табл. 3).

Снег, отобранный на склонах вулкана до его извержения, был слабо минерализован (до 8,1 мг/л с рН до 5,7). Для чистого и незначительно загрязненного пеплом снега характерна слабокислая среда (рН 4,7—5,7). По степени минерализации эти растворы относятся к пресным водам малой минерализации [1]. Снеговые вытяжки из тefры пеплопадов 16 и 17 января более минерализованы: при рН 2,7—5,0 средние величины минерализации равны соответственно 0,81 и 2,36 г/л.

Различия химического состава снеговых вытяжек из пеплов трех основных пеплопадов обусловлены, по-видимому, изменением состава изверженного материала и увеличением эмиссии эруптивных газов в ходе извержения. В составе водорастворимого комплекса пепла, выпавшего на поверхность снежного покрова 13 января, из анионов преобладает сульфат с очень незначительным присутствием ионов хлора и фтора. Катионный состав характеризуется большим содержанием кальция и наличием ионов магния. Обобщенная формула Курлова для состава этих вытяжек

$$M_{0,36} \frac{(SO_4)_{97-98}}{Ca_{63-77}Mg_{13-19}}$$

Состав снеговых вытяжек из пеплов 15—16 января более разнороден. При сохраняющемся ведущем положении сульфатов в анионной части раствора значительно возросло содержание ионов F и Cl. Среди катионов при большом содержании кальция существенно выросла доля ионов Al. Формула Курлова для водных вытяжек этого пеплопада:

$$M_{0,82} \frac{(SO_4)_{42-84}F_{19-47}Cl_{17-25}}{Ca_{44-61}Al_{23-42}}$$

Водорастворимый комплекс пеплов, выпавших 17 января, в анионной части в основном представлен ионами Cl и SO₄ и в меньшей степени F. В катионной части преобладает Al, а содержание ионов Ca в 2 раза меньше. Обобщающая формула химического состава для вытяжек этого пеплопада имеет вид

$$M_{2,4} \frac{Cl_{40-43}(SO_4)_{39-40}F_{18-20}}{Al_{58-60}Ca_{29}}$$

Результаты анализа снеговых вытяжек свидетельствуют о высоком содержании SO₂, H₂S и HCl в составе эруптивных газов. Так, в пробе, отобранной на кромке кратера вулкана в конце извержения, химический состав снега на 90% представлен соляной и серной кислотами с рН раствора 2,68.

Очевидно, что изменения состава водорастворимого комплекса тefры разных пеплопадов следуют за увеличением ювенильности выносимых продуктов и глубины поступления эруптивных газов в процессе извержения. Судя по имеющимся данным, извержение началось 13 января как фреатическое — фреато-магматическое, а затем переросло в магматическое.

Расчеты, выполненные по данным табл. 1 и 3, показали, что пеплопадами за период извержения на земную поверхность вынесено ~ 3400 т (2% от массы извергнутой тefры) летучих и петрогенных компонентов, в том числе Na — 88, Ca — 511, Al — 213, Cl — 534, SO₄ — 1600, F — 170 и H₄SiO₄ — 210 т. В пробах отмечено также значительное содержание тяжелых металлов, составившее до 2—3% от состава сухих летучих компонентов. По данным авторов, полученные величины составляют всего 30% от годовой суммы химических примесей, осаждаемых из атмосферы в межэруптивные периоды, и поэтому в окружающих вулкан населенных пунктах они в основном сказались только на незначительном увеличении кислотности сезонного снежного покрова.

Вулкано-гляциальные процессы, типичные для вулкана Авачинский, и оценки их опасности. Опасные процессы на склонах действующих вулканов, покрытых снегом и льдом, — достаточно частое явление. Обычным следствием вулкано-гляциального взаимодействия являются мощные (иногда катастрофические по размерам) наводнения (йокульлаупы) и грязевые потоки (лахары). Наряду с выпадением тefры это один из главных элементов вулканической опасности. Особенностью водных потоков вулканического генезиса является вероятность их образования в течение всего года, в то время как возникающие по климатическим причинам могут сходить только в теплый сезон.

Во время исторических извержений Авачинского вулкана мощные лажары отмечались в 1827, 1878, 1926 и 1938 гг. [4, 5, 11]. Традиционные пути их стока — «сухие» реки: Халактырская, Камбальная, Елизовская и др. (рис. 9). Длина потоков в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского была до 25—30 км. В 1827 и 1926 гг. по Халактырской речке они достигали океана (в районе горы Толстый мыс), а по Елизовской сухой речке и р. Мутной впадали в р. Авача (выше г. Елизово). При других извержениях Авачинского вулкана длина грязевых потоков не превышала 20 км. Однако если раньше их сход происходил по безлюдным районам, то сегодня на конусах выноса этих потоков стоят поселки городского типа, выделенные под застройку участки садово-огороднических товариществ. В этой связи необходимо оценить возможные размеры и закономерности образования лажаров на вулкане.

Основные параметры грязевых потоков зависят от мощности извержения и запасов снега и льда в зоне, попадающей под тепловое воздействие. Восточная часть Авачинской группы вулканов — один из наиболее многоснежных районов Камчатки, что подтверждается существованием здесь развитого современного оледенения. В настоящее время только в массиве вулканов Авачинский и Козельский залегает 13 ледников суммарной площадью 15,1 км² [3]. Многолетние измерения снегозапасов на некоторых ледниках показали, что фоновые атмосферные осадки в этой части вулканической группы составляют 2500 мм и могут от года к году отличаться до 1,5—2,0 раз. Отсюда складываются запасы снега

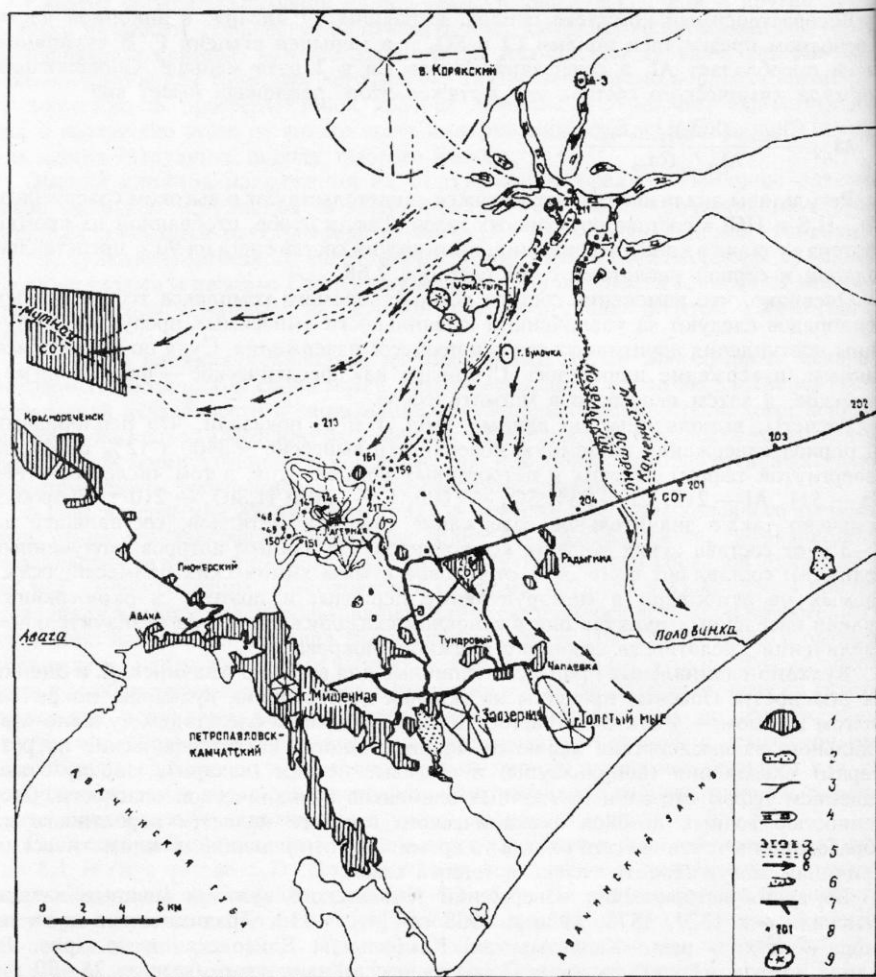


Рис. 9. Основные направления схода водных паводков и лахаров во время извержений вулкана Авачинский в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского: 1 — населенные пункты; 2 — озера; 3 — постоянные водотоки; 4 — современные ледники; 5 — отложения грязевых потоков 1938 и 1945 гг. (а), русла «сухих» рек (б), направления схода наиболее мощных лахаров (в); 6 — лавовый поток 1991 г.; 7 — основные дороги; 8 — точки отбора пеллов последнего извержения; 9 — вулканы и сопки

на склонах вулкана могут достигать 4 млн. т/км², а на поверхности ледников — 5–6 млн. т. На некоторых участках количество снега может существенно превышать полученные цифры. Так, во время последнего извержения вулкана 14–16 января отмечался массовый сход снежных лавин со склонов на площади ~ 1 км². Мощность снежной толщи на фронте конуса выноса лавин достигала 15 м (8 м в водном эквиваленте).

Исходя из приведенных оценок, при максимальной площади водосбора 9 км² объем водной составляющей лахаров может превышать 50 млн. м³, а с учетом твердой составляющей — до 70 млн. м³ (100 млн. т). Существенным параметром



Рис. 10. Отложения грязевых потоков в истоках сухой Халактырской речки. Фото В. А. Подтабачного

степени опасности водных и грязевых потоков является скорость их передвижения, которая определяет важную характеристику — время добега паводочной волны. По данным авторов, скорость продвижения грязевых потоков в зоне транзита в среднем составляет 7 м/с [2]. Таким образом, расстояние от зоны формирования до первых населенных пунктов (15–20 км) лахар может покрыть за 25–30 мин.

Во время последнего извержения, как известно, образовалось два небольших грязевых потока, максимальный из которых имел в длину более 5 км (рис. 10). К этому времени года снеготпасы на склоне вулкана в истоках Халактырской речки не превышали 1300 кг/м² (при средней толщине снежного покрова 3 м). Но на участке формирования грязевых потоков после схода снежных лавин водозапас в снежной толще составил 2200 кг/м². Снеговой сток с площади 0,5 км², охваченной таянием от теплового воздействия обвалов раскаленного материала, составил 1,1 млн. м³. Кроме того, на молодом конусе вулкана тальми водами были вскрыты погребенные льды. При общей длине промоин 1,5 км, ширине 30 м и средней глубине 6 м объем растаявшего льда равен 400 тыс. м³, или 350 тыс. т воды. Таким образом, суммарный объем грязевых потоков в период извержения 1991 г. не превышал 1,7 млн. м³ при объеме твердой составляющей 0,2 млн. м³.

Интересен химический состав пробы воды, отобранной А. А. Каргопольцевым на фронте отложений грязевых потоков 19 января. Общая минерализация пробы 2,68 г/л при рН раствора 4,26. В ней также чрезвычайно высоко содержание

микрокомпонентов: Mn — ~ 0,4, Zn — 0,79, Ni — 2,16 мг/л и т. д. При сравнении результатов анализов проб воды из грязевых потоков и водных вытяжек извержений вулканов Авачинский, Ключевской [3] и др. в первую очередь заметна существенно большая минерализация авачинского образца (в 5—20 раз), а также более кислая реакция раствора (рН 4,26 против 7,2 для ключевских образцов) и высокое содержание вредных для человека и окружающей среды элементов — фтора, хлора и др. Иными словами, продукты извержения вулкана Авачинский 1991 г. гораздо более «ядовиты», чем продукты деятельности вулкана Ключевской в 1983 г. Для Авачинского вулкана это положение подтверждается сведениями о массовой гибели рыб в р. Авача, в тех случаях когда ее достигали лахары [8].

В целом лахарами во время извержения за пределы лавового потока было вынесено не менее 4000 т химических примесей, повлиявших на экологическую обстановку небольших участков вдоль основного водотока Халактырской речки в период весенне-летнего снеготаяния 1991 г. В основном же умеренно слабое извержение вулкана Авачинский ощутимо сказалось в пределах молодого конуса, где произошли значительные изменения в строении поверхности. К сожалению, не удалось наладить слежение за изменением выноса элементов атмосферными водами из остывающего лавового потока после завершения извержения. По-видимому, его суммарный эффект должен быть сопоставим с выносом примесей во время активного процесса.

Еще одно следствие взаимодействия лавы и льда — фреатические взрывы — также отмечались несколько раз во время извержения. Но в связи с тем что происходили они высоко на склонах молодого конуса вулкана, непосредственной опасности не представляли.

Выводы. В январе 1991 г. произошло небольшое эффузивно-эксплозивное извержение вулкана Авачинский. Объем изверженного материала составил до 0,013 км³ при общей площади излившейся на дневную поверхность лавы 0,463 км². Количество пирокластики, отложенной пеплопадами на площади свыше 4500 км² по оценкам авторов, не превышало 170 тыс. т. Коэффициент explosивности извержения < 1%.

Обработка материалов ИК-съемок кратера вулкана выявила появление хорошо выраженной термоаномалии в южной части его днища (на месте будущего эруптивного жерла) более чем за 2 года до извержения, что подтверждает целесообразность регулярного слежения за потенциально опасными вулканами с помощью тепловой съемки.

Изучены особенности регистрации тепловых аномалий при слежении за динамикой продвижения лавового потока из измерительного пункта, расположенного в 26 км от места событий. Фиксируемая температура поверхности лавы и пепловых выбросов из кратера составляла всего 100—130° С, что требует физического обоснования этого явления.

Тепловая мощность извержения по расчетным оценкам была невелика — 2,565·10¹⁰ МДж. Максимальное выделение тепла отмечено 16 и 17 января в кульминацию эруптивной деятельности.

Несмотря на то что извержение было слабым, его сопровождали все основные виды вулканических и сопутствующих процессов, представляющих опасность для населения и хозяйственных объектов во время пароксизмальных извержений вулкана. Это дает основание рассматривать последнее извержение Авачинского вулкана в качестве природной модели для оценок и прогноза возможных экологических последствий более мощных вулканических событий.

Геохимический вклад извержения в загрязнение окружающей среды (без тефры) составил ~ 10 тыс. т, что по площади пеплопадов привело к увеличению общей минерализации сезонного снежного покрова в среднем не более чем на 30%. На локальных участках оно могло быть и выше. По оценкам, серьезная опасность от вулкана Авачинский для г. Петропавловска-Камчатского может быть связана с извержением, в 3—5 раз превосходящим последнее пропорционально по тепловой мощности и другим параметрам, хотя этот порог должен снижаться при росте коэффициента explosивности.

В сбор фактического материала по извержению 1991 г. большой вклад внесли А. А. Овсянников, А. А. Разина и А. В. Сокоренко. В обработке данных принимали участие И. К. Дубровская и (в режимных наблюдениях) многие сотрудники института. Авторы благодарны всем коллегам за совместный труд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексин О. А. Основы гидрохимии. Л.: ГОМИЗ, 1970. 444 с.
2. Виноградов В. Н., Муравьев Я. Д. Взаимодействие лавы и льда на Ключевском вулкане при извержении 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 29—46.
3. Виноградов В. Н., Муравьев Я. Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). СПб.: ГИМИЗ, 1992. 119 с.
4. Гущенко И. И. Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
5. Дитмар К. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851—1855 гг. СПб., 1901. 756 с.
6. Заварицкий А. Н. Вулкан Авача на Камчатке. М.: Наука, 1977. 308 с.
7. Крашенинников С. Описание земли Камчатки. СПб., 1778. 550 с.
8. Маргаритов В. Камчатка и ее обитатели // Зап. Приамурского отдела ИРГО. Хабаровск. 1899. Т. 5. Вып. 1. 141 с.
9. Мархинин Е. К. О количестве ювенильной воды, участвующей в вулканических взрывах // Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. Вып. 3. С. 537—539.
10. Меньяйлов И. А., Никитина Л. П., Шапарь В. Н., Литасова С. Н. Водные вытяжки из пеплов Новых Толбачинских вулканов // Бюл. вулканол. станций. 1979. № 56. С. 149—161.
11. Новограбленов П. Т. Извержение Авачинского вулкана в 1926 году // Изв. Гос. РГО. 1926. Т. 53. Вып. 2. С. 79—92.
12. Овсянников А. А., Муравьев Я. Д. Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5. С. 3—17.
13. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
14. Федотов С. А. Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3—28.
15. Федотов С. А., Балеста С. Т., Дрознин В. А. и др. О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана // Бюл. вулканол. станций. 1977. № 53. С. 27—37.
16. Федотов С. А., Двигалов В. Н., Дрознин В. А. и др. Последнее извержение вулкана Авачинский в январе 1991 г. и проблема вулканической опасности // Вулканизм, структуры и рудообразование: Тез. докл. VII Всесоюз. вулканол. совещ. Иркутск, 1992. С. 36—37.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
13.04.1993