

УДК 550.42:551.21 (571.66)

ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ПЕПЕЛ КАК ПРИРОДНЫЙ ФАКТОР РИСКА ДЛЯ АВИАЦИИ (ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЕПЛОВЫХ ЧАСТИЦ)

© 2000 г. В. Ю. Кирьянов*, С. Б. Фелицын**

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

**Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, 199164

Поступила в редакцию 19.03.98 г.

Установлена взаимосвязь между температурой плавления пепловых частиц, их гранулометрическим и элементным составами с целью оценки степени опасности от вулканических пеплов для авиации на примере 26 извержений вулканов Камчатки, Аляски и Алеутских островов. Экспериментально доказано, что морфологические изменения в частицах вулканического стекла начинаются уже при температурах 670–800°C, что гораздо ниже температуры плавления вулканического стекла, составляющей 1100–1400°C. Это дает основание полагать, что процессы спекания туфов могут происходить при значительно более низких температурах, чем предполагалось ранее. Наибольшая опасность для авиации будет исходить от извергавшихся в последнее десятилетие вулканов Камчатки и Северных Курил: Безымянного, Карымского, Ключевского, Горелого и Эбеко.

В настоящее время в мире ~700 вулканов считаются активными. В среднем ежегодно извергаются 55–60 вулканов. В 8–10 случаях эти извержения образуют пепловые тучи, достигающие высот полетов современных самолетов. В Северной Пацифике имеется > 50 вулканов, извергавшихся в нашем столетии и в среднем 3–4 дня в году пепловые облака извержений достигали высоты 10 км и более, поставляя в атмосферу огромное количество тонкодисперсного материала. Именно такие сильные эксплозивные извержения вулканов, их тефра и аэрозоли представляют наибольшую опасность для авиации. К сожалению, до настоящего времени многие аспекты воздействия эруптивных туч вулканических извержений на летательные аппараты слабо изучены и не получили должного освещения в литературе. В значительной мере это относится и к тефре разного химического состава, различной крупности и концентрации – одному из главных компонентов эруптивных туч.

Ответить на ряд связанных с этой проблемой вопросов удалось в результате проведенных исследований свойств пепловых частиц рентгенофлуоресцентным, нейтронно-активационным анализами и экспериментальным плавлением пепловых частиц. Удалось установить взаимосвязь между температурой плавления пепловых частиц, их элементным составом и размером, а также оценить степени риска вулканического пепла для авиации.

Рассмотрена зависимость между содержанием некоторых элементов, гранулометрическим составом и термическими характеристиками пеплов, полученными экспериментально, для чего проведено плавление образцов вулканического пепла в микрокамере на сапфировой пластинке в режиме

нагрева 5 град/мин. Термометрия осуществлялась с помощью микроскопа Orthoplan (“Leitz”) и совмещенной с ним микрокамерой той же фирмы. Кроме того, проведены нейтронно-активационный и рентгеноспектральный анализы.

Изучено 26 образцов вулканического пепла: 20 образцов пеплов вулканов Камчатки и Северных Курил, а также 6 образцов пеплов вулканов Аляски и Алеутских островов (табл. 1). Положение вулканов показано на рис. 1 и 2. Для четырех

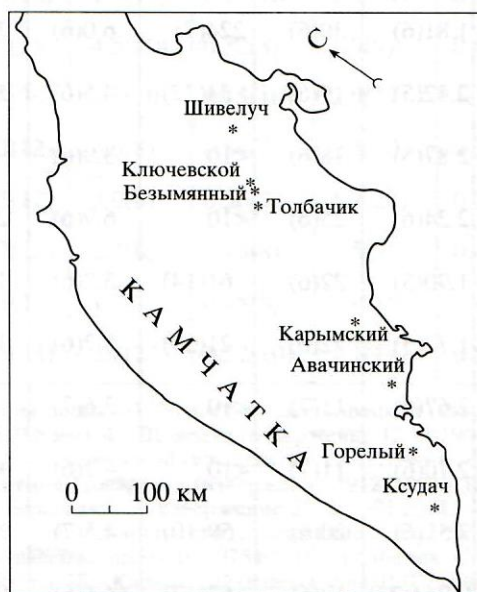


Рис. 1. Положение вулканов Камчатки, пеплы которых были отобраны для изучения.

Таблица 1. Результаты нейтронно-активационного анализа (содержание элементов г/т)

Номер образца	Na*	Sc	Cr	Fe*	Co	As	Br	Cs	Sb	La	Ce
1	2.72(7)	28(6)	21(16)	6.6(6)	24(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	14(10)	24(16)
2	2.46(5)	16(5)	20(24)	4.2(6)	15(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	11(9)	23(12)
3	3.07(6)	20(6)	149(9)	3.7(6)	20(6)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	5.7(16)	13(22)
4	3.34(5)	20(6)	166(10)	4.0(5)	21(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	6.8(15)	16(17)
5	2.63(5)	26(6)	19(18)	6.0(5)	23(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	7.3(17)	17(21)
6	2.55(6)	27(6)	24(17)	6.7(5)	28(6)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	6.8(18)	19(27)
7	2.69(5)	28(6)	49(16)	6.4(5)	28(6)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	7.7(17)	16(22)
8	3.30(5)	8.1(6)	<10	1.1(7)	1.7(6)	18(6)	12(22)	1.3(24)	0.63(20)	21(6)	44(7)
9	2.18(5)	17(5)	99(12)	4.1(6)	17(6)	7.1(25)	<5.0	0.39(34)	<0.2	7.0(22)	16(21)
10	2.70(6)	14(6)	12(6)	3.4(6)	11(5)	<3.0	<5.0	0.50(27)	0.25(29)	10.4(5)	24(8)
11	1.53(6)	20(5)	84(14)	5.0(5)	17(6)	32(15)	<5.0	0.91(22)	<0.2	10(8)	19(20)
12	1.95(5)	42(5)	47(18)	6.0(6)	23(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	2.8(27)	7.5(25)
13	2.76(5)	19(6)	8.1(33)	4.4(6)	10(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	13(7)	23(8)
14	2.72(6)	17(6)	16(25)	4.2(6)	15(5)	<3.0	<5.0	0.46(28)	<0.2	13(10)	25(10)
15	2.64(5)	25(6)	135(7)	7.7(6)	29(5)	<3.0	<5.0	0.75(33)	<0.2	18(6)	44(10)
16	1.81(6)	30(6)	224(7)	6.0(6)	30(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	7.4(20)	17(18)
17	2.42(5)	19(6)	34(22)	4.5(6)	15(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	6.6(15)	13(20)
18	2.87(5)	18(6)	<10	3.9(6)	9.5(5)	<3.0	15(27)	<0.5	<0.2	9.1(19)	23(17)
19	2.24(6)	25(6)	<10	6.9(6)	26(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	11(7)	24(20)
20	1.90(5)	22(6)	61(14)	5.2(6)	15(8)	35(16)	8.5(24)	0.61(22)	<0.2	15(16)	31(8)
21	1.77(5)	22(6)	21(20)	5.2(6)	17(5)	63(10)	34(15)	0.96(22)	<0.2	8.4(16)	22(23)
22	2.67(6)	11(7)	<10	3.6(7)	8.6(6)	10(21)	7.9(26)	<0.5	<0.2	11(13)	28(15)
23	2.70(6)	11(7)	<10	4.7(6)	13(7)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	11(14)	25(17)
24	2.51(6)	20(6)	59(10)	4.5(7)	17(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	8.3(15)	20(16)
25	0.044(23)	19(6)	67(12)	44.5(6)	96(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	6.3(15)	12(27)
26	1.76(5)	17(6)	28(18)	5.1(6)	17(5)	<3.0	<5.0	<0.5	<0.2	12(19)	25(17)

Таблица 1. (Окончание)

Номер образца	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
1	15(8)	4.2(6)	1.25(7)	0.73(22)	2.5(12)	0.37(24)	3.1(14)	0.13(14)	0.91(25)	0.65(26)
2	11(15)	3.1(5)	0.89(5)	0.55(24)	2.1(15)	0.32(27)	2.8(16)	0.18(16)	1.1(18)	0.88(20)
3	9.0(26)	2.8(5)	1.00(7)	0.32(28)	1.2(10)	0.18(24)	1.5(8)	0.070(17)	<0.5	<0.5
4	10(16)	3.0(5)	0.95(5)	0.45(22)	1.5(10)	0.21(26)	1.8(12)	0.11(18)	0.70(27)	<0.5
5	9.9(18)	3.3(6)	1.11(8)	0.64(22)	2.2(16)	0.33(12)	2.4(15)	0.11(14)	0.64(27)	<0.5
6	13(20)	3.9(6)	1.19(10)	0.65(24)	2.3(14)	0.32(22)	2.7(12)	0.14(17)	1.1(20)	0.80(24)
7	10(18)	3.4(5)	1.15(8)	0.62(18)	2.2(8)	0.33(20)	2.2(18)	0.16(14)	<0.5	<0.5
8	22(9)	5.8(5)	0.73(6)	1.3(8)	4.6(8)	0.69(11)	5.4(8)	0.42(10)	5.9(13)	2.1(10)
9	8.3(22)	2.5(6)	0.79(7)	0.45(20)	1.5(12)	0.21(14)	2.5(8)	0.15(18)	1.1(20)	0.58(18)
10	15(10)	3.35(5)	0.92(6)	0.51(13)	2.1(12)	0.32(16)	3.4(8)	0.21(9)	1.7(10)	0.95(14)
11	10(22)	2.3(7)	0.72(9)	0.39(22)	1.6(12)	0.23(20)	2.9(14)	0.20(10)	3.3(18)	0.96(17)
12	5.3(30)	2.2(6)	0.93(6)	0.53(26)	1.8(22)	0.30(15)	1.4(26)	0.045(27)	0.66(26)	<0.5
13	14(8)	3.8(5)	1.16(5)	0.65(20)	2.3(18)	0.38(17)	3.0(10)	0.19(12)	2.0(14)	0.63(22)
14	15(10)	3.6(5)	1.04(5)	0.66(21)	2.3(8)	0.35(12)	3.1(10)	0.19(8)	1.4(10)	0.86(22)
15	21(12)	6.6(5)	1.78(5)	0.99(13)	3.6(10)	0.52(20)	4.8(10)	0.36(12)	2.2(18)	0.97(17)
16	11(16)	3.4(6)	1.01(5)	0.52(9)	1.7(15)	0.23(24)	2.1(18)	0.10(8)	0.52(25)	<0.5
17	9.1(18)	2.7(5)	0.80(5)	0.53(22)	1.8(18)	0.28(23)	1.9(21)	0.10(18)	0.63(28)	<0.5
18	16(18)	3.8(7)	1.17(10)	0.66(23)	2.4(12)	0.34(24)	3.1(14)	0.21(20)	1.8(13)	0.71(23)
19	16(12)	3.9(5)	1.14(8)	0.55(14)	1.8(12)	0.28(18)	1.9(10)	0.25(10)	2.3(14)	0.70(24)
20	15(10)	4.1(6)	1.20(6)	0.74(12)	2.6(14)	0.40(25)	4.5(10)	0.32(8)	1.9(9)	0.81(18)
21	15(18)	2.4(5)	0.78(5)	0.49(24)	1.8(17)	0.25(26)	2.1(10)	0.15(10)	2.9(17)	1.1(14)
22	13(12)	3.3(6)	1.36(5)	0.58(16)	2.2(10)	0.33(12)	3.6(8)	0.34(7)	1.5(10)	0.37(37)
23	13(12)	3.1(6)	0.91(8)	0.51(17)	1.7(12)	0.25(17)	3.0(8)	0.36(7)	1.2(28)	0.73(18)
24	12(14)	2.8(6)	0.88(5)	0.47(25)	1.9(14)	0.27(15)	2.4(8)	0.16(8)	1.5(9)	0.49(28)
25	7.8(22)	2.0(5)	0.23(25)	0.17(32)	0.60(18)	<0.1	1.7(14)	0.48(8)	<0.5	<0.5
26	16(18)	3.0(7)	1.01(6)	0.43(24)	1.5(12)	0.25(24)	2.8(24)	0.22(10)	1.1(14)	0.55(28)

Примечание. Вулканы: 1 – Ключевской (извержение 3.11.1994 г., фракция пепла <0.056 мм); 2 – Безымянный (извержение 2.10.1993 г.); 3 – Шивелуч (извержение 12.11.1964 г., фракция пепла 0.25–0.5 мм); 4 – Шивелуч (извержение 12.11.1964 г.); 5 – Ключевской (извержение 30.09.1994 г., фракция пепла 0.071–0.125 мм); 6 – Ключевской (извержение 23.11.1994 г., фракция пепла 0.125–0.25 мм); 7 – Ключевской (извержение 15.12.1989 г.); 8 – Катмаи-Новарупта (извержение 1912 г.); 9 – Шивелуч (извержение 22.04.1993 г.); 9 – Шивелуч (извержение 22.04.1993 г.); 10 – Безымянный (извержение 21.12.1981 г.); 11 – Эбеко, о-в Парамушир (извержение 27.10.1987 г.); 12 – Ксудач (извержение 1907 г.); 13 – Карымский (извержение 23.01.1996 г.); 14 – Безымянный (извержение 06.10.1995 г.); 15 – Толбачик, Южный прорыв (извержение 07.10.1975 г.); 16 – Толбачик, Северный прорыв (извержение 02.08.1975 г.); 17 – Авачинский (извержение 17.01.1991 г.); 18 – Карымский (извержение 01.03.1996 г.); 19 – Алайд, о-в Атласова (извержение 28.05.1981 г.); 20 – Горелый (извержение 25.04.1986 г.); 21 – Эбеко (извержение 03.02.1988 г.); 22 – Фишер; 23 – Ридаут; 24 – Августин; 25 – Павлов; 26 – Спурр. В скобках – статическая погрешность, отн. %.

* Содержание Na и Fe, %.

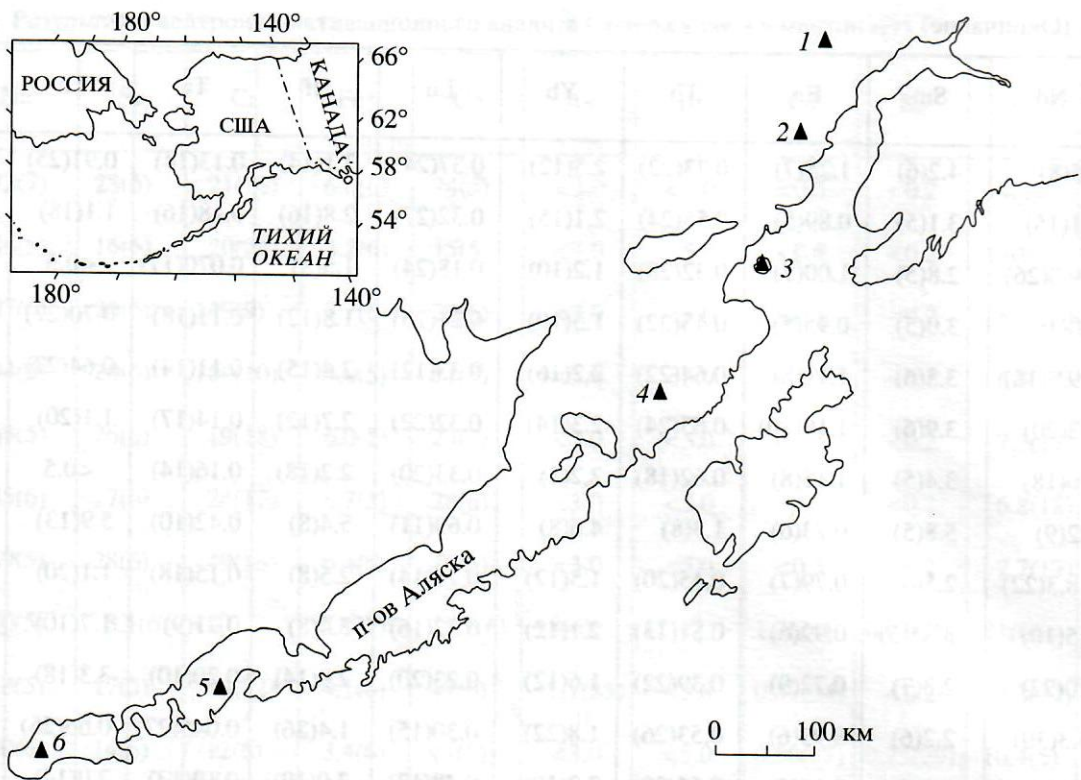


Рис. 2. Положение вулканов Аляски и Алеутских островов, пеплы которых отобраны для изучения: 1 – Спурр, 2 – Ридаут, 3 – Августин, 4 – Катмай (Новарупта), 5 – Павлов, 6 – Фишер.

извержений анализировались образцы пеплов с определенной размерностью частиц с целью установления взаимосвязи между элементным составом отдельной фракции и пеплом того же извержения в целом. Отобранные для изучения пеплы характеризуют фактически все крупнейшие извержения нашего столетия на Камчатке, Аляске и Алеутских островах.

Для изучения элементного состава образцов вулканических пеплов использовали инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА). Методика подготовки образцов подробно описана в работе [6]. Одновременно с образцами пеплов облучали стандартные образцы горных пород: андезит AGV-1, базальт BE-N, гранит MA-N. Средняя плотность потока нейтронов в месте облучения составляла $7.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Длительность каждого облучения тепловыми нейтронами 20 ч. Наведенную активность измеряли в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН на 4096-канальном гамма-спектрометре с двумя полупроводниковыми детекторами. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Распределение элементов по данным ИНАА изученных пеплов указывает на значительную роль процессов обогащения пепловых частиц летучими соединениями элементов халькофильной группы (в частности, сурьмой) при взаимодей-

ствии твердых и газообразных продуктов извержения в эруптивной туче.

В работе [6] показано, что распределение элементов по фракциям соответствует представлению о сорбировании пористыми фрагментами пемзы вулканических газов и коагуляции аэрозольных частиц на поверхности пеплов по мере охлаждения пепловой тучи. Данные по составу вулканических газов и аэрозолей из районов вулканической активности свидетельствует об обогащении их As и Sb. Эти элементы характеризуются высокими значениями коэффициентов обогащения в вулканических газах и аэрозолях по сравнению с содержанием этих элементов в лавах, что определяется их высокой подвижностью в системе расплав-газ. В эруптивной туче пепловые частицы взаимодействуют с вулканическими газами и аэрозолями, поэтому следует ожидать обогащения мелких по размеру фракций пепла этими элементами в результате конденсации и сорбирования на их поверхности газов и аэрозолей. Распределение компонентов эруптивных газов по гранулометрическим фракциям пеплов Большого трещинного Толбачинского извержения подтверждают предположение об обогащении вулканических пеплов летучими халькофильными элементами в процессе конденсации их хлоридов на поверхности пепловых частиц в эруптивной туче [4].

Таблица 2. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа (ppm)

№	Вулкан	Дата извержения (отбора пепла)	Фракция, мм	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
1	Ключевской	23.11.1994	<0.056	20	373	22	118	10
2	»	23.11.1994	0.071–0.125	20	366	17	103	10
3	»	30.09.1994	0.071–0.125	20	409	24	101	10
4	Безымянный	22.10.1993	–	20	331	19	132	10
5	»	06.10.1995	–	20	310	14	126	10
6	»	21.12.1981	–	27	313	21	160	10
7	»	16.10.1995	–	20	310	14	126	10
8	Шивелуч	12.11.1964	0.25–0.5	20	874	15	48	10
9	»	12.11.1964	–	20	788	15	63	10
10	»	22.04.1994	–	20	486	15	102	10
11	Карымский	23.01.1996	–	20	413	22	136	10
12	»	01.03.1996	–	18	391	15	152	10
13	Толбачик							
	Южный прорыв	07.10.1975	–	49	376	25	224	10
14	Северный прорыв	02.08.1975	–	20	431	15	108	10
15	Ксудач	1907	–	20	320	16	48	10
16	Эбеко	27.10.1987	–	37	402	15	112	10
17	»	03.02.1988	–	41	471	17	96	10
18	Авачинский	17.01.1991	–	20	431	15	108	10
19	Алаид	28.05.1981	–	28	757	15	73	10
20	Горелый	25.04.1986	–	29	457	18	217	10
21	Фишер (США)	86 г.н.э.	–	20	446	15	188	10
22	Августин (США)	30.03.1986	–	20	355	15	95	10
23	Спурр (США)	1992	–	20	706	15	104	10
24	Ридаут (США)	1990	–	20	544	15	119	10
25	Павлов (США)	1986	–	20	20	15	107	10

Результаты определения малых элементов в образцах вулканических пеплов, по данным рентгенофлуоресцентного анализа, представлены в табл. 2. Следует отметить, что различия в содержании ряда элементов для пеплов вулканов Ключевской и Шивелуч в целом и для отдельных фракций этих же пеплов связаны с неравномерным соотношением рудных и темноцветных минералов по фракциям.

В процессе экспериментального плавления пепловых частиц установлено, что температура плавления всех изученных пеплов лежит в интервале 1200–1410°C (табл. 3). Температура 50%-ного плавления пеплов (т.е. температура, при которой данный пепел расплавляется на 50%), как правило, ниже на 10–100°C. Наибольшая разница температур наблюдается в пеплах вулканов Эбеко, Алаид, Безымянный. Температура слипания пепловых частиц в некоторых образцах ниже температуры плавления более чем на 100°C.

Наиболее интересным показателем оказалась температура изменения морфологии пепловых

частиц, т.е. температура, при которой начинаются необратимые процессы в самих частицах: схлопывание газовых пузырьков, закрытие пор и микротрещин и, как следствие, уменьшение объема (до 30%) частиц.

Пепловые частицы уже при температурах 700–800°C начинают приобретать свойства сплошной массы, т.е. спекаться. Этот факт примечателен также тем, что он может объяснить образование спекшихся туфов, а возможно, и процессы образования игнимбринов. В работе [7] в игнимбритах вулкана Горелый на отдельных участках отмечены мелкие шарики диаметром 0.1–0.2 мм из сваренных пепловых частиц. Обломки пемз на этих участках были лишены пор. Указанные условия умеренного спекания являются переходными в процессе образования из вулканического стекла – фьямме в игнимбритах. Проведенное экспериментальное плавление пепловых частиц фактически повторило этот природный процесс, подтвердив правильность рассуждений автора и показало, что

Таблица 3. Температурные параметры пепловых частиц

Вулкан	Дата извержения	T, °C					
		плавления	50%-ного плавления	кристаллизации	слипания	изменения	
Ключевской	15.12.1989	1200	1150	1100	1180	–	
	23.11.1994 (<0.056)*	1295	1230	1120	1195	780	
Шивелуч	12.11.1964	1360	1330	1200	1250	–	
	22.04.1993	1430	1360	1290	1310	–	
Безымянный	21.12.1981	1240	1140	1060	1060	670	
	22.10.1993	1295	1230	1120	1195	780	
Толбачик	Северный прорыв	02.08.1975	1295	1285	1160	1280	–
	Южный прорыв	07.10.1975	1240	1200	1120	1230	–
Карымский	01.03.1996	1280	1260	1170	1180	800	
Авачинский	17.01.1991	1310	1230	1150	1120	700	
Горелый	25.04.1986	1400	1155	1040	1215	730	
Ксудач	1907	1410	1350	1200	1230	–	
Эбеко (о-в Парамушир)	27.10.1987	1240	1140	1060	1060	670	
	03.02.1988	1300	1200	1000	1250	800	
Алаид (о-в Атласова)	28.05.1981	1270	1210	1040	1190	760	

* Размер фракции, мм.

процессы схлопывания газовых пузырьков и закрытия пор и микротрещин в процессе плавления частиц происходят очень быстро, фактически мгновенно.

Авторами работ [3, 5] на вулкане Ксудач выделены игнимбриты-агглютинаты голоценового возраста, образовавшиеся в результате спекания андезитовых бомб. Причинами спекания авторы называют большую (8–10 м) мощность пачки этих бомб; близость их отложения к эруптивному центру, что позволило им долго сохранять высокую температуру; возможный вторичный разогрев слоя бомб за счет экзотермических реакций; плавление наиболее легкоплавких компонентов бомб с образованием фьямме [3]. Последние два фактора можно дополнить тем, что результаты экспериментального плавления пепловых частиц указывают на то, что частичное плавление компонентов бомб с последующим спеканием идет при гораздо меньших температурах, чем температура полного плавления пепловых частиц. И если, по данным В.С. Шеймовича [7], игнимбриты вулкана Горелый образовались при температурах >1500°C, то начало их спекания, как и формирование игнимбритов-агглютинатов на вулкане Ксудач, возможно при температурах 700–800°C.

Анализ корреляционных связей между малыми элементами и температурой плавления вулканических пеплов проводился с использованием R-модели факторного анализа на основе метода главных

компонент. Установлено, что наиболее сильная взаимосвязь отмечается между температурой 50%-ного плавления и содержанием Zr (оценка парного коэффициента корреляции –0.67). Установлена взаимосвязь между температурой слипания частиц и содержанием в пепле Cr (+0.59), а также температурой кристаллизации и содержанием As, Vg и Sb (корреляция от –0.57 до –0.78). Приведенные данные указывают на то, что присутствие в пепле модалного или нормативного циркона понижает температуру 50%-ного плавления, а увеличение содержания хрома повышает температуру слипания пепловых частиц размером 60–2000 мкм. Повышение содержания летучих компонентов (оценка по мышьяку, сурьме и бром) понижает температуру кристаллизации.

Опасность вулканического пепла как природного фактора риска для авиации прежде всего заключается в попадании пепловых частиц на разогретые лопатки турбин самолетов с последующим частичным плавлением пепла, вызывающим остановку турбин.

Во время извержения вулкана Ридаут (Аляска, США) 15 декабря 1989 г. “Боинг-747”, летевший из Амстердама с 289 пассажирами на борту, попал в пепловое облако этого извержения, в результате чего у него прекратили работу все четыре двигателя. К счастью, экипаж сумел через 8 мин вновь запустить двигатели и самолет благополучно приземлился в г. Анкоридж (США). Убытки, связанные

прежде всего с заменой всех двигателей самолета, составили десятки миллионов долларов США.

В работе [11] приведены результаты моделирования температуры плавления пеплов на основе содержания в них петрогенных элементов и детально рассмотрены процессы плавления вулканического стекла на примере пеплов вулканов Аляски и Алеутских островов: Уайт Ривер, Хэйес, Новарупта (извержение 1912 г.), Августин (возраст пепла 2700 лет) и Ридаут (извержение 1989–1990 гг.). Авторами работы [8], установлено, что температура плавления вулканического стекла 1000–1300°C, минералов – 1100°C. Поскольку температура отдельных рабочих частей двигателей американских пассажирских самолетов может достигать 1400°C, то вулканический пепел, представляющий собой смесь минералов и вулканического стекла, попадая на рабочую поверхность турбин частично плавится (стекло – полностью, минералы – частично), вызывая полную остановку двигателей. Установлено, что вулканический пепел не плавится при работе двигателя на холостых оборотах, т.е. при температурах до 600°C. Таким образом, изменение температуры нагрева двигателей, по мнению авторов, может в какой-то степени решить эту проблему, хотя вопрос, связанный с частичным плавлением вулканического стекла при температурах 700–860°C, остается открытым.

Из табл. 3 видно, что температура изменения морфологии пепловых частиц ниже температуры плавления в среднем на 500°C и порядок температур (670–800°C) очень близок к температуре рабочей поверхности лопаток турбин в двигателях самолетов, которая составляет: 650–700°C для самолетов “ТУ-154” и “ИЛ-86”; 1094°C для самолетов “Боинг” и “Макдонелл Дуглас”. Таким образом, несмотря на то что температура полного слипания пепловых частиц выше температур нагретой рабочей части турбин самолетов, процесс частичного слипания пеплов и прилипания их к рабочим поверхностям турбин начинается значительно раньше (с 670°C), поэтому фактически пеплы всех изученных вулканов, вне зависимости от их элементного состава и типа извержения, представляют существенную опасность для рабочей части турбин самолетов.

Установлено, что у самолета “Боинг-747” остановка двигателей произошла через одну минуту после попадания самолета в пепловую тучу вулкана Ридаут (Аляска, США), имевшую плотность 2 г/м³. Размер самых крупных частиц в этом облаке был 10–400 мкм, преобладали пепловые частицы размером 10–100 мкм. Пепел содержал некоторое количество вулканического стекла, имевшего температуру плавления 1200°C. В пепле также присутствовали компоненты как с более низкой, так и с более высокой температурой плавления. Несмотря на то что двигатели военных самолетов США приспособлены к содержанию пыли в

воздухе до 0.05 г/м³ (что составляет 1/40 степени насыщения пеплом выше упомянутого пеплового облака вулкана Ридаут), гражданские воздушные суда лишены такой защиты [9]. При наземных испытаниях двигателей военных самолетов проблемы начинались уже при содержании пыли 0.5 г/м³ (или 1/4 плотности облака, в которое попал пассажирский “Боинг-747”).

Рабочая температура отдельных деталей турбин “Боинга-747”, попавшего в пепловую тучу, была 930°C. По данным авторов, средняя температура слипания частиц размером 60–2000 мкм составляет 1200 ± 60°C ($n = 16$, т.е. для пеплов различного состава эта величина достаточно постоянна). В то же время для частиц размером 10–30 мкм средняя температура слипания 750 ± 70°C ($n = 10$). Таким образом, размер частиц представляется наиболее важным фактором, определяющим характеристики тefры в смысле ее опасности для турбин самолетов, по сравнению с составом. В работе [2] приведены данные гранулометрического состава пеплов трех крупнейших извержений вулкана Камчатка за последние 40 лет (Шивелуча, 1964 г.; Безымянного, 1956 г.; Алаида, 1981 г.), которые показывают, что на расстоянии, превышающем 100 км от центра извержения, в выпавших на поверхность пеплах преобладают мелкие (<50 мкм) частицы пепла, весовая доля которых превышает 40%. В пепле, выброшенном вулканом Сент-Хеленс 18 мая 1980 г., частицы размером 3 мкм составляли <10% всей массы пепла; >60% пепла имело размер частиц <63 мкм [10]. Для некоторых извержений, например таких, как извержение вулкана Безымянный летом 1981 г., доля мелкой (50 мкм и мельче) фракции пепла может превышать 70% уже на расстоянии 20 км от вулкана [2]. Чем дальше переносится пепловое облако от центра извержения, тем больше оно содержит тонких частиц пепла и это несет двойную опасность для самолетов. Во-первых, по мере удаления от вулкана возрастает вероятность ошибки пилотов, принимающих пепловое облако за обычное дождевое; во-вторых, увеличение содержания тонких пепловых частиц приводит к уменьшению температуры их слипания при частичном плавлении и тем самым увеличивает степень потенциальной опасности для двигателей самолетов.

Выводы. Главным результатом данной работы может считаться то, что реальный вулканический пепел как дисперсная совокупность частиц со своей фракцией распределения по размеру и содержанием летучих элементов, адсорбированных на поверхности частиц, имеет вовсе не такие термические характеристики, какие можно ожидать по моделированию на основе содержания в них петрогенных элементов. Морфологические изменения в частицах вулканического стекла начинаются уже при температурах 670–800°C, что

гораздо ниже температуры плавления вулканического стекла, составляющей 1100–1200°C. Эти данные помогают объяснить происхождение спекшихся туфов и процессы игнимбритообразования, которые, возможно, начинаются при гораздо низких температурах, чем предполагалось ранее.

Наличие большого количества тонкодисперсного пепла, представленного преимущественно вулканическим стеклом, является определяющим фактором опасности вулканического извержения для авиации. Из рассмотренных вулканов с точки зрения максимальной степени воздействия на двигатели самолетов в результате частичного плавления пепловых частиц наибольшую опасность для авиации представляют извергавшиеся в последнее десятилетие вулканы Камчатки и Северных Курил: Безымянный, Карымский, Эбеко, Горелый, Ключевской. Эти выводы не противоречат, а скорее дополняют данные по степени опасности для авиации вулканов Камчатки, приведенные в работе [1], где речь шла об опасности с точки зрения продолжительности извержения, высоты подъема и направления переноса эруптивной тучи.

Авторы работы [8] справедливо отмечают, что уменьшить степень вулканической опасности от пепла для самолета, попавшего в пепловое облако, можно путем уменьшения температуры работы двигателя на то время, пока самолет находится в пепловой туче, путем перехода в другой режим работы двигателей. При достаточно быстром охлаждении рабочей поверхности турбин возможно отделение “рубашки” вулканического стекла от их нагретых частей, как было в случае с “Боингом-747” 15 декабря 1989 г., что позволило спустя некоторое время вновь запустить остановившиеся двигатели самолета.

Авторы выражают благодарность Т.П. Миллеру за предоставленные для изучения образцы пеплов вулканов США и В.А. Будникову за образцы пеплов №№ 13, 14, 17–20 (табл. 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 16–36.
2. Кирьянов В.Ю., Рожков Г.Ф. Гранулометрический состав тефры крупнейших эксплозивных извержений вулканов Камчатки в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 16–29.
3. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 28–53.
4. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности эксгалиций Большого трещинного Толбачинского извержения. М.: Наука, 1980. 234 с.
5. Селянгин О.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16–27.
6. Фелицын С.Б., Ваганов П.А., Кирьянов В.Ю. Распределение редких и рассеянных элементов в пеплах вулканов Камчатки по данным инструментального нейтронно-активационного анализа // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 23–35.
7. Шеймович В.С. Игнимбриты Камчатки. М.: Наука, 1979. 179 с.
8. Dunn M.G., Wade D.P. Influence of volcanic ash clouds on gas turbine engines // Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium of Volcanic Ash and Aviation Safety / US Geological Survey Bulletin 2047. 1992. P. 107–118.
9. Foreman P.M. Warning systems and pilots actions // Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety // US Geological Survey Bulletin 2047. 1992. P. 163–168.
10. Hobbs P.V., Radke L.F., Eltdroth M.W., Hegg D.A. Air-born studies of the emissions from the volcanic eruption of Mount St. Helens // Science. 1981. V. 211. № 4484. P. 816–818.
11. Swanson S.E., Beget J.E. Melting Properties of Volcanic Ash // Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium of Volcanic Ash and Aviation Safety // US Geological Survey Bulletin 2047. 1992. P. 87–92.

Volcanic Ash as Natural Risk Factor for Airplanes (Based on Ash Particles Properties)

V. Yu. Kirianov*, S. B. Felitsyn**

*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

**Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199164, Russia

Relationships were established between the melting temperature of ash particles, their sizes and element compositions for evaluating ash hazards for airplanes based on the products of 26 volcanic eruptions in Kamchatka, Alaska, and the Aleutian Islands. Experiments proved that changes in the shape of volcanic glass particles began at $T = 670\text{--}800^\circ\text{C}$, the values considerably lower than glass melting temperature ($1100\text{--}1400^\circ\text{C}$). This suggests that tuff start to melt at temperatures much lower than believed before. The greatest danger is expected to be caused by the volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands, where eruptions occurred during the last decade at Bezmyannyi, Karymsky, Klyuchevskoi, Gorelyi, and Ebeco volcanoes.