

С. И. НАБОКО

**ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА
в 1937—1938 гг.**

ВСТУПЛЕНИЕ

С началом извержения Ключевского вулкана перед нами возникла задача сбора и изучения продуктов его деятельности. Большая относительная высота вулкана, равная 4860 м, осложняла подъем к кратеру и тем самым ограничивала возможность сборов продуктов извержения. За все время нашего пребывания на Камчатке (1936—1938 гг.) с этой целью было совершено три восхождения: два из них — на кратер вулкана, и одно — по западному склону до высоты 3600 м. Первое восхождение проводилось двумя группами в августе 1936 г. Группой В. И. Влодавца была собрана проба вулканического песка, выброшенного из кратера в день подъема (Влодавец, 1937). Группой А. А. Меняйлова, в которую входил и автор данной работы, были собраны вулканический песок и газ. Второй подъем к кратеру был совершен А. А. Меняйловым с туристами в июле 1937 г., в самый разгар извержения. Во время этого подъема ими были собраны: лава майского извержения и бомбы, лапилли, вулканический песок, газы и сублиматы извержения 19—20 июля, свидетелями которого они были. Наконец, третье восхождение было совершено А. А. Меняйловым после окончания извержения, когда подъем совершался по лавовым потокам на западном склоне до высоты 3600 м. При этом подъеме были собраны: лава, бомбы, газы и сублиматы.

Сбор образцов рыхлых продуктов извержения производить было легче. При сильных эксплозиях вулканические пески разносились на большие пространства, и пробы их часто собирались в районе Вулканологической станции. Описанию рыхлых продуктов посвящена большая часть данной работы.

Материал обрабатывался в Москве. За целый ряд ценнейших указаний в процессе работы приношу благодарность научному руководителю Вулканологической станции академику А. Н. Заварицкому и В. И. Влодавцу.

Хотя в литературе упоминается целый ряд извержений Ключевского вулкана, продукты этих извержений изучены мало.

Первые исследователи Камчатки — С. Крашенинников (1786) и столетием позднее К. Дитмар (1901) в этом отношении ничего не дали.

Богданович (Bogdanovitsch, 1904) в своем «Геологическом очерке» впервые характеризует вулканический пепел Ключевского вулкана, который выпал в с. Облуковино после сильного извержения Ключевского

вулкана 20 февраля и 3 марта 1898 г. Состав этого пепла, по Богдановичу, следующий: главная масса — это обломки бесцветных авгитовых кристаллов; темнокрасные обломки кристалликов, вероятно гиперстена; осколки кристаллов и лейсты плагиоклаза; хорошо образованные кристаллы красноватого ромбического минерала, вероятно гиперстена, который окружает бесцветные призмы авгита; удлиненные кристаллы зеленого биотита с заметным плеохроизмом. Такой состав пепла, по мнению Богдановича, позволяет предполагать, что современные лавы Ключевского вулкана принадлежат главным образом к гиперстено-авгитовым андезитам.

Эрман, во время своего кругосветного путешествия через Северную Азию и два океана в 1828, 1829 и 1830 гг., побывал на Камчатке и безуспешно пытался подняться на Ключевский вулкан. Из продуктов извержения он упоминает лаву, бомбы, шлак, вулканический песок и самородную серу.

Дягилев и Трошин собрали рыхлые продукты извержения Ключевского вулкана. А. Н. Заварицкий (1935а) описал их. Ниже помещается краткое изложение данной ими характеристики этих продуктов.

Извержение 30 сентября 1925 г. Пепел собран в Ключах. Механический анализ его следующий: фракций крупнее 0.25 мм — 0.7%, от 0.25 до 0.1 мм — 17.6%, от 0.1 до 0.01 мм — 60.7% и мельче 0.01 мм — 21%. Присутствуют: стекло прозрачное, зеленовато-бурого цвета и непрозрачное, плагиоклаз, авгит, оливин, гиперстен и одно зерно санидина. Бомба размером 8 × 10 см. Порода микроскопически определена как гиперстеновый андезит. В полустекловатой основной массе, представляющей слегка буроватое стекло с короткопризматическими микролитами плагиоклаза и призмочками гиперстена, плавают фенокристаллы зонального плагиоклаза, гиперстена и, редко, авгита. По мнению А. Н. Заварицкого, эта порода является не бомбой, оторванной от жидкой лавы, а отторженцем уже ранее застывшей породы, выброшенной из жерла вулкана с некоторой глубины.

Извержение в марте и начале апреля 1926 г. Образец взят в Ключах. Механический анализ его следующий: фракций крупнее 0.25 мм — 0.2%, от 0.25 до 0.1 мм — 12.3%, от 0.1 до 0.01 мм — 77% и мельче 0.01 мм — 20.5%. Присутствуют: стекло непрозрачное и просвечивающее, бурое и зелено-бурое, плагиоклаз-лабрадор, оливин и гиперстен. Все образцы пепла извержений 1925—1926 гг. А. Н. Заварицкий считает распыленной массой породы, по составу близко напоминающей плагиоклазовые базальты, так как стекло по показателю преломления соответствует базальту, плагиоклаз не ниже лабрадора, цветные минералы — преимущественно оливин и авгит, гиперстен же встречается редко; содержание SiO_2 равно 51.91%.

Извержение 5 июля 1926 г. Пепел собран на восточном склоне Ключевского вулкана. Механический анализ его следующий: фракций крупнее 0.5 мм — 11%, от 0.5 до 0.25 мм — 50%, от 0.25 до 0.1 мм — 32%, от 0.1 до 0.01 мм — 7.7% и мельче 0.01 мм — 0.03%. Состав песка соответствует плагиоклазовому базальту. В нем присутствуют: обломки вулканической породы, представляющей непрозрачное бурое или прозрачное зеленовато-бурое базальтовое стекло, содержащее микролиты плагиоклаза, оливина и, реже, авгита; в тяжелой фракции попадает гиперстен.

Кроме перечисленных продуктов извержения Главного кратера Ключевского вулкана, В. И. Влодавцем (1934) изучалась лава паразитических кратеров, прорвавшихся у подножия вулкана в 1932 г. По химическому составу порода кратера Киргурич относится к базальту с пре-

обладанием щелочных земель над щелочами. По мнению автора, эта лава является самой основной из всех известных ранее излившихся пород Ключевского вулкана и его праразитических кратеров. Коэффициент кислотности по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу $\alpha = 1.64$. Под микроскопом порода имеет мелкокристаллическую массу с большим количеством бурого, полупрозрачного стекла, в которую погружены оливин ($2V = +89^\circ$) и пироксен ряда диопсида ($cNg = 38^\circ$, $2V = +58^\circ$).

В последней работе В. И. Влодавца (1940) «Ключевская группа вулканов» дается описание вулканических продуктов, в частности лав и вулканического пепла, эксплозии Ключевского вулкана 28 августа 1936 г. и сублиматов на лаве паразитов 1932 г. По возрасту лавовые потоки Ключевского вулкана автор расчленяет на 4 группы: 1) обнажающиеся в бортах рек. и покрытые почвенным и растительным покровом ($SiO_2 = 52.02\%$, $\alpha = 1.70$); 2) обнажающиеся в верхней части склона подножия и сильно засыпанные вулканическим рыхлым материалом ($SiO_2 = 53.45\%$, $\alpha = 1.76$); 3) лавовые потоки, не прикрытые никакими отложениями ($SiO_2 = 53.43$, $\alpha = 1.82$); 4) лавовые потоки, излившиеся в 1932 г. ($SiO_2 = 53.43\%$, $\alpha = 1.46$). Последние три группы, по мнению автора, излились за истекшие 100—200 лет. По химическому и минералогическому составу все лавы очень близки друг к другу и все имеют базальтовый состав, кроме немногих потоков, приближающихся к андезито-базальтам.

Вулканический песок эксплозии 28 августа 1936 г. относится, по определению В. И. Влодавца, к базальту ($SiO_2 = 53.21\%$, $\alpha = 1.75$). По минералогическому составу этот песок очень близок к вулканическому песку, собранному нами 30 августа 1936 г. и описанному в настоящей работе.

Твердые, рыхлые и газообразные продукты побочных кратеров, прорвавшихся в 1938 г. на восточном склоне Ключевского вулкана, изучаются в настоящее время автором данной статьи. В результате этих изучений выясняется (Набоко, в печати), что лава по химическому составу приближается к среднему химическому составу лав более древних извержений.

Извержение Ключевского вулкана 1937—1938 гг. Извержение Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. было смешанного эффузивно-эксплозивного типа с преобладанием эксплозивного материала над эффузивным (эксплозивный индекс равен 49% — см. А. А. Меняйлов, наст. том). Лава, изливавшаяся как из Главного кратера, так и из трещин на западном и восточном склонах, застывала в потоках типа «аа». Рыхлые продукты извержения были представлены шлаком, бомбами типа хлебной корки, шлаковыми лапилли, песками и пеплом. Твердые и рыхлые продукты извержения по химическому и минералогическому составу весьма близки друг к другу и относятся к андезито-базальтам.

Переходя к описанию продуктов извержения, необходимо отметить, что автор данной статьи большее внимание уделил рыхлому материалу, в частности песку и пеплу, оттого что этот материал дает характеристику всего периода извержения от начала и до его конца, в то время как лава имеется только для двух извержений. Кроме того, этот материал обычно мало изучался, между тем он представляет большой интерес для выяснения условий образования и кристаллизации, поскольку мелкие частички, выброшенные в расплавленном состоянии, получают в воздухе закалку.

Порядок изложения таков, что сначала дается описание твердых, потом рыхлых и газообразных продуктов; в заключение автор касается некоторых общих вопросов.

1. ТВЕРДЫЕ ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Мы располагаем всего лишь тремя образцами лавы, характеризующими два извержения: один образец майского лавового потока (фиг. 1), излившегося из Главного кратера, два других — лавового потока из западной трещины.

1. ЛАВА ГЛАВНОГО КРАТЕРА

Лава Главного кратера (обр. 264) имеет темносерый цвет и пористую текстуру. Микроскопически на сером фоне видны вкрапленники светло-зеленого и серого, со стекляннным блеском, плагиоклаза. Под микроскопом порода обладает витрофировой структурой. Основная масса состоит преимущественно из стекла буро-коричневого цвета; в ней рассеяны редкие микролиты плагиоклаза. Фенокристаллы представлены плагиоклазом, оливином, моноклинным и ромбическим пироксеном. Все минералы свежие, вторичные минералообразования отсутствуют.

Вкрапленники плагиоклаза имеют размер до 1.5 мм, форма выделения их — округлые зерна, таблицы, крестообразные двойники. Большинство вкрапленников разбито трещинками и обнаруживает облачное, волнистое и мозаичное угасание. Некоторые из вкрапленников обладают зональным строением (фиг. 2). Характерной особенностью является переполнение кристаллов плагиоклаза включениями стекла в виде капелек, располагающихся зонами и повторяющих контуры роста кристаллов. Угол максимального угасания в сечениях \perp РМ равняется $32-33^\circ$, что соответствует лабрадору № 58—60.

Оливин встречается в более мелких зернах округлой формы, не превышающих 0.5 мм. Он обычно окружен каемкой рудного минерала.

Моноклинный пироксен имеет идиоморфные очертания, размер зерен 1—1.5 мм, цвет светлозеленый, плеохроизм слабый.

Ромбический пироксен встречается в форме удлиненных табличек с прямым угасанием. Плеохроизм сильный, по Ng — розовый, по Nr — зеленый. Количественно ромбический пироксен не уступает моноклинному. По своему минералогическому составу лава майского потока соответствует гиперстенному андезито-базальту.

Химический состав лавы Главного кратера представлен в табл. 1.

2. ЛАВА С ЗАПАДНОГО СКЛОНА

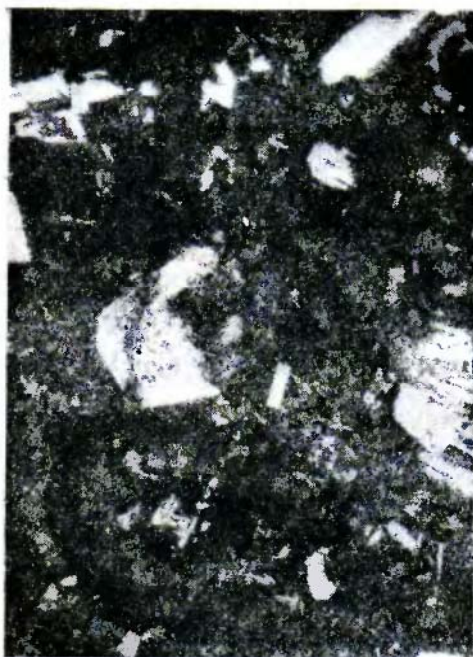
Лава с западного склона Ключевского вулкана имеет темносерый цвет, плотное и пористое сложение. Невооруженным глазом заметны вкрапленники, размером до 2 мм, темносерого плагиоклаза и светло-зеленого пироксена.

Под микроскопом порода обладает андезитовой и витрофировой структурой (фиг 3). Основная масса состоит из светлосерого стекла, переполненного микролитами плагиоклаза. В основной массе плавают фенокристаллы плагиоклаза, оливина, моноклинного и ромбического пироксена. Плагиоклаз вкрапленников имеет иногда зональное строение, волнистое и облачное угасание. Внутренние части вкрапленников переполнены включениями вулканического стекла, внешняя каемка часто бывает чистой, прозрачной. Двойники обычно полисинтетические: встречаются крестообразные сростания.

По замерам на федоровском столике номер вкрапленников плагиоклаза колеблется от 65 до 78. Закон двойникования обычно карлсбадский и реже альбит-Esteral. Микролиты более кислые относятся к № 50.



Фиг. 1. Майский лавовый поток у кратера Ключевского вулкана.
Снято 20. VII. 1938.



Фиг. 2. Зональное строение и волнистое угасание вкрапленника плагиоклаза в базальте.
(шлиф 266, увел. в 45 раз, + николи).



Фиг. 3. Структура лавы с западного склона. Вкрапленники: плагиоклаз, пироксен, оливин
(шлиф 296, увел. в 45 раз || николи).

Таблица 1

Образец № 264

Компоненты	Вес. %	Молек. кол.	
SiO ₂	54.48	0.970	Магматическая формула Ф. Ю. Левинсон-Лессинга $2.3RO \cdot R_2O_3 \cdot 4.9RO_2R_2O : RO = 1:5.2$ $z = 1.9$
TiO ₂	1.10	014	
Al ₂ O ₃	17.42	171	
Fe ₂ O ₃	2.45	015	
FeO	5.94	082	
MnO	0.29	004	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому a = 9.4 c = 7.1 b = 19.9 s = 63.6 f' = 40 m' = 44 c' = 16 n' = 81 t = 1.5 φ = 10 Q = 1.3 a/c = 1.3
MgO	5.12	128	
CaO	8.31	148	
BaO	0.01	—	
Na ₂ O	3.43	55	
K ₂ O	1.19	13	
H ₂ O _{-110°}	нет	—	
H ₂ O _{+110°}	0.12	007	
P ₂ O ₅	0.32	002	
Сумма	100.18	—	

Пересчеты результатов химического анализа на нормативные минералы

Q	or	ab	an	di	hy	il	mt	ap
4.5	7.8	28.6	26.8	9.9	19.1	1.8	1.9	0.6

Результаты замеров плагиоклаза лавы западного склона приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ шлифа	Характеристика кристалла	Ng	Np	Nm	0/3An	Закон двойникования
296	Вкрапленник	52	53	60	78	Альбит-Esteral
296	Вкрапленник крестообразный	45	50	77	68	Карлсбадский
296	Вкрапленник	50	48	74	70	»
296	Микролит	70	70	30	50	Бовенский левый
297	Вкрапленник	63	33	73	65	Карлсбадский

Оливин встречается преимущественно в форме округлых мелких зерен, окруженных рудной каемкой. Более крупные вкрапленники оливина рудной каемки не имеют.

Моноклинный пироксен встречается более часто, чем ромбический, и в более крупных кристаллах, размером до 2 мм. Идиоморфные кристаллы наблюдаются редко; они обладают зональностью и двойниковой структурой; обычно выделения имеют округлую форму, с мозаичным угасанием. Цвет светлозеленый, плеохроизм почти отсутствует ($cNg = 30^\circ$; $2V = +54^\circ$). Ромбический пироксен присутствует в более мелких кристаллах табличатой формы. Плеохроизм по Ng розовый, по Np зеленоватый; $cNg = 8^\circ$, $2V = +52^\circ$. В нескольких местах были встречены сростания моноклинного и ромбического пироксенов.

Рудный минерал в виде мелких зернышек рассеян в основной массе и включен в кристаллах плагиоклаза, пироксена и оливина.

Особенностью структуры лавы западного склона является некоторый гломеропорфировый облик породы. Вкрапленники плагиоклаза, пироксена и оливина располагаются кучно. Часто наблюдаются сростания различных минералов: моноклинного и ромбического пироксенов, плагиоклаза и пироксена, пироксена и оливина. Такое состояние кристаллической части говорит о том, что эти минералы уже существовали в интрателлурической фазе и, вероятно, имели возможность передвигаться в недостаточно вязкой среде.

Химический состав лавы западного склона представлен в табл. 3.

Таблица 3

Образец № 286 (аналитик Н. Х. Айдиньян)

Компоненты	Вес. %	Молек. кол.	
SiO ₂	53,50	0,891	Магматическая формула Ф. Ю. Левинсон-Лессинга
TiO ₂	0,78	010	
Al ₂ O ₃	16,67	164	2,4RO · R ₂ O ₃ · 4,8RO ₂ R ₂ O: RO = 1:6 $\alpha = 1,8$
Fe ₂ O ₃	3,41	021	
FeO	5,63	078	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому
MnO	0,20	003	
MgO	5,66	141	a = 8,8
CaO	9,33	166	c = 6,8
Na ₂ O	3,20	052	b = 22,6
K ₂ O	1,06	012	s = 61,8
P ₂ O ₅	0,23	002	f' = 37
H ₂ O ^{-110°}	0,08	—	m' = 43
H ₂ O ^{+110°}	0,55	—	c' = 20
			n = 81
			t = 1,1
			φ = 12,7
			Q = 0,8
			a/c = 1,3
Сумма	100,30	—	

По коэффициентам Ф. Ю. Левинсон-Лессинга порода ближе всего подходит к базальтам, но более кислым, чем нормальные, и с несколько пониженным отношением R₂O:RO.

Нанесенная на диаграмму числовая характеристика А. Н. Заварицкого дает фигуративную точку, расположенную близко к лейкобазальту и кислому габбро.

Ниже приводятся результаты пересчета химического анализа на нормативные минералы.

Q	or	ab	ap	di	hy	il	mt	ap
3.7	6.2	27.0	26.0	15.3	17.2	1.3	2.7	0.6

Как видим, порода содержит нормативный кварц. Действительный (модальный) количественно-минералогический состав породы следующий (в объемных %):

	Обр. 296	Обр. 297
Основная масса с микролитами . . .	67.8	60.6
Вкрапленники: плагиоклаза	25.7	27.3
» пироксена	4	5.9
» оливина	2.5	3.2
Поры	—	3.0
	100.0	100.0

При сравнении нормативного и модального составов усматривается существенное различие. Нормативно в породе присутствует, хотя и в незначительных количествах, кварц, в действительности порода содержит оливин. Нормативными феррическими минералами являются диопсид и гиперстен, а в результате кристаллизации имеем породу с оливином, диопсидом и очень незначительным количеством гиперстена. Оливин в лаве с западного склона Ключевского вулкана имеет вокруг зерен рудную каемку. Это доказывает, что оливин является неустойчивым реакционным минералом в основной массе. Как отметил А. Н. Заварицкий (1931) в отношении базальтов Ключевского вулкана, оливин нельзя предвидеть, исходя из валового состава породы, и потому он может быть отнесен к группе пород долиморфных.

II. Рыхлые продукты извержения

При многих вулканических извержениях рыхлые или эксплозионные продукты играют важнейшую роль. Масса их обычно превышает в десятки раз массу излитой на дневную поверхность лавы. Можно обратиться к примерам, приведенным в работе Саппера (Sapper, 1927), по данным которого наибольшая масса лавы, излитой на дневную поверхность при извержениях, равняется 12.5 км³ (извержение Лаки в 1785 г.), в то время как для эксплозии рыхлого материала мы имеем 150 км³ (извержение Тамбора в 1815 г.).

При извержении Ключевского вулкана 1937—1938 гг. масса рыхлого материала (180 млн. м³) в 14 раз превышала массу излитой лавы. (13.5 млн. м³).

За период извержений Ключевского вулкана был собран песок 16 эксплозий. Действительное количество эксплозий безусловно было больше, но сбор образцов эксплозионных продуктов мешало то, что вулкан был часто закрыт тучами, а малая населенность района и отсутствие селений южнее вулкана затрудняли определение места выпадения песка. Районами, в которых тем или иным способом было установлено

выпадение вулканического песка, являются: долина р. Камчатки от устья до Милькова, на север — долина р. Еловки до Укинского залива и на юг — восточнее побережья Камчатского полуострова. Таким образом, площадь, на которую распространялся пепловый дождь, равняется площади круга с радиусом в 300 км, т. е. 300 тыс. км².

Толщина слоя вулканического песка отдельных эксплозий в различных точках не одинакова. Как правило, ближе к вулкану мощность больше, с удалением от вулкана — меньше. Были случаи отклонения от этого правила, что зависело от направления и силы верхового (на высоте 5000 м) и низового ветров. Так, например, 2 октября в Усть-Камчатске, в 80 км на северо-восток от кратера, выпало значительно больше песка (500 т на 1 км²), чем на Туйле, находящейся всего в 20 км на север от кратера (300 т на 1 км²).

Количество рыхлого материала, выброшенного Ключевским вулканом за все извержение 1937—1938 гг., подсчитывалось следующим образом. Определялась масса рыхлого материала отдельных эксплозий путем установления площади выпадения песка и средней мощности слоя. За среднее извержение была взята эксплозия в 10 млн. м³ (наиболее сильная эксплозия 2 октября 1937 г. дала 30 млн. м³ рыхлого материала), и эта цифра была умножена на число наблюдавшихся нами эксплозий. Таким образом, масса рыхлых продуктов извержения 1937—1938 гг. как минимум определилась в 180 млн. м³.

Несколько меньшую цифру получаем при подсчете другим методом. Если принять площадь выпадения песков равной 300 тыс. км², а среднюю массу песка, выпавшего за все время извержения на 1 км², равной массе пепла, выпавшей за время наблюдений в Ключах (300 т на 1 км²), то получим 90 млн. т. Первая цифра (180 млн. м³) ближе к действительности, так как во втором случае, несмотря на более точный подсчет массы выпавшего в Ключах пепла, эту величину нельзя, вероятно, приравнять к среднему значению для всей площади.

Все рыхлые продукты, в зависимости от размеров их частиц, Вольф (Wolff, 1914) разделяет на 4 группы: 1) бомбы, 2) лапилли, 3) песок и 4) пепел.

По генезису рыхлые продукты он разделяет на две категории: 1) аутогенные, состоящие из вулканического материала данного вулкана, и 2) аллотогенные, состоящие из материала, генетически не связанного с вулканическим материалом. Аутогенные, в свою очередь, делятся на ювенильные, т. е. появляющиеся на дневную поверхность впервые и принадлежащие, таким образом, к магме данного извержения, и резургентные, получившиеся в результате раздробления вулканической постройки или лавы более раннего извержения, застывшей в жерле. Меркалли (MerCALLI, 1907) первые называет магматическими, вторые — лавовыми.

Г. Рекк (H. Reck, 1915) дал наиболее полную классификацию рыхлых продуктов. Ниже приводится часть ее, касающаяся эксплозионного материала.

II. Твердые продукты

1. Магматические

- 1) с неопределенной формой
 - а) выброшенные в пластическом состоянии
 - б) выброшенные в отвердевшем состоянии
- 2) с определенной правильной формой

2. Включения

- 1) эндогенные (первоначальные выделения)
- 2) экзогенные (случайная примесь из материала прорванных пород)
 α — вулканический материал
 β — невулканический материал

Не ставя себе задачей выработать новую генетическую классификацию для рыхлых продуктов, в частности песков Ключевского вулкана, я несколько упрощаю обе схемы, соединяя их, и разделяю весь материал следующим образом:

А. Аутогенные продукты

I. Ювенильные (магматические):

- 1) выброшенные в пластическом состоянии
- 2) выброшенные в твердом состоянии

II. Резургентные (лавовые):

- 1) одновременного извержения
- 2) неодновременного извержения

В. Аллотогенные продукты

Разделение на аутогенные и аллотогенные продукты основано на качественном составе песков, а именно: предоставляют ли они материал извержений Главного кратера Ключевского вулкана, или же это материал, генетически не связанный с Главным кратером, чуждый ему. Разделение внутри аутогенной группы на ювенильные (магматические) и резургентные (лавовые) продукты основывается отчасти на форме, но в основном на качественном составе песков, и, в частности, на характере вулканического стекла. Если песок ювенильного характера, то вулканическое стекло обычно зеленое, прозрачное; наряду со стеклом встречаются обломки отдельных от него минералов; если же резургентного, то стекло буро-коричневое и черное, а вместо обломков минералов преобладают обломки лавы (подробнее см. ниже). Разделение внутри ювенильной группы основано исключительно на форме частиц. Так, в случае, если песок выброшен в пластическом состоянии, частицы обычно имеют округлую форму с оплавленными краями, часто с закрученными и загнутыми волосообразными ответвлениями; иногда встречаются типичные формы слезинок и т. п. Если материал выброшен в твердом состоянии, частицы имеют форму остроугольных обломков и черепков.

Пески Главного кратера Ключевского вулкана извержения 1937—1938 гг. являются почти все аутогенными и состоят почти целиком из обломков лавы и минералов базальта Ключевского вулкана. Чаще всего эти пески ювенильные-магматические, представляющие не что иное, как распыленную магму, хотя встречаются и резургентные, т. е. лавовые, пески, возникшие от раздробления застывшей в жерле лавовой пробки или стенок кратера.

Можно наметить три группы песков. Первая — лавовые пески, возникшие от раздробления стенок кратера и старой лавовой пробки. К ней относятся пески эксплозий в августе 1936 г. до начала извержения и эксплозий в самом начале извержения. Вторая группа — в основном магматические пески, являющиеся результатом разбрызгивания жидкой магмы. Это пески периода эксплозивной и эффузивной деятельности Главного кратера от июля 1937 г. до января 1938 г. Третья группа обнимает снова лавовые пески, но возникшие уже от раздробления

новых лавовых пробок, которые образовались в периоды между отдельными извержениями из материала данных извержений. Ей соответствуют пески периода редких эксплозий, характеризующих затухающую деятельность Главного кратера от января до апреля 1938 г.

Вязкость магмы, влияющая на выделения газообразных продуктов, обуславливает отчасти характер извержения. Когда отдача газа не непрерывная, временами происходят взрывы, магма приходит в движение и часть ее выбрасывается в атмосферу в виде мелких частиц (песка и пепла). Минералогический и химический состав пепла в некоторой степени отражает эволюцию магмы в пределах одного цикла извержения, а форма частиц отображает характер некоторых отдельных извержений.

1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ БОМБЫ

Извержение 1937—1938 гг. характеризуется мощными выбросами рыхлых продуктов различных диаметров, от блоков в несколько метров до вулканической пыли. При подъемах к кратеру были обнаружены бомбы трех типов: шлаковые, полосообразные и бомбы типа хлебной корки. Первые две формы встречены у Главного кратера, последняя — на западном склоне и, в частности, на поверхности новых лавовых потоков, излившихся из западной трещины.

Полосообразная бомба (обр. № 266). Образец имеет полосообразную форму с поперечным эллипсоидальным разрезом 5×8 см. Наружная поверхность шереховатая, ямчатая, центральная часть более плотная, со стекляннм блеском. Порода пористая, причем поры распределяются неравномерно и имеют различные размеры.

Под микроскопом порода представляет собой гиперстеновый андезито-базальт, близкий к описанной выше лаве Главного кратера и западного склона. Фенокристаллы плагиоклаза, пироксена и оливина погружены в основную массу, состоящую из светлобурого стекла с редкими микролитами плагиоклаза и зернышками пироксена. Фенокристаллы плагиоклаза размером 1.5—2 мм имеют иногда зональное строение с количеством зон, достигающим до 35. Изменение кислотности в плагиоклазе от центра к периферии идет не непрерывно в сторону повышения кислотности, а меняется. Для иллюстрации можно привести следующие замеры:

	Угол
Ядро близко	\perp РМ + 31°
1-я зона	» + 40°
2-я »	» + 41°
3-я »	» + 35°
4-я »	» + 40°
5-я »	» + 34°

В этом случае изменение состава плагиоклаза от ядра к периферии идет в сторону сначала повышения содержания аортитовой молекулы, потом понижения, снова повышения и опять понижения. Чаще же плагиоклаз незональный, двойниковой структуры. Характерной особенностью является волнистое угасание, а иногда даже мозаичное, и наличие включения светлобурого стекла.

Пироксен в породе — как моноклинный, так и ромбический. Ромбический встречается в форме табличек размером 0.1—0.2 мм и отличается от моноклинного слабым, но все же достаточно отчетливым плеохроизмом в розовых и зеленых тонах и прямым угасанием. Моноклинного пироксена больше, чем ромбического: он светло окрашен в зеленый цвет, не плеохроирует. Оба пироксена обычно группируются вместе.

Оливина в породе не много. Он наблюдается в форме округлых зерен: более мелкие из них имеют тонкую рудную каемку, а в нескольких случаях пироксеновую.

Бомба по составу аналогична лаве одновременного излияния и, судя по форме, была выброшена из кратера в полупластическом состоянии. Таким образом, она является частью, оторванной от вязкой лавы, поднимавшейся по каналу вулкана.

Бомба типа хлебной корки (обр. № 298). Бомбы, встреченные на западном склоне, имеют шаровую, эллипсоидную или приплюснутую форму. Поверхность бомб шероховатая, растрескавшаяся, напоминает поверхность хлебной корки (фиг. 4). По составу и структуре бомба близка к лаве с западного склона и относится к гиперстеновому андезит-базальту. Фенокристаллы плагиоклаза, пироксенов и оливина часто находятся в кучках, напоминающая мелкие шпильки. Плагиоклаз чистый, прозрачный двойниковой структуры, часто зонального строения. По максимальному углу погасания в зоне \perp РМ он содержит 65% Ап. Оливина в породе довольно много, больше, чем в бомбе с Главного кратера. Он присутствует в форме округлых зерен размером 0.2—0.5 мм, окруженных рудной каемкой. Пироксен — как моноклинный, так и ромбический, но моноклинного значительно больше. Встречаются фенокристаллы моноклинного пироксена зонального сложения и двойниковой структуры (фиг. 5), погруженные в светлобурый стекловатый базис, переполненный тонкопризматическими микролитами плагиоклаза. Судя по форме, бомба была выброшена из кратера в полупластическом состоянии; при остывании и уменьшении объема поверхность ее растрескалась с образованием типичной бомбы типа хлебной корки.



Фиг. 4. Бомба Ключевского вулкана.

2. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПЕСКИ И ПЕПЛЫ

При ограниченной возможности сбора образцов лав, которые могли бы характеризовать извержение с точки зрения изменения состава и консистенции магмы в процессе подъема разных ее порций, подробное описание образцов вулканических песков отдельных пароксизмов в некоторой степени может восполнить этот пробел. Кроме того, в тех частных случаях, когда Ключевский вулкан был закрыт тучами и нельзя было наблюдать извержений, сбор и описание песков могли дать ключ к разгадке их. Поэтому изучение песков отчасти дает ответ на следующие вопросы: 1) имел ли место подъем новых порций магмы, которая взрывом была разбрызгана и выпала в окрестностях в виде песка; 2) был ли перед взрывом период относительного ослабления действия, в течение которого магма в кратере успевала частично затвердеть в форму лавовой корки, или же в кратере успевали скопиться холмы рыхлого материала, который взрывом выбрасывался в виде резургентного песка. Элементами, характеризующими вулканические пески, являются: 1) цвет всей массы и стекла, 2) форма частиц, 3) пузыристость частиц, 4) механический состав, 5) количество тяжелой фракции, 6) химический состав, 7) минералогический состав.

1) Описание отдельных образцов

Образец № 259. Песок, собранный на краю кратера Ключевского вулкана 30 августа 1936 г. Песок представляет собой однородную сыпучую массу черного цвета с размером частиц меньше 1 мм. Ситовый механический анализ дал следующие результаты (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 1 мм	0.08
от 1 до 0.5 мм	21.73
от 0.5 до 0.25 мм	29.33
меньше 0.25 мм	48.85

По формуле измельчения он относится к псаммитовому типу.

Количество SiO_2 , определенное мной в химической лаборатории Вулканологической станции на Камчатке (с. Ключи), равняется 52.22%.



Фиг. 5. Кучное расположение и зональное строение пироксенов в бомбе (Шлиф 298, увел. в 45 раз, + николи).

Под микроскопом можно различить две группы частиц: обломки лавы и стекла и обломки минералов. Стекло черное, слегка просвечивающее бурым, включает плагиоклаз, присутствующий также в форме мельчайших микролитов. Светло окрашенное, зеленое стекло встречается редко, оно также содержит микролиты плагиоклаза. Вкрапленники плагиоклаза в стекле часто имеют зональное строение, а в обломках, отделенных от стекла, двойниковую структуру. Они включают в себя капельки стекла. По показателю преломления $N_g = 1.568$ плагиоклаз

относится к лабрадору. Гиперстен встречается чаще включенным в стекле и реже самостоятельно: в обоих случаях он имеет идиоморфные очертания, плеохроизм от розового до зеленого, прямое угасание и показатели преломления $N_g = 1.7004$, $N_r = 1.6880$. Моноклинного пироксена в породе меньше, чем ромбического; он окрашен в зеленый цвет без заметного плеохроизма, угол погасания равен 44° . Оливин встречается еще реже.

По содержанию кремнекислоты, минералогическому составу и оптическому характеру стекла (показатель преломления больше, чем у канадского бальзама) песок относится к гиперстеновым базальтам; по форме песчинок, цвету стекла и преобладанию обломков лавы он относится к группе валовых песков.

Образец № 260. Эксплозия 13 апреля 1937 г. Песок выброшен из Главного кратера Ключевского вулкана 13 апреля 1937 г., в промежуток времени между 6 и 10 час. утра, и собран со снега в котловине в расстоянии 300 м от станции (32 км от кратера Ключевского вулкана). Песок представляет темносерую рыхлую массу с диаметром частиц меньше 0.25 мм.

Под микроскопом песок состоит главным образом из черного непрозрачного стекла, реже — зеленого, то менее, то более сильно окрашенного и переходящего в бурое; стекло — как без кристаллических включений, так и с вкрапленниками и микролитами плагиоклаза и пироксена. Плагиоклаз включает в себя капельки черного стекла. По показателю преломления $N_m = 1.569$ он относится к лабрадору. Пироксен в песке, и моноклинный и ромбический, в одинаковых приблизительно количествах. Оливин количественно уступает всем остальным составным частям. С краев он переходит в идингсит. По форме и составу частиц, представляющих остроугольные обломки, черепки, розетки с порами, песок, вероятно, является продуктом раздробления лавовой пробки и стенок кратера, выброшенным в твердом состоянии.

Образец № 261. Эксплозия в ночь с 24 на 25 июня 1937 г. Извержение вулканического песка началось 24-го в 21 ч. 20 м. Песок выпал на площади 3000 км^2 в количестве 1.2 г на 1 м^2 , всего песка на эту площадь выпало около 35 тыс. т. Песок имеет черный цвет со слабым буроватым оттенком.

Преобладающей фракцией его является фракция от 0.25 до 0.1 мм, как видно из его механического состава (в процентах):

Фракции с диаметром:

больше 0.25 мм	9.02
от 0.25 до 0.1 мм	64.66
от 0.1 до 0.01 мм	21.21
меньше 0.01 мм	5.11

Формула измельчения $74\varphi 21\alpha 5\pi$ заставляет относить песок к существенно псаммитовому типу. Содержание $\text{SiO}_2 = 54.59\%$, $\text{H}_2\text{O} = 0.37\%$, $\text{H}_2\text{O} = 0.23\%$. Разделение песка бромформом дало 27.1% тяжелой фракции, состоящей преимущественно из гиперстена, очень небольшого количества моноклинного пироксена, оливина и черного стекла. Легкая фракция состоит наполовину из плагиоклаза и наполовину из стекла.

Данный вулканический песок характеризуется большим содержанием кристаллического вещества. В порядке убывания минералы распределяются так: плагиоклаз, гиперстен, моноклинный пироксен и, наконец, оливин. Формы частиц песка разнообразны (фиг. 6). В общих чертах различаются 4 формы: 1) розетки, 2) розетки с хвостиками, 3) волоски и 4) округ-

лые зерна. Розетки представляют собой пористые зерна с очень причудливыми очертаниями. Иногда такие зерна имеют ответвления в виде изогнутых и закрученных в петли волосков, длиной в 4—5 раз превышающих диаметр розеток. Часто можно встретить отдельно тончайшие волоски, длиной не свыше 2 мм, под микроскопом просвечивающие зеленым цветом. Округлые зерна представлены черным, не просвечивающим, плотным стеклом.

Из обломков присутствуют:

- 1) черное непрозрачное стекло с вкрапленниками плагиоклаза;
- 2) светлозеленое стекло без минеральных включений;
- 3) буровато-зеленое стекло с крупными кристаллами гиперстена;
- 4) зеленое стекло с микролитами и вкрапленниками плагиоклаза;
- 5) бурое стекло с сыпью рудного минерала;
- 6) обломки плагиоклаза, гиперстена, моноклинного пироксена и оливина.



Фиг. 6. Вулканический песок эксплозии в ночь с 24 на 25 июня 1937 г.

Плагиоклаз — в форме обломков обычной двойниковой структуры, очень чистый, водянопрозрачный. Наиболее часто он встречается отделенным от вулканического стекла. По показателю преломления $n_g = 1.571$ он относится к лабрадор-битовниту. Гиперстен находится в тяжелой фракции. Он обычно имеет идиоморфные очертания и одет тонкой рубашкой из буровато-зеленого вулканического стекла. Отделенным от стекла он почти не встречается. По оптиче-

ским свойствам является типичным ромбическим пироксеном: угасание прямое, плеохроизм от светлорозового до светлозеленого, $n_g = 1.706$, $n_p = 1.689$; попадаются сросшиеся кристаллы; включает в себя рудный минерал. Моноклинный пироксен почти бесцветный, с слабым зеленым оттенком. Встречаются в виде обломков, отделенных от стекла или сросшихся с ним.

Для песка июньского извержения характерна форма частиц — пемзовый или шлаковый облик их, а также наличие волосков и обломков стенок пузырей, т. е. ноготкообразных частиц. Такая форма может характеризовать насыщенность магмы газами в момент извержения и служить указанием, что песок был выброшен в пластическом состоянии. Особенностью состава является богатство песка кристаллическим веществом и, в частности, гиперстеном. Вулканическое стекло на 50% окра-

шено в светлозеленый цвет, в то время как в песках других извержений преобладает стекло, окрашенное в черный и бурый цвет.

Форма частиц, минералогический состав и характер стекла позволяют сделать заключение о ювенильности данного песка, возникшего при взрывах от раздробления на мельчайшие частицы еще жидкой лавы. Это предположение подтверждается наблюдениями над извержениями, при которых выброс рыхлого материала сопровождался излиянием лавы и, следовательно, магма достигала кратера.

Образец № 262. Эксплозия 19 июля 1937 г. Вулканический песок был собран с палатки, стоявшей на склоне вулкана на высоте 3600 м. Песок представляет однородную сыпучую массу зеленого цвета, с преобладающим размером частиц крупнее 0.25 мм и целиком состоит из кусочков лавы шлакового характера. Количество пор очень значительно. Под микроскопом стекло имеет светлозеленый цвет и включает большое количество минералов: плагиоклаза, моноклинного и ромбического пироксена и оливина. Форма частиц стекла причудливая: розетки ветвеобразные и т. д. Судя по форме частиц, песок выброшен в твердом или полупластическом состоянии и представляет собой раздробленную, полузастывшую магму пемзового характера.

Образец № 267. Эксплозия 23 августа 1937 г. Эксплозия рыхлого материала произошла в 1 час. Пепел был собран у подножья Ключевского вулкана недалеко от паразита Туйлы. Песок представляет рыхлую черную массу с частицами размером не свыше десятых долей миллиметра: по степени измельчения отнесен к псаммитовому типу.

Фракции с диаметром

больше 0.25 мм	45.12%
меньше 0.25 мм	54.88%

Разделение магнитом дало 33.96% магнитной фракции, в которую вошли черное стекло и рудные минералы. Содержание $\text{SiO}_2 = 54.52\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+110} = 0.22\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-10} = 0.15\%$. Форма частиц весьма причудливая, — преобладают обломки с извилистыми контурами, которые можно назвать пемзовыми. Однажды была встречена частица, имеющая закрученную, веревкообразную форму. Встречены также волоски стекла, но они чрезвычайно редки. Песок в основном состоит из светло окрашенного буровато-зеленого стекла с вкрапленниками и микролитами плагиоклаза. Цветные компоненты — моноклинный и ромбический пироксен и оливин — наблюдаются как включенными в стекло, так и отделенными от него; встречаются они чрезвычайно редко. Кроме светло-зеленого пористого стекла, изредка можно видеть совершенно черное непрозрачное стекло, обычно без минеральных включений. По форме частиц и по составу песок ювенильный, выброшенный частично в полупластическом состоянии из магмы, весьма богатой газами. Условия извержения подтверждают это предположение, так как эксплозия рыхлого материала происходила одновременно с излиянием лавы.

Образец № 268. Эксплозия 27 августа 1937 г. Песок собран в Ключах около станции. Он представляет темносерую, почти черную массу с преобладающими частицами диаметром крупнее 0.25 мм.

Механический анализ песка дал следующие результаты (в процентах):

Фракции с диаметром:

больше 0.25 мм	44.64
от 0.25 до 0.1 мм	24.12
от 0.1 до 0.01 мм	21.28
меньше 0.01 мм	9.96

По формуле измельчения $69\downarrow 21\alpha 10\pi$ относится к существенно псаммитовому типу.

Содержание:

$\text{SiO}_2 = 53.21\%$, $\text{H}_2\text{O} + 110^\circ = 0.13\%$, $\text{H}_2\text{O} - 110^\circ = 0.10\%$.

Частицы имеют форму обломков. Разделение бромформом дало 20.4% тяжелой фракции, состоящей из гиперстена, моноклинного пироксена, оливина, идингсита и черного непрозрачного стекла. Легкая фракция состоит почти на 50% из черного непрозрачного стекла, очень редко с вкрапленниками плагиоклаза, и на 50% из светлого прозрачного стекла с вкрапленниками плагиоклаза и гиперстена, а также из обломков плагиоклаза, как отделенного от стекла, так и окруженного им. Плагиоклаз включает капельки черного и бурого стекла. Песок, вероятно, представляет смесь магматического и лавового материала.

По форме частиц можно заключить, что он был выброшен весь в твердом состоянии.

Образцы № 269—272. Эксплозия 2 октября 1937 г. Пеплопад начался в 18 час. и продолжался всю ночь и следующие сутки. Пепел покрыл площадь, равную 6000 км², и на этой площади его выпало 30 млн. м³. Пепел был собран в ряде точек в разном удалении от кратера: в районе побочных кратеров 1932 г. (находящиеся на расстоянии 20 км), в Ключах (32 км), на р. Хапиче и, наконец, в Усть-Камчатске (80 км). Механический состав и количество тяжелой фракции проб из различных мест характеризуют проявление незначительной золотой дифференциации при транспортировке материала (см. ниже).

Минералогический состав в общем один и тот же у всех проб, но количественные отношения отдельных компонентов несколько расходятся.

Образец № 269 (с. Ключи). Пепел выпал в ночь с 2 на 3 октября. Образец представляет темносерую, тонко измельченную рыхлую массу с преобладающими частицами диаметром от 0.1 до 0.01 мм.

Фракции с диаметром:

больше 0.25 мм	0.49
от 0.25 до 0.1 мм	17.96
от 0.1 до 0.01 мм	74.13
меньше 0.01 мм	7.42

По формуле измельчение $18\downarrow 74a 8\pi$ пепел относится к существенно алевритовому типу.

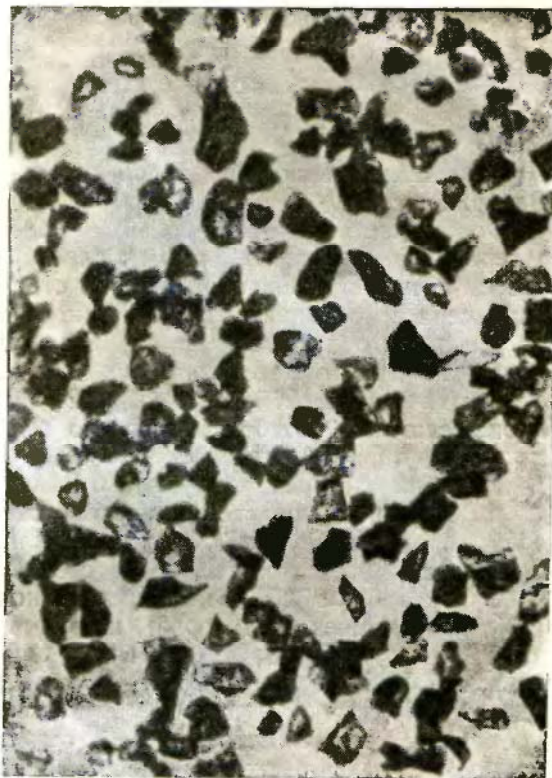
Тяжелая фракция (28.44%) состоит из черного стекла, моноклинного пироксена и редких зерен гиперстена; легкая — из стекла и плагиоклаза. Крупная фракция 0.25—0.1 мм имеет в своем составе больше частиц лавы, фракция же от 0.1 до 0.01 мм содержит увеличенное количество минералов. Форма частиц преимущественно обломочная, реже — черепчатая (фиг. 7).

Состав песка разнообразный. Были обнаружены следующие обломки: 1) черное стекло, просвечивающее по краям бурым цветом, с вкрапленниками плагиоклаза; 2) такие же обломки, но в стекле, наряду с вкрапленниками плагиоклаза, мельчайшие микролиты плагиоклаза; 3) бурокоричневое стекло, включающее четырехугольные вкрапленники плагиоклаза и более мелкие призмочки гиперстена; 4) светлозеленое стекло

с сыпью магнетита; 5) оранжевое прозрачное стекло, включающее призмочки гиперстена.

Кроме перечисленных обломков лавы, в песке много обломков минералов — плагиоклаза, моноклинного пироксена, оливина. Минералы обычно окружены пленкой стекла или срослись с ним одной стороной.

Плагиоклаз (лабрадор-битовнит, $N_g = 1.571$) часто имеет оранжевые потеки, но в основном чистый. Обломки моноклинного пироксена встречаются чаще, чем ромбического. Он очень слабо окрашен в зеленый цвет, а в мелких обломках кажется бесцветным. Ромбический пироксен в форме удлиненных призм имеет более интенсивную окраску и заметно плеохроирует в розоватых и зеленоватых тонах: угасание у него прямое. Оливин обычен, но встречается в небольшом количестве. Стекло в пепле разных окрасок: черное, непрозрачивающее или просвечивающее бурым цветом, коричневое, светлокоричневое, оранжевое и, наконец, зеленое — то более темное, то более светлое. Больше всего черного стекла, но оранжевого сравнительно тоже довольно много.



Фиг. 7. Вулканический песок эксплозии 2 октября 1937 г.

Образец № 271 собран также в Ключах, но выпал за ночь с 3 на 4 октября:

этот пепел представлял не что иное, как продукт извержения в ночь с 2 на 3 октября, но задержавшийся в атмосфере ввиду своей тонкости. Механический состав его следующий (в процентах):

Фракции с диаметром:

больше 0.25 мм	0.20
от 0.25 до 0.1 мм	12.68
от 0.1 до 0.01 мм	59.10
меньше 0.01 мм	28.00

По формуле измельчения $13\psi 59\alpha 28\pi$ пепел, так же как и предыдущий образец, относится к алевритовому типу. Разделение бромформом дало 27.14% тяжелой фракции — несколько меньше, чем в предыдущем образце. Это понятно, так как в первый день, конечно, выпадают более тяжелые частицы песка.

Образец № 274. Эксплозия 21 октября 1937 г. Песок выпал в Ключах в ночь с 21 на 22 октября. Начало эксплозии ознаменовалось

сильным грохотом в 22 часа. Песок лег в Ключах тонким слоем в количестве 40 т на 1 км² и представлял однородную сыпучую серую массу, марающую бумагу в бурый цвет. По формуле измельчения 78Ч 8а 14π он относится к псаммитовым разностям. Механический состав его характеризуют следующие данные (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 0,25 мм	0,46
от 0,25 до 0,1 мм	77,87
от 0,1 до 0,01 мм	7,78
меньше 0,01 мм	13,89

Разделение песка бромформом дало 25,34% тяжелой фракции. Содержание SiO₂ = 53,69%.

Форма частиц — остроугольные обломки, слабо пористые. Наряду с черным не просвечивающим и слабо просвечивающим стеклом встречается и светлоокрашенное зеленое стекло. Стекло включает кристаллы пироксена и оливина. Эти же минералы встречаются и отделенными от стекла. По генезису песок, вероятно, является смесью лавового и магматического материала.

Образец № 275. Эксплозия 24 ноября 1937 г. Песок эксплозии, происшедшей 24 ноября 1937 г., по форме частиц и составу относится к лавовому. Он представляет черную крупичатую рыхлую массу с частицами преимущественно крупнее 0,1 мм. Форма их обычная — черепки и обломки мало пористой и непористой лавы, представленной черным, слабо просвечивающим стеклом с включениями плагиоклаза и пироксена. Минералы, отделенные от стекла, встречаются редко.

Образец № 276. Эксплозия 30 ноября 1937 г. Песок, собранный в Ключах, имеет вид серой, пылевидной гомогенной массы, пачкающей бумагу бурым цветом. Площадь, покрытая песком, равняется 5000 км²; количество — 25 млн. м³. Под микроскопом стекло зеленое, прозрачное, включает вкрапленники плагиоклаза, пироксена и оливина, которые встречаются и отделенными от стекла. Содержание кремнекислоты в песке равно 53,69%.

Судя по форме частиц, песок, вероятно, в основном выброшен в пластическом состоянии (капельвидные, грушевидные частицы, обломки, розетки).

Образец № 277. Эксплозия 19 декабря 1937 г. Песок собран в Ключах. Количество выпавшего песка на 1 км² равняется 4,5 т (с 2 м² было собрано 9 г).

Песок имеет черный цвет со слабо заметным буроватым оттенком. По формуле измельчения 49 ∪ 40а 11π относится к псаммито-алевритовому типу. Механический состав его следующий (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 0,25 мм	5,00
от 0,25 до 0,1 мм	44,27
от 0,1 до 0,01 мм	40,01
меньше 0,01 мм	10,72

Содержание SiO₂ = 54,51%, H₂O_{+110°} = 45%, H₂O_{-110°} = 0,05%.

Разделение песка бромформом дало 27,74% тяжелой фракции.

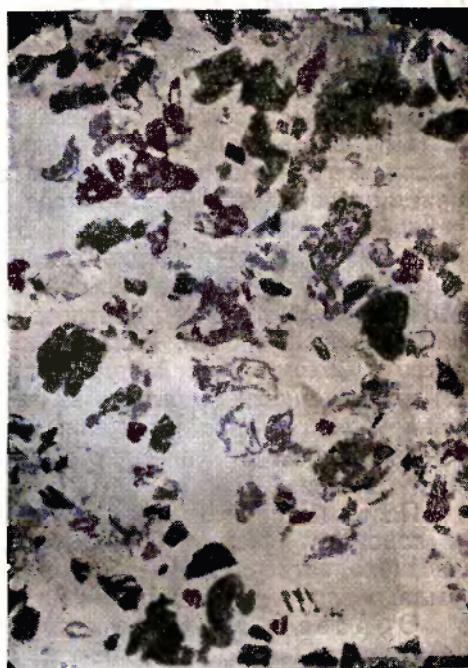
По форме частиц можно вывести заключение, что песок был выброшен из кратера в полупластическом состоянии. На это указывают частички в форме слезинок и слипшиеся песчинки. Преобладающей формой являются все же обломки в виде черепков, обломки с зазубрен-

ными краями, образовавшиеся, вероятно, при разрыве пузырьков в лаве. Присутствуют и ноготки, иголки, стекло трех цветов: 1) черное, просвечивающее бурым, 2) буровато-зеленое различных оттенков, от слабо до темноокрашенного, прозрачного, и 3) яркооранжевое. В данном образце больше всего зеленого, меньше черного и еще меньше оранжевого стекла.

Черное стекло содержит вкрапленники плагиоклаза квадратной и ромбоздрической форм. Микролиты почти не встречаются. Зеленое стекло содержит вкрапленники плагиоклаза и крупные призмы гиперстена, а также обильное количество микролитов плагиоклаза. Кроме плагиоклаза и гиперстена, присутствуют также оливин и моноклинный пироксен (фиг. 8). Встречено несколько зерен апатита и магнетита. Из темноцветных компонентов преобладает гиперстен: он обычно идиоморфный, сильно плеохроирующий от зеленого до розового, с прямым угасанием. Характерной особенностью для данного песка является срастание кристаллов. Так, были встречены кучки кристаллов гиперстена, окруженных светлозеленым стеклом; сросток трех кристаллов моноклинного пироксена, включающих внутри черное непрозрачное стекло и окруженных светлозеленым стеклом; сростки плагиоклаза, переполненные включениями черного стекла. Второй особенностью данного песка является большое количество включений черного, оранжевого и зеленого стекла в кристаллах плагиоклаза, иногда больше чем на 50% из включенного стекла, которое, вероятно, было захвачено при кристаллизации плагиоклаза. В этом же пепле было встречено несколько обломков трещиноватого, бесцветного, прозрачного минерала, изотропного и иногда слабо двупреломляющего с очень низким показателем преломления (в пепле № 285 аналогичный минерал имеет показатель преломления 1.48).

Образец № 278. Эксплозия 19 января 1938 г. Песок собран в с. Ключи. Он представляет черную рыхлую массу с преобладающими частицами диаметром от 0.1 до 0.01 мм. По формуле измельчения песок относится к алевроитовому типу 20Ч 51а 29п. Механический состав его следующий (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 0.25 мм	0.50
от 0.25 до 0.1 мм	19.07
от 0.1 до 0.01 мм	50.88
меньше 0.01 мм	29.53



Фиг. 8. Вулканический песок эксплозии 19 декабря 1937 г. (снято в жидкости с $n = 1.555$, увел. в 84 раза + николи).

Содержание $\text{SiO}_2 = 52.98\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+10} = 0.40\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110} = 0.08\%$. Разделение бромформом дало 25.42% тяжелой фракции, состоящей преимущественно из черного вулканического стекла и обломков моноклинного пироксена. Самый песок состоит главным образом из обломков просвечивающего бурым шлаковидного стекла, т. е. из обломков, имеющих поры и обладающих извилистыми очертаниями, получившимися в результате раздробления шлаковой лавы. Черное стекло содержит вкрапленники плагиоклаза, оливины, моноклинного пироксена и гиперстена. Кроме черного стекла встречается бурое, оранжевое и, очень редко, зеленое. Стекло переполнено микролитами плагиоклаза или же содержит вкрапленники гиперстена. Кроме обломков лавы, встречаются обломки минералов и идиоморфные кристаллы их. Плагиоклаз в обломках обычно совершенно прозрачный и чистый, но иногда включает оранжевое, черное и зеленое стекло. Был встречен один кристалл зонального плагиоклаза с ядром, переполненным включениями черного стекла. По показателю преломления $N_m = 1.571$, крупные обломки плагиоклаза относятся к лабрадору. Пироксен преимущественно моноклинный, ромбического встречено всего несколько зерен. Моноклинный пироксен светлозеленого цвета, неплеохроичный, с показателем преломления, близким к описанному выше, встречается чаще всего в обломках клиновидной формы. Оливин наблюдается чаще, чем в других песках, обычно включенным в черное стекло. Гиперстен обнаружен только включенным в зеленое стекло. Так же как и в образцах № 277 и № 285, встречен минерал с низким показателем преломления.

Песок по своему характеру относится к шлаковому, по генезису — к лавовому (фиг. 9). Лава в верхней части канала вулкана успела частично затвердеть и образовать лавовую пробку, которая взрывом была раздроблена и выброшена в атмосферу в виде песка.

Образец № 281. Эксплозия 30 января 1938 г. Песок выпал в Ключах. По внешнему виду это черный, с легким зеленоватым оттенком и со стекляннным блеском, порошок гомогенного состава. По формуле измельчения $80\psi 15\chi 5\pi$ он относится к существенно псаммитовому типу.

Механический анализ приведен ниже (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 0.25 мм	19.66
от 0.25 до 0.1 мм	60.55
от 0.1 до 0.01 мм	15.06
меньше 0.01 мм	4.73

Разделение бромформом дало 31.34% тяжелой фракции. Содержание $\text{SiO}_2 = 53.82\%$. Обломки имеют разнообразную форму, но чаще всего они остроугольные, волоски отсутствуют. Под микроскопом песок состоит главным образом из обломков лавы, представляющей черное, непрозрачное стекло с вкрапленниками плагиоклаза и пироксена. Изолированные минералы встречаются редко.

Образец № 284. Эксплозия 6 марта 1938 г. В этот день Ключевской вулкан был закрыт. Пеплопад начался днем в 14 час., и на наших глазах белый снег покрывался тонкой пленкой розовато-бурого пепла. К вечеру толщина слоя в Ключах достигла 1 мм. С площади 0.5×1 м было собрано 24.4 г пепла, что соответствует 48.8 т. на 1 км². Пепел представлял бурую, пылевидную массу, пачкающую бумагу розовым цветом; от взвешенных частиц его вода становилась буро-красной.

Преобладающей фракцией являются частицы диаметром от 0.25 до 0.1 мм. Механический анализ пепла следующий (в процентах):

Фракции с диам. трол:	
больше 0.25 мм	0.16
от 0.25 до 0.1 мм	72.03
от 0.1 до 0.01 мм	5.81
меньше 0.01 мм	22.00

Разделение бромформом дало 30.64% тяжелой фракции, состоящей из следующих обломков, расположенных в убывающем порядке: черное, непрозрачное стекло, моноклинный пироксен, оливин, гиперстен. Содержание $\text{SiO}_2 = 54.34\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+1.0^\circ} = 1.00\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110^\circ} = 0.15\%$.



Фиг. 9. Вулканический песок эксплозии 19 января 1938 г.
(шлиф. 278, увел. в 140 раз, || николи).

Петрографический состав пепла следующий:

1. Черное, совершенно непрозрачное стекло без минеральных включений, иногда с вкрапленниками плагиоклаза, но без микролитов последнего.
2. Светлозеленое слабо окрашенное, прозрачное стекло с очень большим количеством микролитов плагиоклаза и с идиоформными вкрапленниками плагиоклаза и, редко, гиперстена.
3. Бурое, оранжевое и темное стекло.

4. Обломки минералов.

Плаггиоклаз встречается в виде обломков идиоморфных кристаллов с ромбоэдрическими разрезами, зональный, с большим количеством включений стекла бурого, зеленого и черного. Пироксен моноклинный — в виде обломков светлозеленого цвета без плеохроизма. Оливин имеет светлорозовую окраску: встречается чаще в форме обломков, но также и в рубашке из черного стекла. Гиперстен отделенным от стекла встречен не был: плеохроизм его от красного до зеленого. Минерал с низким показателем преломления встречается довольно часто. Идингсит, оранжевого цвета с высоким двупреломлением, хотя и является продуктом видоизменения оливина, совместно с ним встречается редко. Форма частиц песка обычно обломочная, округлая. Частицы лавы плотные, не пористые. Вероятно, пепел относится к лавовому типу, т. е. он получен от раздробления лавовой корки, успевшей застыть при длительном, слабом действии вулкана.

Образец № 285. Эксплозия 7 апреля 1938 г. Пепел начал падать в 12 час. дня и покрыл снег тонкой пеленой. Невооруженному глазу он представлялся тонкой, рыхлой песчаной пылью бурого цвета, красящей бумагу в розовый цвет. Частицы измеряются десятими и сотыми долями миллиметра, причем количество разных фракций частиц меньше 0.25 мм почти одинаково, так что тип по формуле измельчения 31ψ $33a$ 36π может быть назван псаммито-алеврито-пелитовым. Механический анализ пепла следующий (в процентах):

Фракции с диаметром:	
больше 0.25 мм	0.55
от 0.25 до 0.1 мм	30.95
от 0.1 до 0.01 мм	32.61
меньше 0.01 мм	35.89

Содержание $\text{SiO}_2 = 53.90\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+110} = 0.90\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110} = 0.17\%$. Разделение частиц пепла бромформом дает 28.34% тяжелой фракции, состоящей из черного, непрозрачного стекла и осколков пироксена и оливина. Легкая фракция представлена более светлым стеклом, бурым, зеленым и бесцветным, а также осколками плаггиоклаза. Форма частиц (под бинокулярной лупой) как округлая, так и угловатая (фиг. 10). Пористые частицы почти отсутствуют; ноготков и других форм, характерных для раздробленных лав, богатых включениями газовых пузырьков, не наблюдается. Отсутствуют и волоски. Части слипшиеся обломочки стекла. Под микроскопом пепел состоит преимущественно из черного непрозрачного, бурого просвечивающего, темно-зеленого и слегка зеленого стекла. По показателям преломления стекло в пепле не одинаковое. Самый большой показатель преломления у черного стекла (больше 1.577), меньше у зеленого (1.576) и еще меньше у слабо окрашенного (1.555). В светлозеленом стекле включены таблички плаггиоклаза и призмочки пироксена. Минералы обычно отделены от стекла, но встречаются и сросшиеся с ним; имеют форму обломков.

Под микроскопом были обнаружены: плаггиоклаз, ромбический и моноклинный пироксен, оливин, идингсит, апатит.

Плаггиоклаз, в виде осколков, по количеству уступает только стеклу. Он обычно водянопрозрачен, иногда с волнистым и облачным угасанием. По показателям преломления $N_g = 1.571$ и $N_p = 1.565$ он относится к лабрадору. По максимальному углу погасания в сечении \perp РМ, равному 30° , плаггиоклаз имеет 56% аортитовой молекулы.

Моноклинный пироксен светлозеленого цвета, без плеохроизма, обычно чистый, прозрачный, без включений. Среди цветных компонентов он преобладает. Показатель преломления его $N_g = 1.714$, $N_p = 1.698$; угасание косое, около 40° . Кроме моноклинного пироксена встречается гиперстен, легко отличимый по прямому погасанию и плеохроизму в розовых и зеленых тонах. В отличие от других минералов, гиперстен



Фиг. 10. Вулканический песок эксплозии 7 апреля 1938 г.
(шлифт 285, увел. в 80 раз, — николи)

почти всегда является заключенным в зеленое стекло и отделенным от стекла почти не встречается. Оливин — довольно редкий минерал и, так же как пироксен, обнаруживается в тяжелой фракции. Он бесцветный, трещиноватый, с $N_g = 1.724$; часто переходит в оранжево-желтый продукт, возможно — идингсит. Точно такие же оранжевые обломки очень часто встречаются самостоятельно; они двупреломляют, N_g больше 1.722.

Кроме перечисленных минералов дважды был встречен апатит, обычно включенный в плагиоклаз. Несколько раз наблюдался минерал с очень низким показателем преломления (значительно ниже канадского бальзама), со слабым двупреломлением, как у апатита. Обычно он встречается в виде идиоморфных кристаллов бипирамидальной формы со спайностью и прямым угасанием. В одном кристалле он имел двойниковую структуру. Кроме того, в донном песке очень распростра-

нены округлые зерна бесцветного, прозрачного, переполненного включениями минерала с низким показателем преломления (меньше 1.487), изотропного и слабо двупреломляющего. Форма частиц песка (зерна и угловатые обломки) указывают на то, что этот песок возник от раздробления уже застывшей лавовой корки, а отсутствие пор в частицах песка — на то, что пробка представляла собой плотную лаву. По составу песок соответствует магме извержения, отсутствие же пор свидетельствует о бедности ее газами. Обращает на себя внимание необычно большое количество воды в этом песке. Бурая окраска, обусловленная преобладанием обломков стекла соответствующего цвета, может быть объяснена гидратацией и окислением.

2) Физическая характеристика песков

Вулканические пески извержения Ключевского вулкана 1937—1938 гг. представляют тонкий однородный порошок, в котором простым глазом обычно трудно различить отдельные составные части. По цвету пески можно разделить на четыре группы: 1) черные, 2) дымчатые, серые, 3) зеленые и 4) бурые.

Оттенки серых и черных цветов отчасти зависят от степени раздробления, т. е. от механического состава песка. Более мелкая фракция пепла — 0.1—0.01 мм почти всегда светлее фракции 0.25—0.1 мм. Появление бурых оттенков, вероятно, обусловлено различной степенью окисления пеплов.

Механический состав взрывных продуктов различных извержений представлен в табл. 4.

В правой графе таблицы дается формула измельчения, применяемая академиком А. Н. Заварицким для характеристики рыхлых продуктов Ключевского вулкана извержения 1926 г. Буквы обозначают фракции. Мы принимаем фракцию ψ больше 0.1, $\alpha = 0.1—0.01$ и π меньше 0.01 мм. В зависимости от преобладания той или иной фракции мы имеем псаммитовый, пелитовый и алевритовый типы. Из таблицы видно, что наши взрывные продукты в основном относятся к псаммитам и пелито-алевритам, пелиты же встречаются лишь в единичных случаях.

3) Петрографическая характеристика песков

Серия вулканических песков извержений Главного кратера Ключевского вулкана имеет однообразный петрографический состав. Отличительные признаки песков — форма частиц и количественные отношения отдельных компонентов. Почти во всех песках присутствуют три составные части: 1) однородное стекло, 2) стекло с вкраплениями и микролитами, 3) минералы.

Вулканическое стекло обычно бывает двух родов: 1) черное и бурое — почти непрозрачное, 2) зеленое различных оттенков — прозрачное. Встречается еще оранжевое стекло в единичных обломках, и то не во всех образцах песков. Показатель преломления стекол колеблется в пределах 1.577—1.555, что соответствует по кривой Джорджа (George, 1924) колебания SiO_2 от 50 до 54%. Наибольший показатель преломления имеет черное и бурое стекло, наименьший — слабо окрашенное зеленоватое стекло. Попытка измерить показатели преломления стекол во всех образцах не увенчалась успехом, так как оказалось, что показатель преломления стекла даже в одном и том же образце песка колеблется в широких пределах, в зависимости от окраски его и величины частиц. Такие колебания могут быть вызваны

Таблица 4

Механический состав взрывчатых продуктов, %

№ обр.	Время извержения	Ц в е т	Ф р а к ц и и, мм				Формула			Т и п
			> 0,25	0,25—0,1	0,1—0,01	< 0,01	измельчения			
							ψ	α	π	
261	1937 24.IV	Черный	9,02	64,66	21,21	5,11	74	21	5	Существенно псаммитовый
268	27.VIII	Черный с зеленым оттенком	44,64	24,12	21,28	9,96	69	21	10	Псаммитовый Алевритовый
269	2.X	Серый	0,49	17,96	74,13	7,42	18	74	8	
274	21.X	Серый с бурым оттенком	0,46	77,87	7,78	13,89	78	8	14	Псаммитовый
277	19.XII	Серый	5,00	44,27	40,01	10,72	49	40	11	»
	1938									
278	19.I	Черный	0,53	19,06	50,88	9,53	20	51	9	Алевритовый
279	—	»	4,01	55,84	33,32	6,74	60	33	7	Псаммитовый
281	30.I	Черный с зеленым оттенком	19,66	60,55	15,06	4,73	80	15	5	»
282	—	Черный	17,70	78,05	4,01	0,24	96	4	0	
283	—	Дымчатый	—	40,92	39,95	19,13	41	40	19	Псаммитово-алевритовый
284	6.III	Бурый	0,16	72,03	5,81	22,0	72	6	22	Псаммитовый
285	7.IV	»	0,55	30,95	38,61	3,589	31	33	36	Пелитовый

тем, что частицы стекла, выбрасываемые из кратера, имеют различный размер и, возможно, температуру и при соприкосновении с воздухом окисляются в различной степени.

Кроме гомогенного вулканического стекла, встречаются обломки стекла, включающие минеральные компоненты. Такие обломки можно разбить на следующие группы:

1) темнозеленое и бурое стекло, переполненное микролитами плагиоклаза и включающее единичные вкрапленники плагиоклаза;

2) то же, но наряду с вкрапленниками плагиоклаза попадают и вкрапленники моноклинного пироксена;

3) стекло без микролитов, но с вкрапленниками плагиоклаза и моноклинного пироксена;

4) зеленое стекло с вкрапленниками плагиоклаза квадратной формы и более мелкими призмочками гиперстена;

5) стекло, в виде пленки окутывающее призму гиперстена;

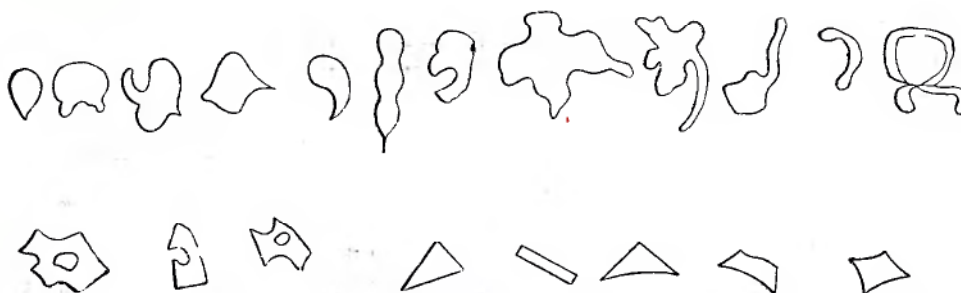
6) буроватое стекло с сыпью магнетита.

Из кристаллических компонентов присутствуют следующие: плагиоклаз, оливин, моноклинный пироксен, ромбический пироксен, апатит

и рудный минерал. Минералы эти встречаются или отделенными от стекла, или же сросшимися с ними.

Плагиоклаз чаще всего попадает в форме обломков и реже — в идиоморфных кристаллах. Обычно он чистый, прозрачный, иногда включает капельки зеленого стекла. В некоторых обломках видна двойниковая структура и зональное сложение. Попадают обломки с резко выраженным обломочным и волнистым угасанием. Химический состав плагиоклаза приблизительно одинаков во всех образцах. По показателю преломления ($N_g = 1.571$, $N_p = 1.565$) и по максимальному углу погасания в зоне $\perp PM$, равному $30-33^\circ$, он относится к битовниту — $N = 75-70$.

Моноклинный пироксен светлозеленого цвета без плеохроизма, в мелких обломках бесцветный; $N_g = 1.714$, $N_p = 1.698$. Угасание — около 40° .



Фиг. 11. Форма частичек вулканического песка.

Вверху—песок, выброшенный в пластическом состоянии. Внизу то же — в отвердевшем.

Ромбический пироксен также светло окрашенный, но с отчетливым плеохроизмом: N_g — розовым и по N_p — зеленым. Угасание прямое. Особенностью гиперстена является то, что он обычно встречается окруженным пленкой стекла и имеет идиоморфные очертания. Показатель преломления: $N_g = 1.7004$, $N_p = 1.6880$.

По сравнению с описанными выше минералами оливин встречается редко. Он бесцветен, с яркими цветами интерференции, $N_g = 1.724$. Иногда можно наблюдать переход оливина в оранжевые продукты, возможно — в идингсит.

Апатит встречен всего несколько раз в виде мелких призмочек, включенных в плагиоклаз. Оптические свойства его обычны.

Кроме перечисленных минералов было обнаружено еще два. Первый был встречен дважды — в образцах № 284 и 285. Кристаллики его имеют бипирамидальную форму, со спайностью и прямым угасанием. Показатель преломления значительно ниже показателя канадского бальзама. Двупреломление очень низкое. В одном кристаллике была заметна двойниковая структура. Второй минерал встречается чаще, всегда в отдельных кругах зерна; он бесцветный, прозрачный и замутненный, сильно трещиноватый, оптически изотропный и слабо двупреломляющий, с показателем преломления несколько меньшим 1.487.

Особенностями, характеризующими пески различных эксплозий, являются: 1) форма частиц, 2) количественные отношения между кристаллической частью и стекловатой, 3) количественные отношения между зеленым неокисленным и бурым окисленным стеклом. Эти различия объясняются условиями образования вулканических песков. Остановимся кратко на всех этих особенностях.

Форма частиц пепла, как уже было сказано выше, разрешает вопрос о том, в каком состоянии пепел был выброшен в атмосферу.

По этому признаку различаются две главные группы (фиг. 11): 1) выброшенные в пластическом состоянии — слезки, волоски, веретенообразные формы и т. д.; 2) выброшенные в твердом состоянии — обломки, черепки и т. д. Чистые формы первой группы встречаются чрезвычайно редко. Наиболее обычна форма розеток. Такие обломки могут быть названы шлаковыми по аналогии с шлаковыми бомбами. Шлаковые частички встречаются как в первой, так и во второй группе, но в первом случае отличаются округленными контурами, а во втором — зазубренностью краев, обусловленной раздроблением застывшей шлаковой корки с разрывом на частицы по пузырькам.

В вулканологической литературе формам бомб посвящены многие страницы, но формам взрывных продуктов более мелкого размера уделено очень мало внимания. Между тем, последние отличаются большим разнообразием форм, поскольку под пеплом понимаются частицы определенного диаметра, независимо от условий их образования. Генетические классификации взрывных продуктов большего диаметра различают: шлаки и спаявшиеся шлаки (выброшены в пластическом состоянии), куски взрывных разрывов и блоки (в отвердевшем состоянии), а также бомбы — тела определенной правильной формы. Аналогии этим трем основным формам можно встретить и в частицах вулканического песка, а именно: 1) шаро- и эллипсоидальные, 2) слезо- и веретенообразные, 3) полосо- или спиралеобразные. Многие характерные формы частиц вулканических песков совершенно не встречаются в более грубых взрывных продуктах. Так, например, можно указать на ноготкообразную форму песчинок, получающихся от разрыва в лаве пузырьков газа, и т. д.

Говоря о классификации песков по их форме, необходимо подчеркнуть, что наиболее часто мы имеем смешанные пески, т. е. такие, где одновременно присутствуют частицы, выброшенные в пластическом, полупластическом и отвердевшем состоянии. Этот факт легко находит свое объяснение при учете быстрого образования лавовой корки в жерле, которое нам удавалось, например, наблюдать на Билуокае (Набоко, 1940).

При разбрызгивании во время взрывов жидкой или полужидкой магмы мелкие частички ее попадают в воздухе в условия быстрой закалки, а потому кристаллическая часть в песках отражает состояние ее в еще жидкой магме. Установлено, что в песках, выброшенных безусловно в пластическом состоянии (волоски, слезинки и т. д.), уже присутствуют все минералы, которыми характеризуется закристаллизовавшаяся лава, а именно: плагиоклаз, пироксен и оливин. Частички стекла, от которых отходят волоски, обычно не содержат микролитов плагиоклаза. Таким образом, в разбрызганной лаве постпароксизмальный период кристаллизации не происходит, в отличие от лавы, излившейся на дневную поверхность. Наличие в таких песках вкрапленников и отдельных обломков минералов указывает на то, что магма, поднимаясь по жерлу вулкана, уже содержала твердую фазу. Минералы в песках проявляются в виде вкрапленников в стекле, сросшихся одной стороной со стеклом, или отделенных от стекла. В последнем случае они имеют форму обломков; идиоморфен только гиперстен. Форма обломков интрателлурических минералов; волнистое погасание некоторых обломков плагиоклаза говорят о том, что на твердой фазе, находящейся в жидкой, отразились подъем магмы и дальнейшие взрывы в ней.

Третьей особенностью песков является цвет стекла. Были встречены пески, состоящие почти из одного светлозеленого прозрачного стекла

и, наоборот, пески, в которых преобладало, бурое, непрозрачное зрачное стекло. Цвет стекла, вероятно, обусловлен различными отношениями закисного и окисного железа. Окисление вулканического стекла может происходить в результате воздействия на него вулканических газов и, в частности, паров воды. Частицы, выброшенные в пластическом состоянии, обычно имеют зеленое стекло; выброшенные же в твердом состоянии — бурое. Такое различие объясняется тем, что лава, успевшая затвердеть и дать «лавовую пробку», а также рыхлый материал, скопившийся в огромные холмы в кратере вулкана, как это наблюдалось нами, некоторое время подвергались воздействию газобразных продуктов и, в частности, паров воды, вследствие чего вулканическое стекло могло несколько окислиться. Непосредственно у жерла Билюкая мы наблюдали, что при взрывах, дававших материал в твердом состоянии, песок имел черное и бурое стекло; в случае же взрывов в Основном лавовом жерле, в котором красная лава стояла у самой поверхности, лапилли и песок имели зеленое стекло. Таким образом, по цвету стекла можно частично судить о том, ювенильный это песок или резургентный.

В таблице 5 дана характеристика песков различных эксплозий. По вертикали указывается генетический признак (магматические, смешанные и лавовые пески), а по горизонтали — насыщенность лавы газом (сильно-, средне- и слабопузыристые частицы песка).

Таблица 5

Характеристика песков разных эксплозий

	Лавовые	Смешанные	Магматические
Сильнопузыристые . . .	—	—	II 19.VII 1937 23.VIII 1937 19.XII 1937
Среднепузыристые . . .	I 30.VIII 1936 13.IV 1937	IV 27.VIII 1937 2.X 1937 21.X 1937 24.XI 1937	III 24.VI 1937 30-XI 1937
Слабопузыристые . . .	V 30.I 1938 6.III 1938 7.IV 1938	—	—

Все пески разделяются на пять групп.

I — лавовые пески средней пузыристости; это пески небольших эксплозий, предшествующих извержению и происходивших в самом начале извержения;

II — магматические пески, очень богатые пузырьками, периода эффузий.

III — магматические пески средней пузыристости, периода до кульминации и после кульминации;

IV — смешанные пески средней пузыристости, периода эксплозий;

V — лавовые пески малой пузыристости, периода заключительных редких эксплозий.

Из приведенного выше обзора мы видим, что первые взрывы вынесли на дневную поверхность лавовые пески, получившиеся от раз-

дробления лавовой пробки и стенок кратера. Дальнейшие взрывы выбрасывали магматические пески. Магма поднялась по каналу и силой взрыва разбрызгалась на мельчайшие капельки. Большое количество пор в частицах песка говорит о том, что поднимающаяся магма была богата летучими компонентами. В результате этого магма была подвижная, лавовая пробка не успевала затвердевать. Пески следующих эксплозий были также магматические, но по количеству пор они уступали пескам предыдущих эксплозий. Магма, освобожденная от летучих, становилась более вязкой.

4) Химическая характеристика песков

Рыхлые вулканические продукты по своему химическому составу приближаются к лавам данного извержения и относятся к андезито-базальтам. Ниже приведенный анализ (табл. 6) характеризует лапилли извержения 19 июня 1937 г. Образец был собран с крыла палатки, стоящей на склоне Ключевского вулкана, на абсолютной высоте 3600 м, и является продуктом извержения Главного кратера.

Таблица
Химический состав лапилли извержения 19 июня 1937 г.

Компоненты	Вес. %	Молек. кал.	
SiO ₂	54,38	0,906	Магматическая формула Ф. Ю. Левинсон-Лессинга: 2.1 RO·R ₂ O ₃ : 4.6 SiO ₂ R ₂ O: RO = 1:5 α = 1.8 Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому: a = 9,5, c = 7,8, b = 18,7, s = 64,0, f' = 24, m' = 42, n = 76, c = 16, φ = 1,4, t = 1,1, Q = 1,2, a/c = 1,2
TiO ₂	0,76	0,10	
Al ₂ O ₃	18,31	1,79	
Fe ₂ O ₃	2,98	0,19	
FeO	5,37	0,75	
MnO	1,15	—	
MgO	4,50	1,12	
CaO	8,64	1,54	
Na ₂ O	3,16	0,52	
K ₂ O	1,54	0,16	
H ₂ O - 110°	0,43	—	
H ₂ O + 110°	0,02	—	
Ba	0,12	—	
Сумма	101,36	—	

Кроме полного химического анализа, в ряде образцов песков, характеризующих различные извержения Главного кратера Ключевского вулкана, были произведены определения кремнекислоты (табл. 7). Все анализируемые образцы песков были собраны в одном и том же месте, на усадьбе Вулканологической станции, в расстоянии 32 км на север от кратера.

Как видно из таблицы, содержание кремнекислоты в песках колеблется от 53,28 до 54,71%. Такие колебания химического состава могут быть обусловлены тремя причинами.

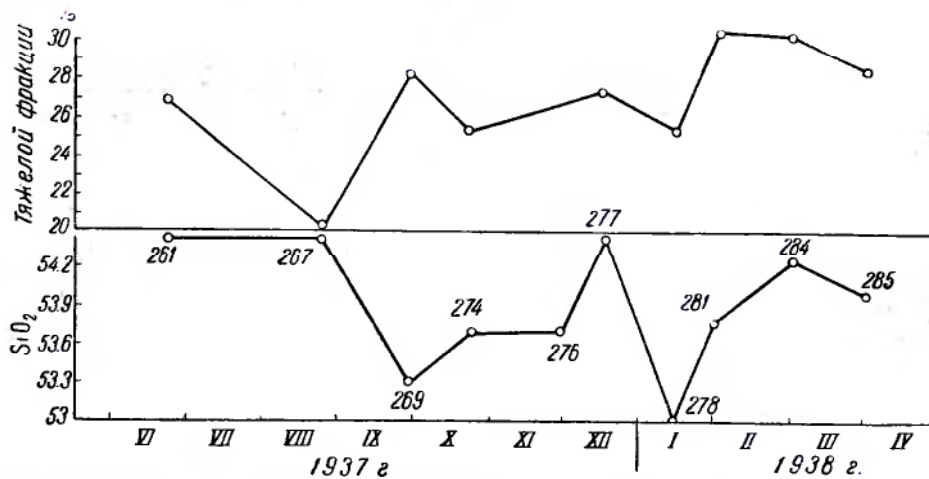
Первая причина — это зависимость от условий транспортировки материала, в свою очередь связанной с атмосферными условиями, особенно с силой и направлением ветра. Результатом транспортировки является как бы гравитационная дифференциация, при которой пески в направлении от кратера в большей или меньшей степени объединяются тяжелой фракцией. Но так как тяжелая фракция состоит

Таблица 7

Содержание кремнекислоты в песках различных извержений

№ обр.	Дата извержения	SiO ₂ , %
1937 г.		
261	24.IV	54.59
267	23.VIII	54.52
269	2.X	53.28
274	22.X	53.69
276	30.XI	53.69
277	19.XII	54.71
1938 г.		
278		53.82
284	6.III	54.34
285	7.IV	53.92

из черного, более основного стекла и феррических компонентов — оливина и пироксена, то естественно, что колебания в содержании тяжелой фракции в некоторой степени могут влиять на химический состав и, в частности, на содержание кремнекислоты.



Фиг. 12. Кривые зависимости содержания кремнекислоты от количества тяжелой фракции в вулканическом песке (цифры на кривой — номера образцов)

Из сопоставления кривых изменения тяжелой фракции и кремнекислоты мы видим, что в большинстве случаев увеличение кремнекислоты идет параллельно с увеличением тяжелой фракции (фиг. 12), в то время как эти две величины должны быть обратно пропорциональны друг другу. Действительно, на примере эксплозии 2 октября 1937 г. мы видим в образцах песка, выпавшего в различно удаленных от вулкана точках, изменение SiO₂ и тяжелой фракции в обратной зависимости.

В условиях нашего сбора образцов песка (в одной и той же точке, на расстоянии всего лишь 32 км от вулкана) эоловая дифференциация не влияет на химический состав песков.

Второй причиной, вызывающей колебания химического состава, может стать генезис рыхлых продуктов. Особенно сильных колебаний в содержании кремнекислоты ожидать от этой причины тоже нельзя, поскольку все пески являются аутогенными, т. е. возникшими от разбрызгивания магмы или же от раздробления лавы, но лавы, относящейся к данному извержению.

Наконец, третьей и основной причиной, влияющей на состав песков, является изменение химического состава магмы в процессе извержения и, соответственно, подъема новых порций ее. По содержанию кремнекислоты можно различать три группы песков, характеризующие три периода извержения: 1) пески с содержанием кремнекислоты 54.5—54.6% характеризуют период извержения от начала до октября 1937 г.; 2) с содержанием от 53.3 до 53.7% характеризуют период от октября 1937 г. до января 1938 г.; 3) от 53.8 до 54.7% — период от января до апреля 1938 г.

Таким образом, в начале извержения были более кислые продукты эксплозии, сменившиеся затем более основными и в конце периода извержений снова более кислыми. Если рассматривать изменение состава вулканических песков как некое отображение изменения состава магмы, то изменение магмы в процессе извержений можно представить как направление от более кислых продуктов через более основные снова к более кислым.

Такое изменение химического состава продуктов эксплозий в пределах одного цикла извержения говорит о наличии процесса дифференциации в вулканическом очаге Ключевского вулкана. Во время предварительного периода относительного покоя вулкана, когда из Главного кратера выделялись только газобразные продукты и происходили эксплозии малой силы, активной частью являлась часть застывающей лавовой колонны. Под лавовой пробкой магма была в относительно спокойном состоянии, и там могла происходить некоторая дифференциация с образованием более кислой верхней части. Как происходила дифференциация, — были здесь элементы гравитационной дифференциации или кристаллизационной, — на этом вопросе останавливаться не будем.

Первые порции эксплозивных продуктов, представляющих распыленную магму верхней части вулканического очага, были более кислые. По мере подъема новых порций лавы из более глубоких частей магматического очага эксплозивные продукты становились более основными. Это был период преобладания эффузий, подъема все новых и новых порций магмы из более глубоких частей очага. Последние порции эксплозивных продуктов были снова более кислые.

5) Некоторые данные по золовой дифференциации

В литературе известно, что транспортировка вулканических рыхлых продуктов, зависящая в основном от атмосферных условий — силы и направления ветра и т. д., весьма существенно влияет на их механический, химический и минералогический состав. Ларсон (Larsson, 1937) в своей работе, посвященной изучению пеплов извержения 1932 г. чилийского вулкана Quizapu, подробно разбирает вопросы золовой дифференциации. Для последней характерно, что тяжелые компоненты (обычно цветные и рудные минералы) при переносе вулканических рыхлых продуктов выпадают первыми, а легкие относятся на большое расстояние. Отсюда следует, что вулканический песок, упавший в непосредственной близости от вулкана, должен быть даже более

основным, чем исходная магма, формирующаяся в лавовом потоке и выброшенная в виде бомб. По мере удаления пепла от центра эксплозии он становится более кислым. Для иллюстрации этого положения Ларсон приводит данные также и по другим извержениям вулканов. По А. Лакруа, при извержении 30 августа 1902 г. вулкана Мон-Пеле бомбы имели SiO_2 от 63.10 до 62.55%, а пепел одновременного извержения, собранный в непосредственной близости от вулкана, содержал 60.25, 59.95 и 61.35% SiO_2 . Андезитовая пемза извержения Кракатау в июне 1938 г. имела 68.51 и 69.4% SiO_2 , а пепел, падавший на острове, — 65.04 и 60.13% SiO_2 . Стекловатая пироксен-андезитовая пемза извержений вулкана Лассен-Пик 1 июня 1915 г. имела 67.16% SiO_2 , а андезитовый пепел — только 64.72%.

Из приведенных примеров мы видим большую разницу в содержании SiO_2 , с одной стороны, в лавах и бомбах и, с другой — в вулканических песках одновременного извержения. Для Кракатау эта разница достигает 9%, для Лассен-Пик — около 2.5%, а для Мон-Пеле — 3%.

Таких больших колебаний в содержании SiO_2 для продуктов извержения Ключевского вулкана мы не имеем. Лава извержения 1937 г. содержала 53.5—54.5% SiO_2 , пески в удалении от кратера на 10—32 км — 53.13—54.7%. Лава, изливавшаяся 31 июля 1937 г. из побочного кратера Билокая, дала 52.56% SiO_2 , а песок, выброшенный одновременно с излиянием лавы и выпавший в непосредственной близости от кратера, — 52.16% SiO_2 , т. е. всего лишь на 0.4% меньше.

Бомба, выброшенная Соседним кратером 7 августа 1938 г., содержала 53% SiO_2 , а песок одновременной эксплозии, упавший к подножию конуса, — 52.86%; таким образом, основность возрасла всего лишь на 0.14%.

Такие небольшие колебания SiO_2 не опровергают теории золотой дифференциации, приложенной к вулканическому извержению: они могут быть объяснены тем, что вулканические пески извержения Ключевского вулкана, особенно Билокая, состоят главным образом из обломков стекла и лавы, а потому нет существенного обогащения тяжелыми, в частности цветными, компонентами в песках, выпавших в непосредственной близости от вулкана.

Небольшие изменения в количестве тяжелой фракции и кремнекислоты в песках (эксплозии 2 октября 1937 г.), выпавших в точках, различно удаленных от центра эксплозий, иллюстрируются данными табл. 8.

Таблица 8

Характеристика песков эксплозии Главного кратера 2 октября 1937 г., выпавших в разных расстояниях от кратера

№ образца	Место взятия образцов	Расстояние от кратера, км	Направление от кратера	SiO_2 , %	Тяжелые фракции, %	Механический состав фракций, %			
						> 0.25 мм	0.25—0.1	0.1—0.01	< 0.01
270	Паразит Туйла	20	С	52.9	35.64	0.82	12.66	65.29	21.23
269	Село Ключи	33	»	53.3	28.44	0.49	17.96	74.13	7.42
273	Река Хляпча	50	СВ	53.5	20.14	—	37.08	21.84	41.08
272	Район Усть-Камчатска .	80	В	53	20.58	—	29.47	38.83	31.70

Песок, выпавший на Туйле в расстоянии 20 км от источника извержения Главного кратера Ключевского вулкана, имеет наибольший процент тяжелой фракции и, соответственно, является более основным (наименьший процент кремнекислоты); пески, перенесенные на дальние расстояния, содержат, соответственно, меньший процент тяжелой фракции и являются более кислыми. Таким образом, изменение содержания SiO_2 стоит в прямой, а тяжелой фракции — в обратной зависимости от расстояния, которое пролетел пепел. Но изменения химического состава пеплов все же очень незначительные — в пределах 0.6%.

В эту схему не вошел песок, выпавший в г. Усть-Камчатске при особых атмосферных условиях, когда пепел несло с моря, т. е. со стороны, обратной Ключевскому вулкану. Несмотря на то, что это место является наиболее удаленным от Ключевского вулкана, пепла здесь выпало наибольшее количество (расстояние 80 км — пепла 600 т на 1 км²). Вероятно, верховой ветер был очень сильный в восточном направлении, в противоположность низовому западному ветру.

Как и следовало ожидать, наряду с дифференциацией песка в зависимости от расстояния происходит дифференциация его и в зависимости от времени выпадения.

При эксплозии 2 октября пепел, выпавший за первые сутки, более обогащен тяжелыми компонентами и имеет более грубый механический состав, чем пепел, осевший на вторые сутки.

Таблица 9

Зависимость механического состава пепла от времени выпадения

Время выпадения пепла	Тяжелые фракции, %	Механический состав фракций, %			
		> 0.25 мм	0.25—0.1	0.1—0.01	< 0.01
В ночь с 2 на 3 октября	28.44	0.49	17.96	74.13	7.42
« » » 3 » 4 »	27.14	0.20	12.68	59.12	28.00

Это и понятно, так как более мелкие и легкие частицы песка могут дольше оставаться в воздухе во взвешенном состоянии.

В заключение необходимо отметить, что условия транспортировки применительно к нашему извержению влекут за собой очень несущественные минералого-химические изменения материала.

б) О некоторых явлениях, связанных с извержением пепла

Еще К. Дитмар в 1851—1855 гг. подметил и описал влияние выпадения песков на ускорение прихода весны. У местного населения сложилось представление, что урожайные годы бывают тогда, когда в окрестностях выпадает «сажа» — вулканический пепел. В 1907 г. на Камчатке из-за обильного пеплопада снег сошел уже в конце марта, в то время как в нормальные годы таяние снега происходит в мае.

На примере извержения 1937—1938 гг. мы также видим влияние выпадения пепла на ускорение таяния снега. А. А. Меняйловым (1938а) в газете «Камчатская правда» была помещена статья, в которой предупреждались местные и хозяйственные организации о необходимости быть готовыми к раннему севу и сплаву леса. С наступлением снеготаяния поверхность земли оказалась покрытой черным слоем песка, который, поглощая солнечные лучи, влиял на ускорение таяния снега. Несмотря на то, что зима была исключительно обильна снегом, он сошел с полей на месяц раньше, чем в предыдущие годы. Необычайно быстрое таяние снега сказалось и на подъеме воды в р. Камчатке: по данным гидрогеолога А. М. Матвеева, подъем воды в реке начался и достиг наибольшей высоты примерно на 1 месяц раньше, чем в среднем за предыдущие 10 лет. Но хотя таяние снега значительно ускорилось, весна затянулась и была, так же как и лето, холодной. Присутствие вулканической пыли в сильной степени влияет на прозрачность атмосферы. Нами было отмечено продолжительное нахождение в атмосфере вулканической пыли (яркокрасные закаты солнца в 1937 г.). Взвешенная в атмосфере вулканическая пыль сильно поглощает солнечную радиацию и тем уменьшает силу ее на земной поверхности. Возможно, что по этой причине весна была затяжной и, несмотря на раннее таяние снега, сельскохозяйственные работы, по данным агронома М. Я. Лубской, начались всего на 10 дней раньше, чем в предыдущие годы. Кроме того, подъем воды в реках остановился, и второй максимум совпал по времени с подъемами предыдущих лет.

Выпадение вулканического пепла зимой приносит местному населению много неприятностей. Кроме таких мелочей, как потемнение днем и засорение глаз, выпадение пепла отражалось и на транспорте: езда на собаках обычно прекращалась до выпадения нового снега и восстановления санного пути. Извержения Ключевского вулкана сопровождались случаями, когда жители Камчатки, в частности охотники, оказывались отрезанными пеплопадом от жилых пунктов.

Крупное значение имеет и вопрос о влиянии пеплов на плодородие почвы, но в настоящей работе он не разбирается, так как требует специальных исследований.

III. ГАЗООБРАЗНЫЕ ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Несмотря на то, что за последнее время в мировой литературе накопился большой исследовательский материал по современному вулканизму, вопрос о летучих компонентах остается неразрешенным. До настоящего времени не удалось даже собрать и анализировать газы из центра извержения при сильных пароксизмах. Многочисленные анализы вулканических газов по существу относятся к вторичным состояниям вулканической деятельности и характеризуют преимущественно остаточный газ, окклюдированный лавой и выделяющийся при остывании и кристаллизации ее. Трудно ожидать, чтобы газ фумарол полностью отражал качественные и в особенности количественные отношения летучих компонентов магмы, дестиллирующихся во время пароксизмов. Кроме того, газ фумарол не отражает истинного вулканического газа и потому, что во время взятия проб очень трудно избежать смешения его с воздухом, что приводит к реакциям (окисление и т. д.), меняющим в вулканическом газе внутримолекулярные отношения.

Большие работы Дэя и Шеперда, изучавших газы вулкана Галемау на Килауэа (Гавайи), обогатили науку знанием состава вулканических газов, но методика взятия проб и производства анализа газов до сих

пор еще не совершенна. К трудностям общего характера в условиях Ключевского вулкана прибавляются трудности подъема к Главному кратеру (около 5000 м) и доставки на такую высоту специальной аппаратуры. Поэтому не удивительно, что о составе газа, выделяющегося из Главного кратера, нам известно не много. С 1936 по 1938 г. было взято из него всего 3 пробы газа, из них две оказались воздухом, и только в одной наряду с воздухом были обнаружены и другие компоненты газовой смеси.

Газ собирался в ампулы объемом в 100 см³, из которых предварительно был выкачан воздух. Каучуковая трубка одним концом присоединялась к ампуле, другой конец ее подводился к трещине в лавовом потоке или к фумароле на краю кратера. После этих приготовлений зажим на каучуковой трубке открывался и газ поступал в ампулу.

Газ, выделяющийся из кратера Ключевского вулкана, имеет белый цвет с серыми и сизыми оттенками, зависящими от примеси рыхлых продуктов. Основной составной частью газа, вероятно, являются пары воды. Из остальных компонентов прямым и косвенным путем определены HCl, H₂S, CO₂, CO, H₂, O₂, N₂ и благородные газы: Ar, Kr, Xe, He, Ne. Концентрация газов незначительная. Об этом можно судить по тому, что, пробув на краю кратера полчаса, мы не чувствовали особенно болезненных ощущений. Отчетливо был слышен запах хлора. Шерстяные чулки у участников восхождения были разъедены — вероятно, сернистым газом. О концентрации газов можно судить также по анализу пробы, в которой основным компонентом оказался воздух.

Газ, собранный А. А. Меняйловым 20 июля 1937 г. из фумаролы на самом краю кратера, был анализирован химиком И. З. Ивановым (1938). Состав газа оказался следующим (в процентах):

HCl	0,45	H ₂	0,36
H ₂ S	0,50	O ₂	19,52
CO ₂	5,60	N ₂ и др.	73,21
CO	0,36	Ar + Kr + Xe	1,14
		He + Ne	0,37

Косвенным путем наличие Cl и SO₃ было определено Н. Н. Шавровой в промывных водах вулканического песка, собранного В. И. Влодавцем 28 августа 1936 г. на краю кратера (Влодавец, 1937):

Cl	0,09%	в навеске	5,8071 г
SO ₃	0,43%	»	5,3809 »

В сублиматах, собранных на краю кратера А. А. Меняйловым 20 июля 1937 г., И. З. Ивановым были определены Cl⁻, SO₄²⁻, Fe⁺⁺⁺, Mg⁺⁺ и Ca. Сублимат представлял буро-коричневую землистую массу, минералогически не определенную. В кратерах видны были два крупных пятна, похожих на возгоны хлорного железа.

У фумарол на лавовом потоке западного склона, на глыбах лавы, обнаружены тонкие белые налеты галита с показателем преломления N = 1.523. На высоте 3170 м у активного выхода газов на глыбах находятся обильные отложения буро-красного порошковатого материала, представляющего окислы железа. Нашатырь, столь обильно отлагающийся у фумарол на лавовых потоках паразитических кратеров 1932 и 1938 гг., ни в Главном кратере, ни на лаве западного склона не был встречен.

Несколько лучше проходило изучение газообразных продуктов побочных кратеров Ключевского вулкана. В продолжение пяти лет

Химический состав газов фумарол камчатских вулканов

Место взятия пробы	Время взятия пробы	Фумаролы, оС	Состав газовой смеси, общ. %							Сублиматы	
			HCl	SO ₂	CO ₂	H ₂ S	CO	H ₂	O ₂		N ₂ и др.
Главный кратер Ключ. вулк.	20 VII 1937	—	0.45	—	5.60	0.50	0.36	0.36	19.52	73.21 ¹	Cl ₂ ', SO ₄ '', Fe''', Mg'', Ca''
Туйла-паразит (1932 г.) Ключ. вулк.	20 IX 1937	420	1.02	—	—	—	0.21	{ 0.11 0.64 }	19.82	79.76 ²	NH ₄ Cl, NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ SiF ₆ , KCl, MgCl ₂ , CaCO ₃ , CaSiF ₆ , CaFe ₂ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , Al ₂ O ₃
Билукай, побочный кратер (1938 г.) Ключ. вулк.	12 VIII 1938	234	0.22	0.26	1.1	—	0.52	0.3	15.9	82 ³	NH ₄ Cl, NaCl, KCl, FeCl ₃ и др.
Западный склон, Ключ. вулк. (выс. 3400 м,)	30 V 1938	—	Запах	—	—	—	—	—	21.0	79 ³	NaCl
Толбачик	17 VII 1937	—	—	3.43	0.56	—	0.48	0.15	20.54	74.84 ¹	—
Шевелуч	15 IX 1937	100	—	—	69.95	4.28	—	—	15.77	—	CaSO ₄ , Al ₂ O ₃ , Mn, Ni, S
Авача	27 VIII 1932	112	27	37	15	18	—	—	3 ⁴	—	Fe ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O, FeSO ₄ , Al ₂ (SO ₄) ₃ · 4H ₂ O, MgSO ₄ , Ba ₂ O ₃ · 3H ₂ O, Na ₂ SO ₂

¹ Аналитик И. З. Иванов. ² Аналитик С. И. Набоко. ³ Газовая лаборатория ИГН. ⁴ Аналитик А. А. Черепенников (Заварицкий, 1935).

более или менее систематически исследовались газы из фумарол-паразитов, прорвавшихся в 1932 г., а за последние годы и из паразитов, прорвавшихся в 1938 г. В таблице 10 приводятся наиболее характерные анализы газа фумарол Главного кратера, Туйлы, Билукая и лавы с западного склона. Для сравнения даны анализы газов других камчатских вулканов.

Газы каждого вулкана характеризуются определенным составом. Газы Главного и побочных кратеров Ключевского вулкана, отличающиеся наличием в них HCl, объединяются в одну группу и относятся, по классификации Саппера, к кислым фумаролам, причем наиболее близкими по составу оказываются газы Главного кратера и Билукая, что и понятно, так как оба они находились в одновременной фазе извержения. Газы паразитических кратеров 1932 г. в своей кислой части содержали только HCl, но при качественном анализе фумарол в 1938 г. автором были констатированы наряду с HCl еще и SO₂ и CO₂ (Набоко, 1940). Возможно, что изменение состава газа объясняется обновлением активности Туйлы в связи с прорывом на восточном склоне новых побочных кратеров. Это тем более вероятно, что тогда было обнаружено обновление трещины, на которой располагались фумаролы № 5 и 6, где как раз и было констатировано изменение качественного состава газа. Фумарольные образования, приуроченные к разным извержениям вулкана, могут иметь свои характерные особенности. Так, сублиматы паразитических кратеров Ключевского вулкана прорыва 1932 г. (от момента извержения и в продолжение 5—6 лет) и побочных кратеров прорыва 1938 г. резко отличаются друг от друга.

По ассоциации минералов продукты верхних кратеров 1938 г. (сульфаты алюминия и магния) приближаются к фумарольным образованиям Авачинского вулкана при извержении 1931 г. (Заварицкий, 1935б). Аналогичный пример мы имеем в фумарольных образованиях Везувия. Согласно Цамбонини (Zambonini, 1936), при извержении 1855 г. образовалось мало тенорита, в 1872 г. его было много, а извержение 1906 г. характеризуется обильным образованием свинцового блеска и реальгара.

Газы вулкана Толбачика отличаются от газов Ключевского вулкана наличием SO₂ вместо HCl, что может быть объяснено особенностями химического состава его магмы. Ближе всего газы Толбачика подходят к газам, выделяющимся из вулкана Галемаумау на Гавайских островах (SiO₂ — 0.37%, CO₂ — 3.64%, H₂O — 9.74%, O₂ — 19.54% и N₂ — 66.71%).

Фумаролы Шевелуча, по классификации Саппера, относятся к холодным и характеризуются преобладанием в их составе CO₂ и H₂S.

Таким образом, мы видим, что каждый вулкан выделяет газ, характеризующийся некоторыми особенностями, зависящими, вероятно, от химического состава магмы и от фазы деятельности, в которой данный вулкан в то или иное время находится.

IV. РОЛЬ ВОДЫ В ОБРАЗОВАНИИ ЭКСПЛОЗИИ

Исключительно интересна проблема происхождения паров воды в вулканических газах и их роли в процессе извержения вулкана, в частности в образовании эксплозий.

В литературе до настоящего времени нет твердо установившейся точки зрения на происхождение воды. Готье всю воду газовых струй считает по происхождению глубинной. Чемберлен склоняется к мнению, что значительная часть воды, участвующей в выбросах вулканов, выделяется непосредственно из пород, залегающих на глубине и нагреваемых

магмой. Некоторые авторы, например Аллен и Цийс, считают, что для выбросов фумарол Долины десяти тысячи дымов, имеющих свыше 99% паров воды, глубинный источник для образования паров не достаточен. При этом ими подмечена некоторая связь между количеством выбрасываемой фумаролами воды и количеством выпадающих осадков. Нам не удалось обнаружить такую связь, какую установили Аллен и Цийс, хотя мы делали специальные определения количества паров воды в газовой струе Билюкая. (Этот вопрос будет рассматриваться в работе, посвященной изучению продуктов деятельности побочного кратера Билюкая).

От того, как вода попала в магматический очаг, т. е. является ли она ювенильной (магматической) или же поверхностной, роль ее в процессе извержения не меняется.

В химической лаборатории ИГН аналитиком Лазаревич был произведен ряд определений воды (выделяющейся при температуре выше 110°) в песках Ключевского вулкана различных эксплозий. Получены были следующие результаты (табл. 11):

Таблица 11

Изменения содержания H₂O в песках Ключевского вулкана

№ образца	Время эксплозии	H ₂ O + 110°, %	№ образца	Время эксплозии	H ₂ O + 110°, %
	1937 г.			1938 г.	
261	24.IV	0.24	278	19.I	0.40
267	23.VIII	0.22	281	30.I	0.46
269	2.X	0.47	284	6.III	1.00
274	22.X	0.44	285	7.IV	0.90
276	30.XI	0.44			
277	19.XII	0.45			

Приведенный ряд цифр показывает, что содержание H₂O в выбросах вулкана во время последующих извержений увеличивается. Обратную зависимость установил Джонстон-Левис (Johnston-Lavis, 1909). По мнению этого автора, в нормальной последовательности продуктов выброса вулканического извержения, имеющего характер пароксизмов, отчетливо обнаруживается уменьшение содержания газа. Он полагает, что магма во время интрателлурического перемещения вверху абсорбирует легколетучие вещества, особенно H₂O, из боковых пород. Абсорбция H₂O из богатых водой пород близ поверхности больше, чем в контакте с породами, находящимися на глубине. Поэтому, по мнению автора, первоначально выброшенные лавы содержат больше газа, чем последующие порции ее.

Выделение летучих веществ из магмы регулируется температурой и давлением. В вулканических явлениях магматические процессы происходят при низких давлениях и высоких температурах. В зависимости от этих факторов часть летучих компонентов может остаться в магме, которая при пароксизмах распыляется и выбрасывается в виде вулканического песка. В начальный момент выделение газов связано с понижением давления, вызванного подъемом магмы из более глубоких частей к поверхности; дальнейшее выделение летучих компонентов регулируется изменением температуры, в данном случае понижением, вызванным началом остывания верхних частей лавовой колонны. Увеличивающаяся вязкость в связи с понижением температуры и образование полутвердевшей лавовой корки препятствовали выделе-

нию газообразной фазы, и часть летучих компонентов абсорбировалась лавой. Таким образом, можно ожидать изменения содержания летучих в лаве по мере развития извержения.

По содержанию воды рыхлые продукты отчетливо разделяются на три группы: 1) от 0.22 до 0.24 %, 2) от 0.40 до 0.47 %, 3) от 0.90 до 1 %.

Любопытно, что эти три группы песков соответствуют трем главным периодам извержения вулкана (Меняйлов, наст. том). Поэтому будет правильно полагать, что вода, связанная в песках (в разбрызганной магме и раздробленной лаве), может характеризовать напряженность магмы в очаге или, вернее, в канале в определенные отрезки времени, поскольку пары воды наравне с другими газами являются одной из движущих сил при извержении вулкана.

Попытаемся перевести воду в пар и сравним количество могущего образоваться пара с наблюдаемыми нами массами паров при извержениях Билюкая.

Если считать средней эксплозией Ключевского вулкана при извержении в 1937—1938 гг. эксплозию, давшую 30 млн. м³ рыхлых продуктов, то для первой группы количество паров воды, переведенных из связанной воды в пеплах, будет равняться 170 млрд. литров, для второй — 350 и для третьей — 760 млрд. литров. По наблюдениям над извержением Билюкая 26 июня 1938 г., из Основного жерла непрерывно в течение двух часов с огромной силой и большой скоростью выделялись газообразные продукты. За эти два часа, по приблизительным подсчетам, было выброшено 2.54 млрд. литров газа. Подсчет показывает, что количество паров воды, которое могло бы выделиться в атмосферу при других физико-химических условиях во время извержений в марте и апреле 1938 г. (III группа песков) за счет воды, связанной в песках, в 300 раз больше, чем в действительности было выделено во время описанного выше двухчасового извержения Билюкая.

Как уже было выше сказано, три группы песков, отличающиеся по содержанию воды, соответствуют трем главным периодам извержения. В песках докульминационного периода (I группа) количество воды минимальное: это был период эффузий, подъема всех новых порций лавы, переноса тепла и обильной дестилляции летучих. В песках послекульминационного периода количество воды скачкообразно возрастает: это период частых эксплозий, когда в результате понижения температуры магмы и увеличения ее вязкости газообразная фаза не могла свободно дестиллировать, а скапливалась до определенного момента предельного повышения внутреннего давления. Такие условия способствовали некоторому удерживанию летучих компонентов в магме. В песках последней группы количество воды максимальное. Эти пески соответствуют периоду редких эксплозий. Лавовый характер песков (резургентные) говорит о том, что между последующими эксплозиями успевала образоваться лавовая корка или пробка. Газы, поднимавшиеся из более глубоких частей магматического очага, накапливались под этой лавовой коркой до определенного критического момента, когда происходил пароксизм. Эти условия были наиболее благоприятны для того, чтобы часть газов могла задержаться в магме в верхних частях канала.

ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАВ И ПЕСКА

Эффузивные и эксплозивные продукты извержения 1937 г. Главного кратера Ключевского вулкана по химическому составу почти тождественны, что говорит о том, что эксплозивные продукты являются не чем иным, как распылением ювенильной магмы, поднимающейся по каналу

из вулканического очага. Как лава, так и вулканический песок являются типичными андезито-базальтами. Фигуративные точки составов их, нанесенные на диаграмму средних химических типов пород по А. Н. Заварицкому, почти совпадают с фигуративной точкой типичного андезито-базальта ($a=10$, $c=6$, $v=20$, $s=64$, $Q=+2$).

Лава, изливающаяся из западной трещины, находящейся на высоте 3600 м, обладает несколько повышенным количеством атомов металлов, входящих в состав цветных компонентов, по сравнению с лавой, изливающейся из Главного кратера на высоте 4860 м (см. табл. 12).

Таблица 12

Числовые характеристики лав и песка

	Лава с западного склона	Лава из Главного кратера	Песок из Главного кратера		Лава с западного склона	Лава из Главного кратера	Песок из Главного кратера
a	8.8	9.4	9.5	c'	20.0	16.0	16.0
c	6.8	7.1	7.8	n	81.0	81.0	76.0
b	22.6	19.9	18.7	t	1.1	1.5	1.1
s	61.8	63.6	64.0	φ	12.7	10	14.0
f'	37.0	40.0	42.0	Q	0.8	1.3	1.2
m'	43.0	44.0	42.0	a/c	1.3	1.3	1.2

В лавах Ключевского вулкана, излившихся из Главного кратера (4860 м) и из верхних кратеров, присутствуют две пироксеновые фазы — моноклинный и ромбический пироксены. Гиперстен отсутствует в лавах из кратеров, находящихся у подножия вулкана (500—1000 м), количество же оливина в последних больше, чем в лавах Главного кратера. Не разбирая здесь сложного вопроса о кристаллизации пироксена в условиях эффузий и эксплозий андезито-базальтов Ключевского вулкана, мы на основании изменений химического состава лав, излившихся из кратеров на различных гипсометрических уровнях, можем объяснить изменение минералогического состава наличием кристаллизационной гравитационной дифференциации, наметившейся в вулканическом очаге Ключевского вулкана.

ВЫВОДЫ

Извержение Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. было смешанного эффузивно-эксплозивного типа с преобладанием эксплозий над эффузиями. Соответственно, из продуктов извержения преобладал эксплозивный материал.

Лава, изливающаяся из Главного кратера, а также из трещин на западном и восточном склонах, застывала в потоках типа «аа». Рыхлые продукты извержения были представлены шлаком, бомбами типа хлебной корки, шлаковыми лапилли, вулканическим песком и пеплом. Твердые и рыхлые продукты извержения по химическому и минералогическому составу близки друг к другу и относятся к андезито-базальтам. Лава, изливающаяся из западной трещины, находящейся на высоте 3600 м, обладает несколько повышенным количеством металлических атомов, входящих в состав цветных компонентов, по сравне-

нию с лавой, изливающейся из Главного кратера, находящегося на высоте 4860 м. В минералогическом отношении эксплозивные продукты Главного кратера имеют ту особенность, что в их составе присутствуют две пироксеновые фазы — моноклинная в виде диопсида и ромбическая в виде гиперстена. Гиперстен отсутствует в лавах из кратеров, находящихся у подножия вулкана, количество же оливина в них больше, чем в лавах из Вершинного кратера. На основании изменения химического состава лавы, излившейся из кратеров на различных гипсометрических уровнях, можно объяснить изменение минералогического состава наличием кристаллизационно-гравитационной дифференциации, намечавшейся в магматическом очаге Ключевского вулкана.

При извержении Ключевского вулкана 1937—1938 гг. главную роль играли все рыхлые или эксплозивные продукты, и масса их в 14 раз превышала массу излитой лавы. Вулканические пески Вершинного кратера почти все аутогенные и состоят в основном из обломков лавы и минералов андезито-базальта Ключевского вулкана. Чаще всего это пески ювенильные-магматические, представляющие не что иное, как распыленную магму, хотя встречаются и резургентные, т. е. лавовые, пески, возникшие от раздробления застывшей в жерле лавовой пробки или стенок кратера. Намечаются три типа песков, соответствующие хронологическому порядку извержения: 1-й — лавовые пески, возникшие от раздробления стенок кратера и старой лавовой пробки, — к нему относятся пески эксплозий до начала извержения; 2-й — магматические пески периода эксплозивной и эффузивной деятельности Ключевского вулкана; 3-й — снова лавовые пески, но возникшие уже от раздробления очаговых пробок, которые успевали образоваться между отдельными извержениями из материала данных извержений. К этому относятся пески периода редких эксплозий, характеризующих затухающую деятельность Главного кратера.

Серия вулканических песков извержений Вершинного кратера Ключевского вулкана имеет однообразный петрографический состав. Отличительными особенностями песков являются формы частиц и количественные отношения отдельных компонентов. Почти во всех песках присутствуют три основные части — гомогенное стекло, обломки лавы, обломки минералов. Кроме того, пески различаются количественным отношением между кристаллической и стекловатой частью и отношением между зеленым неокисленным и бурым окисленным стеклом. Эти различия объясняются условиями образования вулканических песков. Рыхлые продукты извержения по своему химическому составу приближаются к лавам данного извержения и относятся к андезито-базальтам. Однако при химическом исследовании песков различных по времени эксплозий обнаруживается колебание содержания кремнекислоты от 53.28 до 54.71%. Рыхлые продукты начала извержения более кислые, сменились в дальнейшем более основными и в самом конце извержения — снова более кислыми. Таким, хотя и незначительные изменения химического состава продуктов эксплозий в пределах одного цикла извержения также говорят о наличии процесса дифференциации в вулканическом очаге Ключевского вулкана.

Газообразные продукты, выделяющиеся из Вершинного кратера Ключевского вулкана, в своей преобладающей части состоят из паров воды. Из других компонентов прямым и косвенным путем определены HCl, H₂S, CO₂, H₂, O₂, N₂ и благородные газы Ar, Kr, Xe, Ne, He.

Газообразные продукты в некотором количестве остаются окклюзированными в лаве. В частности, в рыхлых продуктах извержения содержание H₂O в выбросах вулкана во время извержения увеличивается.

По содержанию воды рыхлые продукты отчетливо разделяются на три группы: первая — от 0.22 до 0.24%, вторая — от 0.40 до 0.47%, и третья — от 0.90 до 1%. Эти три группы песков соответствуют трем главным периодам извержения вулкана. Вода, связанная в песках, может характеризовать напряженность магмы в очаге или, вернее, в канале, поскольку пары воды наравне с другими газами являются одной из движущих сил при извержении вулкана.

В песках докульминационного периода извержения количество воды минимальное: это были период эффузий, подъема все новых и новых порций лавы, переноса тепла и свободной дестилляции летучих. В песках посткульминационного периода количество воды скачкообразно возрастает: это был период частых эксплозий, когда в результате понижения температуры магмы и увеличения вязкости газообразная фаза не могла свободно дестиллировать, а скапливалась до определенного предельного момента повышения внутреннего давления. Такие условия способствовали некоторому удержанию летучих компонентов в магме. В песках последней группы количество воды максимальное: эти пески соответствуют периоду редких эксплозий. Лавовый характер песков говорит о том, что между последующими эксплозиями успевала образоваться лавовая корка или пробка. Такие условия были наиболее благоприятными для того, чтобы часть газов могла задержаться в магме в верхних частях канала.

ЛИТЕРАТУРА

- Влодавец В. И. Об одном из современных камчатских базальтов. Тр. Петр. ин-та, 1934, № 6.
- Влодавец В. И. Посещение вершины Ключевского вулкана 28 августа 1936 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1937, № 1.
- Влодавец В. И. Ключевская группа вулканов. Тр. Камч. вулк. ст., 1940, вып. 1.
- Дитмар К. Поездки и пребывание на Камчатке в 1851—1855 гг. СПб., 1901.
- Заварицкий А. Н. Физико-химические основы петрографии извержения горных пород. Л., 1926.
- Заварицкий А. Н. Некоторые вулканические породы окрестностей Ключевской сопки. Зап. Росс. мин. об-ва, 1931, вып. 2.
- Заварицкий А. Н. Северная группа вулканов Камчатки. СОПС АН СССР, 1935а.
- Заварицкий А. Н. Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г. Тр. ЦНИГРИ, 1935б, вып. 35.
- Заварицкий А. Н. О вулканах Камчатки. Камчатский сборник, т. I, Изд. АН СССР, 1940.
- Иванов И. З. Исследование газообразных продуктов побочных вулканов Ключевской сопки и Швелуча. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1938, № 4.
- Крашенинников С. Описание земли Камчатки. Т. I и II. СПб., 1786.
- Меняйлов А. А. Значение вулканического пепла для хозяйства Камчатки. Камч. правда, II, IV, 1938а.
- Меняйлов А. А. Извержение Ключевского вулкана и деятельность некоторых камчатских вулканов. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1938б, № 4.
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность камчатских вулканов за I кв. 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. Камч., 1938, № 6.
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность некоторых камчатских вулканов в конце 1937 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камчатке., 1938а, № 5.
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность Ключевского вулкана. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939б, № 7.
- Набоко С. И. Газы и температуры фумарол Туйлы в 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939, № 7.
- Набоко С. И. Деятельность побочного кратера Билукая в период июль — сентябрь 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1940, № 8.
- Иванов И. З. Исследование газообразных продуктов побочных вулканов Ключевской сопки и Швелуча. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1938, № 4.
- Allen E. T. and Zies E. C. A Chemical study of the fumaroles of the Katmai region. Nat. Geogr. Soc. Contr. Techn. Papers, Katmai Series, 1923, № 2.

- Barth P. W. The crystallisation process of basalt. Amer. Journ. of Sci., 1936.
- Bogdanowitsch. Geologische Skizze von Kamtschatka. 1904. Petr. Mitteil., 1904.
- Chamberlain. The gases in rocks. Publ. Carnegie Inst., 1908.
- Day A. E. and Shepherd E. S. Water and volcanic activity. Bull. Geol. Soc. Amer., v. 24, 1913.
- Ermann. Reise um die Erde, Bd. III. Die Ochozker Küste, das Ochozker Meer u. die Reise auf Kamtschatka im Jahre 1829. Berlin, 1848.
- Gautier A. La genèse des eaux thermales et ses rapports avec le volcanisme.
- George W. O. The relation of the physical properties of natural glasses to their chemical composition. Journ. of Geol., v. 32, 1924, N 5.
- Johnston-Lavis H. Mechanism of volcanic action. Geol. Mag., 1909.
- Larsson. Vulkanische Asche vom Ausbruch des Tschilinschen Vulkans Quizapu (1932), in Argentine gesammelt. Bull. Geological Inst., 1937, XXVI.
- Mercalli. Vulcani attivi della terra. Milano, 1907.
- Reck H. Physiographische Studie über vulkanische Bomben. Ergänzungsband zur Zeitschr. für Vulkanologie. 1914—1915. Erschienen 1915.
- Walker Frederick. Differentiation of the Palisade diabase. Bull. of the Geol. Soc. of Amer., v. 51, 1940, N 7.
- Wolff F. Der Vulkanismus, 1914, Bd. I.
- Zambonini. Rend. Acc. Linc. Roma, 1936, 15.