

УДК 552.313:554+930.26(571.6)

ГЕОХИМИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ВУЛКАНА ПЕКТУСАН

© 2005 г. В. К. Попов, член-корреспондент РАН В. Г. Сахно, Я. В. Кузьмин,
М. Д. Гласкок, Б.-К. Цой

Поступило 11.03.2005 г.

Вулкан Пектусан расположен на границе Северной Кореи и Китая, его географические координаты 42°00' с.ш., 128°04' в.д.; высшая отметка 2744 м (рис. 1). Пектусан является единственным действующим вулканом на восточной окраине Азиатского материка и представляет собой стратовулкан диаметром 10 км, расположенный в центральной части базальтового плато Чанбайшань. Конус вулкана сложен главным образом лавами и пирокластическими отложениями трахитов, щелочных трахидацитов, пантеллеритов и комендитов. Вершинная кальдера размером 4 × 6 км, частично занятая оз. Тяньчи, сформировалась около 940 г. н.э. в результате катастрофического направленного взрыва [1, 2]. При извержении было выброшено около 75–115 км³ тефры комендитового состава и огромный объем газов (H₂O, Cl, F, S). Последние вулканические события на Пектусане произошли в 1702 г. (извержение внутри кальдеры игнимбритов и туфов трахитового состава) и в 1898 г. (фреатомагматическое извержение в кратерном озере с выбросом пара, газа и песка) [3].

Формирование вулкана на основании данных абсолютных возрастов протекало на протяжении более 3 млн. лет. При этом отмечается определенная периодичность катастрофических извержений, особенно на протяжении последнего этапа его формирования [1, 2].

Изучение вулкана имеет большое научное значение как с позиции генезиса щелочно-салических расплавов и их связи с базальтоидами, которые слагают огромное плато, так и с целью выяснения механизма извержений и их прогноза в

будущем. Решение этой задачи в настоящее время является весьма актуальной, если учесть, что последнее извержение (более 1000 лет назад) было катастрофическим. Тефра и пеплы были выброшены на большую высоту и достигли Японских островов, а огромное количество газов (хлора, фтора и серы), сопровождавших эти извержения [1], оказало огромное воздействие на окружающую среду. Кроме того, изучение продуктов извержения, особенно вулканических стекол (обсидианов), развитых на Пектусане [4], имеет большое значение для решения геоархеологических задач – вопросов расселения человечества в голоцене, особенностей его проживания в районах активного вулканизма и др. Обсидианы играли определяющую роль в развитии каменной индустрии древнего человека. Выявление источников добычи археологического обсидиана, проводимое на основе сравнения геохимического состава артефактов и геологических образцов [5–7], позволяет рассмотреть пути миграции древнего человека на Востоке Азии и прилегающих островах.

Кислые щелочные породы слагают конус вулкана, а также поля рыхлых пемзовых отложений вокруг него. В разрезе кальдеры пемзы чередуются с потоками трахитов, слагающими основную часть постройки. Кислые породы образуют стекловатые лавовые потоки и покровы игнимбритов, горизонты массивного вулканического стекла, туфов и пемзы. Для игнимбритов характерны фьямме и прослой вулканического стекла, содержащего порфиновые вкрапленники и обломки пород. Стекловатые разности также насыщены порфировыми вкрапленниками щелочных минералов – арфедсонитом, эгирином, санидином, а также фаялитом, клинопироксеном, биотитом, кислым плагиоклазом; акцессорные минералы – циркон, апатит, монацит и ильменит. Вулканические стекла содержат единичные вкрапленники кварца, олигоклаза, пироксена и мелкие выделения рудных минералов.

Геохимические исследования вулканических стекол Пектусана были проведены в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (силикатный химический и рентгенофлуоресцентный анализы) и в исследо-

Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Тихоокеанский институт географии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Исследовательский реакторный центр
Университета Миссури, г. Колумбия, США
Университет Кангвон, г. Чхунхон,
Республика Корея

Таблица 1. Химический (мас. %) и микроэлементный (г/г) состав вулканических пород вулкана Пектусан

Компонент	П-505/5	П-509/1	П-509/5	П-507/1	П-506/1	П-509	П-509/6	П-507/4	21В
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	64.59	66.24	66.14	66.20	68.30	69.25	72.31	72.90	72.64
TiO ₂	0.44	0.34	0.34	0.46	0.34	0.32	0.21	0.23	0.11
Al ₂ O ₃	16.85	15.59	14.95	13.92	13.92	13.79	11.56	9.98	11.50
Fe ₂ O ₃	1.97	2.10	3.12	2.62	2.20	1.04	2.20	0.03	2.15
FeO	2.17	2.44	2.30	2.28	2.48	3.25	2.03	4.13	0.97
MnO	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.07	0.08	0.03
MgO	0.36	–	–	0.38	0.95	–	–	0.24	–
CaO	1.26	0.89	0.90	0.92	0.33	0.49	0.33	0.33	2.20
Na ₂ O	5.81	6.30	6.27	6.25	5.74	6.01	5.62	5.38	3.70
K ₂ O	5.67	5.02	5.03	6.00	5.27	4.64	4.51	4.52	4.90
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.04	0.15	0.06	0.05	0.11	0.06	
H ₂ O ⁻	–	–	0.03	–	0.04	0.05	0.03	0.17	0.50
П.п.п.	0.18	0.37	0.36	0.65	0.07	0.49	0.56	2.13	1.50
Сумма	99.55	99.55	99.60	99.95	99.81	99.50	99.54	99.62	100.20
Ni	2	3	2	3	3	3	2	3	
Co	3	–	–	–	–	–	–	–	
Cr	5	5	–	–	–	4	4	–	
V	5	7	3	2	–	2	3	–	
Cu	16	16	16	18	17	18	18	20	
Pb	24	40	40	21	44	58	63	45	
Zn	76	150	180	110	140	190	260	270	
Sn	7	11	11	7	12	15	17	14	
B	4	8	11	5	5	12	16	16	
F	734	1805	1565	651	992	1969	2986	2184	
Cl	660	1500	1610	660	30	2650	3160	2400	
S	95	95	210	115	25	75	25	55	

Примечание. 1–4 – щелочные трахидациты; 5, 6 – пантеллериты; 7, 8 – комендиты; 9 – трахириолит. Химические анализы выполнены методом мокрой химии (аналитик Л.И. Алексеева), микроэлементы – на рентгенофлуоресцентном сканирующем спектрометре VRA-30 в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (аналитик Е.А. Ноздрачев). Прочерк – не обнаружено. Пропуск – определения не проводились.

вательском реакторном центре Университета Миссури (нейтронно-активационный анализ). Данные микроэлементного состава геологических и археологических образцов были статистически обработаны с использованием кластерного и факторного анализов по методике, изложенной в [8, 9].

По химическому составу кислые вулканические породы вулкана Пектусан относятся к щелочным трахидацитам, пантеллеритам, комендитам и трахириолитам (табл. 1). По содержанию H₂O вулканические стекла трахидацитов–комендитов относятся к обсидианам, а трахириолитов – к об-

сидиано-перлитам и перлитам. Щелочные трахидациты обогащены Na, K, F, Cl. В пантеллеритах и комендитах содержание K закономерно снижается, а концентрация H₂O, F, Cl, B возрастает. В трахириолитах K преобладает над Na. В целом все типы кислых щелочных пород обеднены когерентными элементами (Ni, Co, Cr, V). Концентрации некоторых рудных элементов (Sn, Pb, Zn) возрастают в направлении от трахидацитов к комендитам. Для кислых пород характерны высокие концентрации высокозарядных (HFSE), крупноионных литофильных (LILE) (за исключением Sr и Ba), а также редкоземельных (REE) элемен-

Таблица 2. Редкоземельный (г/г) состав вулканических стекол вулкана Пектусан

Компонент	П-505/5	П-509/1	П-509/8	П-509/2	ПВ-1	ПВ-2	П-509	1-1	21В
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sc	5.45	4.51	4.03	1.55	0.56	0.38	0.87	1.25	1.05
Sb	0.15	0.14	0.14	0.38	0.43	0.46	0.50	0.36	0.39
Cs	1.37	1.43	1.39	2.85	5.35	5.16	4.14	3.71	3.88
Rb	127	136	133	232	346	338	296	226	239
Ba	79	43	–	7	–	36	–	143	109
Sr	–	–	–	–	–	–	–	28	–
La	75.69	80.84	84.56	145.45	158.19	156.93	201.92	65.81	67.01
Ce	148.38	155.44	162.28	273.45	316.68	303.60	386.73	135.47	137.16
Nd	62.55	65.57	65.76	111.87	103.54	101.76	146.72	62.28	50.65
Sm	11.50	12.04	12.09	21.05	26.35	24.92	28.20	10.41	10.97
Eu	0.64	0.48	0.40	0.32	0.37	0.35	0.48	0.37	0.25
Tb	1.47	1.48	1.49	2.85	3.89	3.69	4.08	1.54	1.65
Dy	7.62	8.36	8.22	16.55	23.91	21.76	21.87	10.38	10.90
Yb	3.49	4.34	4.30	8.97	10.22	9.77	10.20	4.01	4.80
Lu	0.52	0.57	0.59	1.28	1.61	1.59	1.65	0.70	0.83
Ta	4.17	4.37	4.29	10.33	14.80	14.14	13.84	6.18	6.97
Zr	484	519	514	1467	1890	1882	1887	250	262.52
Hf	14.23	14.89	14.69	40.11	54.23	52.42	52.96	9.98	9.96
Th	12.27	12.94	12.76	26.42	45.92	44.31	38.24	27.05	27.51
U	4.86	5.00	5.71	12.19	15.42	15.15	15.12	3.65	4.47
Ce/Yb	42	36	37	30	31	31	38	22	29
Zr/Hf	34	34	34	36	35	36	35	25	26
Группа	PNK3	PNK3	PNK3	PNK2	PNK2	PNK2		PNK1	PNK1

Примечание. 1–3 – щелочные трахидацинты; 4–7 – пантеллериты; 8, 9 – трахириолиты. PNK1 – PNK3 – статистически обособленные геохимические группы (обр. П-509 не рассчитывается). Микроэлементный состав определен нейтронно-активационным методом в исследовательском реакторном центре университета Миссури, г. Колумбия, США. Прочерк – не обнаружено.

тов, количество которых возрастает от трахидацинтов к комендитам (табл. 2, рис. 2). В трахириолитах концентрации HFSE, LILE и REE заметно снижаются до уровня щелочных трахидацинтов (табл. 2). Для вулканических пород характерен фракционированный спектр распределения элементов. На фоне высоких концентраций HFSE и LILE с максимумами для Cs, Rb, Th, U, Hf, Zr наблюдаются низкие концентрации Ba и Sr, образующих на кривых глубокие минимумы. Кривые распределения REE имеют отрицательный наклон с европейским минимумом. На спайдер-диаграммах породы образуют два обособленных тренда (рис. 2). Первый тренд объединяет щелочные трахидацинты и трахириолиты, второй – пантеллериты и комендиты. В щелочных трахитах и трахидацинтах спектры REE, нормированные к

примитивной мантии по [10], за исключением Eu совпадают (рис. 2).

Изучение геохимического состава вулканических стекол с целью выявления источников археологического обсидиана в настоящее время весьма актуально [5, 6 и др.]. В России такие исследования проводятся нами на Дальнем Востоке с 1992 г. [7, 11, 12]. В результате геохимического изучения вулканических стекол базальтового и риолитового (обсидианов и перлитов) состава в кайнозойских вулканических комплексах Приморья и сопредельных регионов, а также обсидиановых орудий (артефактов) из археологических памятников были установлены основные источники археологического обсидиана Приморья и Сахалина. Это базальты Шкотовского плато на юге Приморья, вулкан Пектусан (Байтоушань) на границе Корей

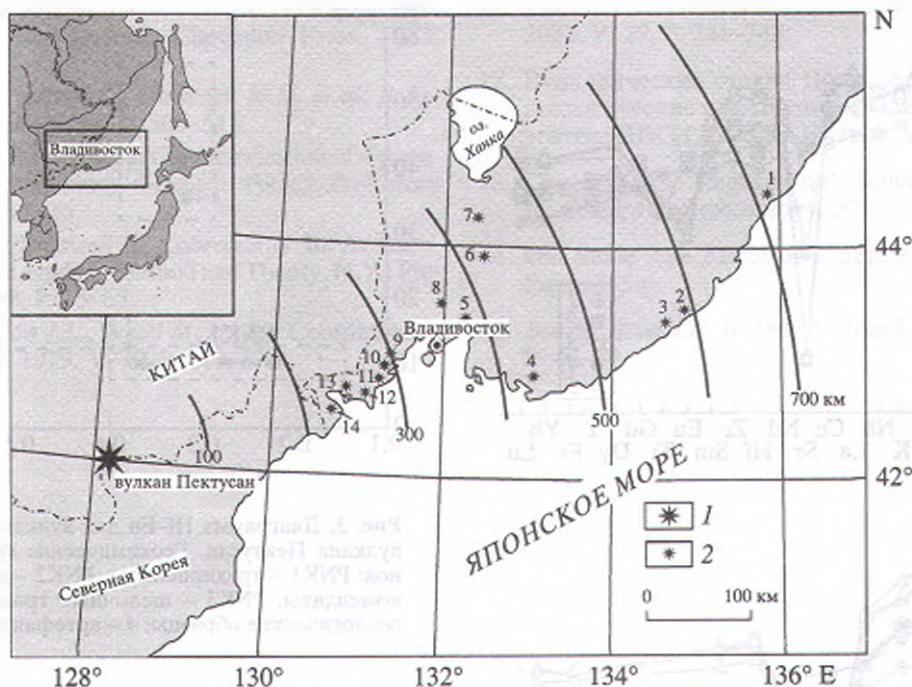


Рис. 1. Схема расположения источника вулканических стекол – вулкана Пектусан и масштабы распространения обсидиановых артефактов в археологических памятниках Приморья по [7, 12]. 1 – коренной источник вулканического стекла; 2 – археологические памятники: Монастырка (1), Евстафий (2), Пхусун (3), Перевал (4), Майхе (5), Горелая Сопка (6), Фирсанова Сопка (7), Тимофеевка (8), Черная Сопка (9), Рыбак (10), Бойсман (11), Троица (12), Гладкая (13), Ханси (14).

и Китая, вулканы Сиратаки и Окего на о. Хоккайдо (Япония) [7, 11, 12].

Наиболее интересным и проблемным из них оказался источник Пектусан. Обсидиан из этого района обнаружен на многих археологических памятниках Приморья, удаленных от источника на расстояние от 230 до 700 км (рис. 1). Однако вплоть до последнего времени этот вывод основывался на результатах анализа всего двух геологических образцов вулканического стекла и оставался предварительным [12]. В связи с этим была поставлена задача дополнительного отбора образцов вулканических стекол с постройки вулкана и обсидиановых артефактов. В 2002 и 2004 гг. авторы провели полевые исследования на вулкане Пектусан со стороны Китая, а также отобрали обсидиановые орудия из двух археологических памятников юга Корейского полуострова – Янхунри и Хавагери [13, 14], датированных около 24000–13000 ^{14}C лет назад (далее – л.н.) [15].

Статистический анализ данных микроэлементного состава позволил выявить на вулкане Пектусан три геохимические группы вулканических стекол, две из которых представляют собой источники археологического обсидиана (рис. 3).

Первая группа (PNK1) является самой представительной и состоит из 2 геологических и 35 археологических образцов. В нее входят обсидиановые

артефакты с 14 археологических памятников южного Приморья (34 образца) и 1 памятника юга Кореи (1 образец) и обсидиано-перлиты и перлиты трахириолитов, развитые на южной (корейской) стороне Пектусана между пиками Хяндо и Санмучжигэ. Вулканические стекла образуют здесь слои “обсидианитов” мощностью от 1 до 5 м, расположенные среди горизонтов пемзы. Химический состав пемз, приведенных в [4] полностью, идентичен составу стекла (обр. 21В, табл. 1). По палеомагнитным датам вулканического стекла и пемзы сформировались около 50 тыс. л.н. [4]. Стекло имеет хорошие технологические качества – массивное строение и раковистый излом с острыми краями.

Вторая группа (PNK2) представлена 3 геологическими и 4 археологическими образцами обсидианов пантеллеритового состава. Группу образуют обсидиановые артефакты с 2 археологических памятников юга Кореи и обсидианы пантеллериткомендитового состава, встречающиеся как в виде прослоев и линз в стекловатых лавовых потоках, так и в виде обломков среди пемзовых отложений в верхней части конуса вулканической постройки. В обсидианах содержатся минералы-вкрапленники. Стекло имеет невысокие технологические качества и редко использовалось для изготовления каменных орудий.

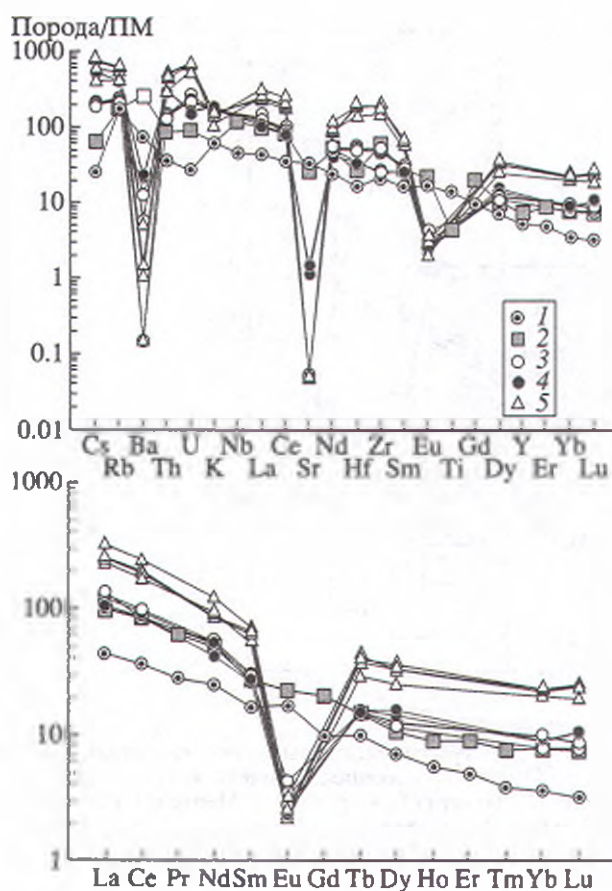


Рис. 2. Содержание микроэлементов в вулканических стеклах вулкана Пектусан, нормированных к примитивной мантии (ПМ) [10]; для сравнения приведены кривые распределения элементов в щелочных базальтах и трахитах вулкана Пектусан (данные авторов); 1 – базальты; 2 – трахиты; 3 – щелочные трахидацинты; 4 – трахириолиты; 5 – пантеллериты и комендиты.

В третью группу (PNK3) обособились 3 геологических образца обсидианов щелочных трахидацинтов из прослоев стекла в игнимбритах и из обломков среди пемзовых отложений на склонах вулкана. Обсидианы часто пемзовидные, с большим количеством порфириновых вкрапленников. Плохие технологические качества стекла определяют его непригодность для изготовления орудий.

Проведенные нами впервые исследования геохимии вулканических стекол вулкана Пектусан показали, что на нем расположены два источника обсидиана, различающиеся по химическому составу и технологическим качествам. Вулканические стекла первого источника (группа PNK1) использовались древними людьми в течение длительного времени [7], начиная с позднего палеолита, около 24 тыс. л.н. В интервале времени 24 тыс.–10 тыс. л.н. расстояние от источника обсидиана до мест его обработки составляло

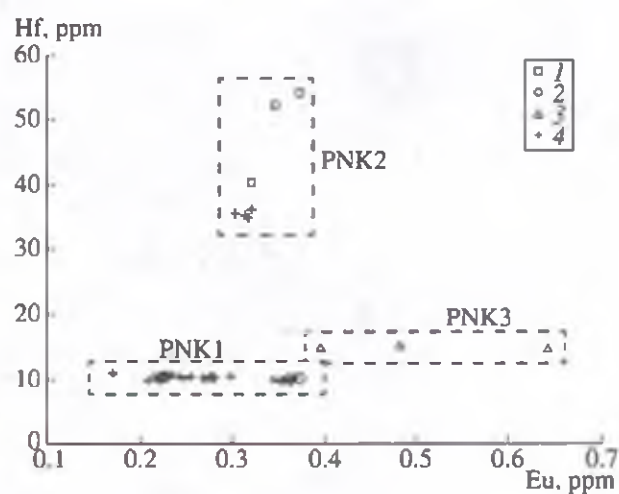


Рис. 3. Диаграмма Hf–Eu для вулканических стекол вулкана Пектусан. Геохимические группы обсидианов: PNK1 – трахириолиты, PNK2 – пантеллериты и комендиты, PNK3 – щелочные трахидацинты. 1–3 – геологические образцы; 4 – артефакты.

вплоть до 400–500 км. Обсидианы второго источника (группа PNK2) распространены на археологических памятниках незначительно.

В заключение следует подчеркнуть, что происхождение кислых щелочных пород вулкана Пектусан связано с процессами дифференциации трахитовых расплавов. Результаты изучения артефактов, которые все еще являются редкими и даже “экзотическими” объектами исследования российских геологов, позволили значительно дополнить банк геохимических данных по природным вулканическим стеклам – носителям первичной генетической информации при изучении процессов эволюции магматических расплавов.

Работа выполнена при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) (грант RG1–2538–VL–03); грантов ДВО РАН 05–III–А–08–099, РФФИ (гранты 99–06–80348, 02–06–80282) и программы № 13 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horn S., Schmincke H.-U. // Bull. Volcanol. 2000. V. 61. P. 537–555.
2. Чичагов В.П., Рим Квон Мук, Черкинский А.Е., Чичагова О.А. // ДАН. 1989. Т. 306. № 1. С. 169–172.
3. Денисов Е.П. Тен Ха Чер. Вопросы геоморфологии и морфотектоники южной части Дальнего Востока. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1966. С. 3–7.
4. Геология Кореи. Пхеньян: Изд-во книг на иностр. языках, 1993. 663 с.
5. Archaeological Obsidian Studies: Method and Theory / M.S. Shackley. Ed. N.Y.: Plenum Press, 1998. 243 p.

6. The Petrology of Archaeological Artifacts / D.R.C. Kempe, A.P. Harvey. Eds. Oxford: Clarendon Press, 1983. 255 p.
7. Kuzmin Y.V., Popov V.K., Glascock M.D. et al. // Archaeometry. 2002. V. 44. P. 505–515.
8. Glascock M.D. In: Chemical Characterization of Ceramic Pastes in Archaeology. Madison (Wis.): Prehistory Press, 1992. P. 11–26.
9. Glascock M.D., Braswell E., Cobean R.H. In: Archaeological Obsidian Studies: Method and Theory. N.Y.: Plenum Press, 1998. P. 15–65.
10. Wood D.A., Joron J.L., Treuil M. et al. // Contribs Mineral. and Petrol. 1979. V. 70. P. 319–339.
11. Kuzmin Y.V., Glascock M.D., Sato H. // J. Archaeol. Sci. 2002. V. 29. P. 741–749.
12. Вулканические стекла Дальнего Востока России: геологические и археологические аспекты. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2000. 168 с.
13. Choi B.-K. The Janghung-ri Paleolithic site. Ch'unch'on: Ins. Kangwon Archaeology, 2001. 243 p.
14. Old Stone Age Relics of Korea. Seoul: Yonsei Univ. Press, 315 p.
15. Bae K., Kim J.C. // Rev. Archaeol. 2003. V. 24. № 2. P. 46–49.