

УДК 552.313.554

ВУЛКАН ПЕКТУСАН: ХРОНОЛОГИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ, СОСТАВ И ЭВОЛЮЦИЯ МАГМ НА ОСНОВЕ К–Ar-ДАТИРОВАНИЯ И ИЗОТОПОВ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ И $\delta^{18}\text{O}$

© 2007 г. Член-корреспондент РАН В. Г. Сахно

Поступило 28.07.2006 г.

В пределах Дальнего Востока широко распространены базальтовые плато, долинные лавовые потоки, моногенные вулканы, излияния и извержения которых происходили в позднем миоцене и плиоцене. Современная вулканическая деятельность проявлена очень ограниченно, главным образом на юге Дальнего Востока: вулканы Удалянчи, Эркэшань, Цзинбоху (Северо-Восточный Китай), вулканы Токинского Становика (север Амурской области). Извержения этих вулканов (некоторые из них извергались в XVIII в.) проявились главным образом излияниями щелочных базальтоидов (базанитов, лейцитовых базанитов, лейцититов и др.) и ограничились небольшим ареалом. Принято считать, что этот регион не является вулканически активным, а извержения в современное время не представляют опасности. Геологические исследования прошлого столетия показали, что расположенный на юге Дальнего Востока вулкан Пектусан (Байтоушань) извергался в историческое время, но об активности его деятельности в прошлом известно пока очень немного. Отсутствуют достоверные данные о масштабах, активности извержений на ранних этапах его развития, сведения о составе вулканических продуктов, цикличности и т.д. Это не позволяет дать оценку вулканической опасности. Некоторые вопросы геологии вулкана были затронуты в работах корейских, китайских и российских геологов [1–6 и др.]. Детальное изучение его строения и эволюции магматических событий возможно только на основе изотопной геохронологии пород, изучения разрезов, выделения циклов наиболее сильных извержений и характера эксплозивной активности в прошлом. Изотопное датирование таких пород, поскольку вулканические события проходили в позднем плейстоцене и голоцене, возможно только на основе новой методики, разработанной в ИГЕМ РАН [7].

Вулкан Пектусан расположен на границе двух стран – Северной Кореи и Китая, в непосредственной близости от Южного Приморья России (рис. 1). Его географические координаты $42^{\circ}06'$ с.ш., $128^{\circ}04'$ в.д.

В 2004–2005 гг. нами выполнены исследования северо-восточного и западного склонов вулкана, в результате которых получен оригинальный материал по строению, составу и возрасту вулканических толщ от подножия до вершины. По южной стороне (Северо-Корейской) использованы геологические материалы по [3]. Новые данные по геохронологии, составу слагающих толщ позволили выделить этапы, циклы в развитии вулкана, а результаты изотопных исследований (по стронцию и кислороду) – рассмотреть некоторые вопросы генезиса щелочно-сиалических пород.

Этап формирования щитового вулкана отвечает наиболее ранним излияниям базальтов и трахитов, приуроченных к пересечению разломной системы Таньлу (ее восточной ветви) и разлома Пектусан. Здесь известны и более древние палеогеновые и миоценовые платобазальты (табл. 1). Продукты формирования щитового вулкана представлены щелочными базальтами, высокотитанистыми и высокожелезистыми разновидностями с высокой суммой щелочей и преобладанием натрия над калием. Выше по разрезу они сменяются менее железистыми и титанистыми, но более щелочными базальтами (I цикл). Это плотные афировые породы, в верхней части покровов появляются пористые с переходами в шлаковидные фации. Второй (II) цикл ознаменовался излиянием более магнезиальных и более натровых, но менее титанистых, субщелочных базальтов. Верхняя часть щитового вулкана (III цикл) представлена маломощными покровными излияниями трахиандезитов и трахитов.

На южной стороне, в низах щитового вулкана северокорейские геологи выделяют покровные трахиты, переслаивающиеся с субщелочными базальтами, возраст которых определен как позднеплиоценовый (3.0–3.11 [3]). По данным [3] омоло-

*Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток*

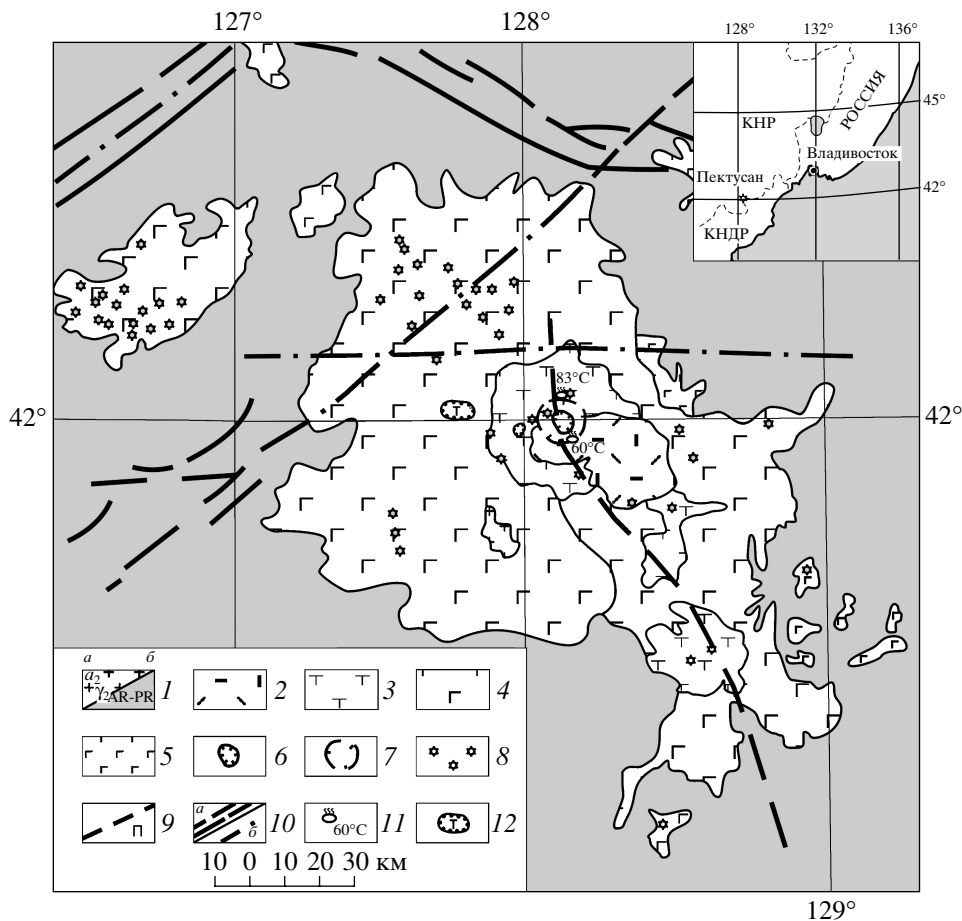


Рис. 1. Схема геологического строения вулкана Пектусан составлена на основе геологических карт и космических снимков (Magmatic map of Jilin Province, China. М-б 1000000, 1989; 7). 1 – фундамент: а – мезозойские граниты, б – архейско-протерозойские комплексы; 2 – комендит-риолитовые пеплы (1903 г. извержения); 3 – трахиты; 4 – базальты щитового вулкана; 5 – базальтовое плато (миоцен–палеоген); 6 – кальдера, заполненная оз. Тянци; 7 – внешняя кальдера; 8 – жерловины моногенных базальтовых вулканов; 9 – Пектусанский разлом; 10 – разломы системы Таньлу; 11 – горячие источники и их температура; 12 – трубки взрывов.

жение центров излияния базальтов продвигается в северном направлении вдоль Пектусанского разлома.

Суммарная площадь щитового вулкана оценивается в 15–16 тыс. км², а общий объем извергнутых продуктов – не менее 10–15 тыс. км³.

Формирование конуса стратовулкана началось после перерыва, равного 450–500 тыс. лет, излиянием потоков трахитов и продолжалось на протяжении более 400 тыс. лет. Периклинальное залегание потоков трахитов хорошо прослеживается по окружности всего вулкана. Разрез конуса представлен потоками трахитовых лав, при этом их состав снизу вверх меняется мало: увеличением содержания кремнекислотности и уменьшением магнезиальности при незначительных колебаниях соотношения Na/K. Были сформированы мощные толщи покровных трахитов, прорванные трубчатыми телами (диаметром до 200–300 м) щелочных базальтов на северном и

западном склонах вулкана. Возраст внедрения щелочных базальтов – 240–245 тыс. лет назад. Завершается этот этап извержениями игнимбритов трахидацитового состава, перемежающихся с потоками лав трахитов. Реставрированная высота вулкана на этом этапе достигала не менее 3.0–3.5 тыс. м.

Кальдерный этап. В конце формирования конуса вулкана произошли эксплозивные извержения пеплов, брекчий и игнимбритов трахитового состава. Развитию кальдерного процесса – сильным эксплозивным извержениям – предшествовали внедрения трубчатых тел трахибазальтов и трахиандезитов, остатки которых обнаружены на западном склоне у кромки внешней кальдеры. Их возраст датирован 100–125 тыс. лет ВР. После небольшого перерыва начались извержение брекчий туфов и излияние игнимбритов в интервале 65–95 тыс лет назад. На западном склоне в это время формируется бокка, из которой изливаются трахитовые лавы. А завершается этот

Таблица 1. Петрохимический состав (мас. %), изотопные данные стронция и кислорода и абсолютный возраст представительных пород вулкана Пектусан

Этап	Цикл	Порода, фация	№ пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	П.п.п.	Сумма	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	δ ¹⁸ O	Возраст, млн. лет (K-Ar), тыс. лет (¹⁴ C)	
Посткальдерный	I	Пемза щелочного риолита	4	71.72	0.15	10.76	3.61	1.01	0.08	0.44	0.04	5.37	4.18	0.04	0.22	2.22	99.88		5.9	1903*	
		Черный трахит в пемзе комендита	26-1б	57.62	0.88	17.79	3.84	1.61	0.11	4.01	1.69	6.04	4.71	0.13	–	0.80	99.43	0.70516 ± ± 11	6.1	1903*	
		КПШ из трахита 26-1б	26-1б																	6.4	
		Брекчия, обломок пемзы, комендит	26-1а	70.24	0.31	9.86	4.59	0.12	0.09	0.64	0.39	5.20	4.61	0.03	–	3.50	99.58	0.70496 ± ± 13	5.9	1903*	
		КПШ из комендита 26-1а	26-1а																		
		Брекчия комендита	1д	70.70	0.21	12.31	1.75	2.27	0.06	0.27	0.04	4.93	4.41	0.05	0.10	2.58	99.68			6.6	1903*
		Игнимбрит	3-1	65.91	0.31	15.56	2.74	2.63	0.10	1.00	0.12	5.81	5.14	0.05	0.12	0.30	99.80			6.1	1702*
		Игнимбрит, покров	3а	65.73	0.45	14.40	3.19	2.76	0.09	0.55	0.47	6.70	5.18	0.15	0.10	0.48	100.25			4.5	1702*
IV		Шлаки, обломки; пеплы пантеллерита, комендита	1б	68.07	0.29	14.29	4.65	1.32	0.12	0.55	0.08	5.43	4.82	0.05	0.03	0.16	99.85		5.8	969 ± 20AD**	
		Слабоспекшийся игнимбрит пантеллерита	1г	68.05	0.27	14.06	5.00	0.36	0.11	0.66	0.03	5.70	4.75	0.05	–	0.20	99.89		5.0	969 ± 20AD**	
III	III	Тефра пантеллерита, пеплы																			4000BP (2130BP)**
		Игнимбрит, пеплы трахита	28/4б	66.41	0.28	11.23	5.68	0.17	0.13	0.65	0.30	6.51	4.71	0.03	–	3.50	99.59	0.70527 ± ± 22	6.2		
	II	Трахит, черная тефра, обломки в брекчии	1а	63.98	0.52	16.57	4.45	1.02	0.11	1.64	0.24	5.65	5.13	0.12	0.05	0.11	99.55		4.7	0.040 ± 0.03	
		Черная пемза трахита из брекчии	1и/ос	63.18	0.44	17.25	2.20	2.62	0.11	1.72	0.32	5.55	5.34	0.13	–	0.67	99.53	0.70547 ± ± 13	5.8	0.065 ± 0.015	
		КПШ из черной пемзы	1/м																	6.0	0.090 ± 0.015
		Трахит, бокка, покров	26/1б	64.97	0.49	14.20	3.20	2.88	0.19	1.53	0.21	5.61	5.56	0.09	–	0.50	99.44		5.4	0.065 ± 0.015	
Игнимбрит трахита, покров, сев. склон	29/3в	63.89	0.43	15.10	3.21	2.43	0.13	1.38	0.64	5.81	6.12	0.09	–	0.60	99.83		6.3	0.040–0.065 ± ± 0.03			
Трахит, покровы, брекчии	26/1б	66.85	0.46	15.10	2.96	2.60	0.14	1.17	0.08	5.37	4.58	0.06	0.16	0.29	99.82		7.1	0.095 ± 0.015			
I	I	Трахибазальт, трубка	28/1	54.86	2.10	16.78	2.91	5.51	0.10	6.38	3.37	3.82	2.83	0.05	–	0.61	99.49		5.1	0.100 ± 0.025	
		То же	28/2	55.04	1.70	15.92	3.43	4.40	0.13	5.69	3.76	4.29	3.41	0.42	–	1.40	99.59		6.3	0.125 ± 0.025	

Таблица 1. Окончание

Этап	Цикл	Порода, фация	№ пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	П.п.п.	Сумма	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	δ ¹⁸ O	Возраст, млн. лет (K–Ar), тыс. лет (¹⁴ C)
Формирование конуса вулкана	III	Трахиты, покров	20	64.72	0.44	16.60	3.47	1.24	0.09	1.66	0.35	5.31	5.35	0.08	0.18	0.11	99.60	0.704898 ± ± 17	5.1	0.135 ± 0.025
		Игнимбриты слабоспекшиеся	17б	66.18	0.31	14.77	4.04	1.77	0.12	0.49	0.35	6.04	4.90	–	0.14	0.43	99.97			
	II	Трубка щелочных базальтов с КПШ	28/19а	51.27	1.72	16.05	3.37	7.40	0.18	8.22	7.05	3.08	0.93	0.28	–	0.30	99.85	0.70472 ± ± 10	6.5	0.245 ± 0.03
		Трубка щелочных базальтов, сев. склон	28/20б	50.06	2.29	16.32	4.04	6.25	0.17	8.04	6.03	3.94	1.72	0.52	–	0.50	99.85	0.70491 ± ± 11	6.0	0.240 ± 0.03
		Трубка щелочных базальтов	21/1	50.83	2.92	16.96	2.65	7.22	0.13	8.29	4.86	3.27	2.34	0.58	–	–	100.05	0.70483 ± ± 13	6.0	0.245 ± 0.03
	I	Трахит, покров	7	67.63	0.37	14.61	4.83	0.23	0.09	0.33	0.08	6.55	5.22	0.12	0.07	0.15	100.28	0.70529 ± ± 22	5.5	0.33–0.28 (San)***
		То же	12	67.27	0.29	14.83	4.40	0.75	0.11	0.55	0.08	6.31	4.84	0.05	0.07	0.15	99.70			
		»	24/1	67.10	0.32	14.76	2.60	3.03	0.14	0.45	0.22	5.92	4.95	0.04	0.05	0.22	99.68	0.70855 ± ± 15	5.5	
		»	18	66.74	0.34	14.01	4.07	1.83	0.14	0.77	0.08	6.10	4.60	0.09	0.14	0.62	99.53			0.545 ± 0.05
		»	30	67.24	0.39	13.81	4.40	2.77	0.08	0.52	0.24	5.65	4.51	0.05	–	0.38	100.07			
		Шлак и брекчии	9	64.80	0.36	17.36	2.92	1.70	0.09	1.02	0.24	5.66	5.28	0.09	0.08	0.04	99.64		5.6	
Щитовой вулкан	III	Трахит, покров	19/2	64.68	0.40	15.93	3.30	1.75	0.10	0.80	0.65	6.00	5.56	0.47	0.00	0.25	100.10	0.70527 ± ± 13	5.5	
		Трахит	14/1	64.72	0.44	16.60	3.47	1.24	0.09	1.66	0.36	5.31	5.35	0.08	0.18	0.11	99.60	0.70513 ± ± 15	6.4	1.00 ± 0.05
		Трахиандезит, покров	15/1	59.44	0.97	17.63	6.05	1.20	0.15	0.21	1.07	6.19	4.61	0.50	–	0.13	100.18	0.70773 ± ± 15	7.6	1.08 ± 0.05
	II	Субщелочной базальт, покров	32	51.91	1.79	14.25	3.64	7.70	0.13	7.81	7.27	3.33	0.93	0.26	0.25	0.87	99.85	0.70455 ± ± 15	6.3	1.01 ± 0.2
		То же	23/1	51.67	1.64	14.36	4.18	7.95	0.16	7.32	7.78	3.00	0.75	0.21	0.12	0.45	99.67		6.1	1.20 ± 0.25
		»	23/2	53.46	1.69	14.97	1.67	8.29	0.17	7.72	7.21	2.91	0.85	0.25	0.58	–	99.77	0.70452 ± ± 22	6.3	
	I	Fe–Ti-щелочной базальт	26/14а	50.24	2.53	15.93	3.09	6.67	0.15	7.76	3.80	4.50	2.57	0.59	–	1.90		0.70527 ± ± 15	6.2	1.41 ± 0.05
		То же	27/7	46.74	2.69	16.27	10.51	3.43	0.17	6.08	5.20	4.02	2.96	0.65	–	1.20	99.87		6.1	
		»	27/10	48.56	2.70	15.81	10.28	3.31	0.17	7.06	4.43	3.57	2.20	0.75	–	0.70	99.54	0.70456 ± ± 23	6.3	1.43 ± 0.05
		Ti–Fe-щелочной базальт	26/14б	46.62	4.45	13.09	13.56	4.05	0.18	7.21	5.40	2.75	1.83	0.63	0.14	0.49	100.05	0.70523 ± ± 13	6.6	1.70 ± 0.05

Примечание. Одна звездочка – исторические данные; две – определение возраста (¹⁴C) по (Horn and Schmicke, 2000; Wei et al., 2003; Чичагов и др., 1989); три – определение возраста (K–Ar) по санидину (геология Кореи, 1993). Химические анализы и изотопия кислорода выполнены в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (аналитики – Л.И. Алексеева, Л.В. Недашковская, Т.А. Веливецкая); изотопия стронция определены в Институте геохимии СО РАН, г. Иркутск (аналитик – Г.П. Сандмирова); абсолютные возрасты пород (K–Ar) – в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН (аналитики – В.А. Лебедев, М.М. Аракелянц).

Таблица 2. Результаты К–Аг-изотопного датирования лав вулкана Пектусан

№ обр.	Порода, минерал	Калий, ‰ ± σ	⁴⁰ Аг _{рад} (нг/г) ± σ	⁴⁰ Аг _{возд} , % в образце	Возраст, млн. лет ± 2σ	Примечание
Посткальдерные извержения						
29/1a	Обломки пемзы, комендит	4.60	–	–	–	1903*, исторические данные
3-1	Игнимбрит трахитового состава, потоки	5.14	–	–	–	1702*, исторические данные
Формирование конуса стратовулкана и кальдеры						
16	Пантеллерит, комендит, шлаки	4.82 ± 0.05	–	–	–	969 ± 20 AD**, 2130 BP**, ***
1a	Пемза трахита из брекчии	5.13	0.015 ± 0.012	99.8	0.40 ± 0.03	Вершина кальдеры, сев. склон
1и/ос	Пемза, стекло	4.44 ± 0.06	0.012 ± 0.010	99.9	0.040 ± 0.03	Черная пемза трахита
1и/м	КПШ из пемзы	5.94 ± 0.06	0.038 ± 0.004	93.4	0.090 ± 0.02	Крупный кристалл из черной пемзы трахита
26/16	Трахит, поток	4.50 ± 0.05	0.0198 ± 0.0024	88.8	0.065 ± 0.015	Зап. склон, подножье, бокка
26/126	То же	4.41 ± 0.05	0.0291 ± 0.0020	69.1	0.095 ± 0.015	Зап. склон, край кальдеры
28/1	Трахибазальт	2.61 ± 0.03	0.0181 ± 0.0021	87.7	0.100 ± 0.025	Трубка, зап. склон
28/2	То же	2.94 ± 0.03	0.0253 ± 0.0021	89.6	0.125 ± 0.025	Обломок в брекчии трахи- та (1a)
20	Игнимбрит трахита	4.28 ± 0.05	0.041 ± 0.004	94.9	0.135 ± 0.025	Поток, подножье сев. склона
21/1a	Щелочной базальт (трубка)	1.87 ± 0.02	0.031 ± 0.002	88.9	0.240 ± 0.03	Трубка, стекло, сев. склон
28/206	То же	1.72 ± 0.03	0.035 ± 0.003	87.4	0.245 ± 0.03	Трубка, сев. склон
28/196	Трахит	4.31 ± 0.03	0.0732 ± 0.0020	73.0	0.245 ± 0.015	Покров, сев. склон
30	То же	4.04 ± 0.05	0.152 ± 0.006	93.5	0.545 ± 0.050	То же
Щитовой вулкан						
14/1	Трахит	5.35 ± 0.04	0.265 ± 0.005	58.2	1.00 ± 0.05	Покров, сев. склон
15/1	Трахиандезит	3.65 ± 0.04	0.275 ± 0.005	59.1	1.08 ± 0.05	То же
32	Субщелочной базальт	0.59 ± 0.015	0.042 ± 0.004	89.4	1.0 ± 0.2	Поток, сев. склон
23/2	То же	0.60 ± 0.015	0.049 ± 0.005	86.3	1.20 ± 0.25	То же
27/7	Fe–Ti- щелочной базальт	2.07 ± 0.03	0.203 ± 0.003	82.7	1.41 ± 0.05	Покров, низы
27/10	То же	2.07 ± 0.03	0.205 ± 0.002	74.0	1.43 ± 0.05	То же
27/146	Ti–Fe-щелочной базальт	1.84 ± 0.02	0.217 ± 0.002	78.9	1.70 ± 0.05	Обломок в брекчии трахита

* Данные на основе исторических документов по (Wei et al., 2003).

** Данные определения по ¹⁴C (Horn and Schmincke, 2000).

*** Отсутствуют данные определения К–Аг- и радиоуглеродными методами.

цикл извержением черной пемзы трахитов (40 тыс лет) с большими кристаллами калиевого полевого шпата. Возраст калиевого полевого шпата в трахите более древний – 90 тыс. лет.

Это извержение было очень интенсивным. Мощные толщи брекчий, агломератов с облом-

ками пемз, трахитов, базальтов фундамента обнажаются в привершинной части внешней кальдеры. Наиболее мощные отложения встречаются на восточном и северном склонах вулкана. Предполагается, что этот взрыв был катастрофическим, в результате которого была образована внешняя кальдера. Фрагменты кальдеры

Таблица 3. Периодичность извержений и этапы формирования стратовулкана Пектусан

Этап	Циклы	Возраст, млн. и тыс. лет	Тип извержения, порода	Характер, мощность, площадь (км ²)	Источник	
Посткальдерный	I	1903 AD	Комендитовая и трахитовая пирокластика	~5 м, юж. и вост. склоны вулкана	Wei et al., 2003; исторические данные	
		1898 AD	Слабое фриато-магматическое извержение в кратерном озере	Площадь 10 тыс. км ² , склоны вулкана	Геология Кореи, 1993; Чичагов и др., 1989; Liu, 1983, 1987; Macida et al., 1990; исторические данные	
		1702 AD	Эксплозивное извержение. Черная тефра трахитов. Покровы игнимбри-тов на склонах вулкана, в кальдере			
		1688 AD	Комендитовая и трахитовая пирокластика	~5 м	Wei et al., 2003	
Кальдерный	IV	964 ± 20 AD	Мощные направленные взрывы на восток, покровы игнимбри-тов, пемзы, тефра. Пемзы и пеплы комендитов	Объем тефры ~100 км ³ , площадь – 1.5 млн. км ² . (¹⁴ C)	Horn, Schmincke, 2000; Wei et al., 2003	
	III	1000 BC	Игнимбри-ты, потоки	Мощность ~30 м, склоны вулкана. (¹⁴ C) Найдены в Японии (¹⁴ C)	Wei et al., 2003	
		2040 ± 70 BP 2130 ± 80 BP 4105 ± 9 BP 5000–4000 BP	Пеплы Игнимбри-ты, перекрывающие древнюю почву, пеплы		Wei et al., 2003	
	II	0.04 ¹ ; 0.09 ^{2*}	Эксплозии черной тефры и шлаков комендита и трахита	Н е т д а н н ы х		
	I	0.065–0.095*	Извержения щелочных риолитов, трахидацитов, черных обсидианов. Покровы тонкой тефры и экструзии на склонах вулкана, трахиты (потоки)	Сев. и зап. кромки кратера. Мощность 190–214 м. Вост. склон, пик Чангун	Macida et al., 1990; Wei et al., 2003; Геология Кореи, 1993; и др.	
0.100–0.125*		Обломки щелочных базальтов и трахитов в шлаках; трубки трахи-базальтов, трахиандезитов	Обломки размером 10–30 см в шлаках с возрастом 0.04–0.09; зап. склон			
Формирование конуса вулкана	III	0.135*	Трахиты, покровы игнимбри-тов	Склоны вулкана		
	II	0.240–0.245*	Трубки щелочных базальтов	Диаметром 100–200 м		
	I	0.545*	Лавы и туфы трахитов, слагающих основание конуса и внутренних стенок кальдеры, шлаковая пемза	Мощность ~650–850 м, площадь 63.2 км ² . Потоки, эксплозии		
Формирование щитового вулкана	III	1.0–1.02* млн. лет	Трахиты, трахиандезиты, покровы	~10–20 м. Потоки		
	II	1.08–1.20*	Плотные афировые, пористые базальты, переслаивание потоков	Потоки. Мощность ~300 м		
	I	1.41–1.43* млн. лет	Шлаковые лавы щелочных базаль-тов, покровы	150 м	Геология Кореи, 1993; Liu, 1999	
		1.70*–2.2 млн. лет	Высокотитанистые и железистые щелочные базальты	~170 м		
	3.0–3.11 млн. лет	Лавы трахитов, основание вулкана. Субщелочные базальты	~400 м 400–500 м	Геология Кореи, 1993; и др.		
Плато		19.9–15.1 млн. лет	Умеренно-щелочные базальты сви-ты Пэкам	Покровы	Геология Кореи, 1993; и др.	

* Данные абсолютных возрастов (K–Ar) см. табл. 2. ¹Данные абсолютного возраста, стекло черной тефры. ² Данные абсолютного возраста по санидину (в черной тефре трахитов).

этого цикла дешифрируются на космических снимках.

Между II и III циклами кальдерного процесса отсутствуют данные определения возраста, поэтому игнимбриты и пеплы трахитов, перекрывающие пемзы и брекчии, выделены условно. Последующие циклы выделены на основании радиоуглеродных определений [8, 1, 5, 6, 9].

По данным [5] на протяжении 4000–2000 лет назад извержения были неоднократными. Среди них выделяется катастрофическое извержение 2130 г. до нашей эры. Пеплы этого извержения обнаружены в Японии и определены радиоуглеродным методом [8, 5].

Четвертый цикл ознаменовался катастрофическим извержением тефры тысячу лет назад (969 ± 20 AD), при котором было вынесено около 100 км^3 тефры пантеллерит-комендитового состава ($\sim 20 \text{ км}^3$ твердых пород). Взрыв был направленным на восток, и пеплы достигли северных островов Японии. Основная часть тефры выпала в Японское море [10], частично на юг Приморья России. Было выброшено $1796 \pm 453 \text{ Мт H}_2\text{O}$, $45 \pm 10 \text{ Мт}$ хлора, $42 \pm 11 \text{ Мт}$ фтора и $2 \pm 0.6 \text{ Мт}$ серы. Подсчеты были сделаны на основании изучения включений в минералах [8]. Этот взрыв образовал внутреннюю кальдеру, частично заполненную водами оз. Тянци. Кальдера имеет отвесные стенки, а глубина ее около 400 м. Предполагается, что это извержение имело глобальный эффект и считается одним из мощных за последние 2 тыс. лет.

Посткальдерный этап ознаменовался неоднократными эксплозивными выбросами комендитовых и трахитовых пеплов в историческое время (1688 и 1903 гг.), а в 1702 г. извержением черной тефры и игнимбритов трахитового состава [5, 2 и др.]. Потоки игнимбритов хорошо дешифрируются на склонах вулканов от кромки кальдеры до подножия. В 1898 г. наблюдалось слабое фриато-магматическое извержение из кратера озера (из воспоминаний русского писателя-путешественника Н.М. Гарин-Михайловского). Последнее извержение в 1903 г. представлено белыми и розовыми пемзами и пеплами комендитового и риолитового составов, в которых наблюдаются фьямеподобные обособления черных трахитовых и трахиандезитовых пород (табл. 1). Отложения белой пирокластической породы распространены на южных и восточных склонах вулкана и отчетливо дешифрируются на космических снимках.

После извержения 1903 г. вулкан Пектусан находится в состоянии спокойствия. Известны горячие источники вдоль края внутренней кальдеры и на северном склоне, в рифтовой долине. Температура источника на северном склоне бо-

лее 80°C . Отмечается, что температура за последние десятилетия поднялась на несколько градусов.

В заключение следует остановиться на вопросах генезиса трахит-комендитовых пород, слагающих конус вулкана, и эволюции расплавов. В кратком обзоре извержений на основе геохронологических, петрохимических и изотопных данных пород можно сделать вывод, что генезис трахитовых магм связан с дифференциацией щелочно-базальтовых расплавов щитового вулкана. Объем извергнутых трахитовых расплавов по отношению к основным составляет около 3%. Анализ изотопных данных по стронцию и кислороду в базальтах и трахитах показывает, что они имеют близкие величины и это позволяет предполагать, что основным механизмом была дифференциация. Камерная дифференциация трахитового расплава привела к появлению комендитовой и пантеллеритовой пирокластической, которая появляется, как правило, в конце кальдерного процесса.

Дифференциация трахитового расплава в промежуточном очаге приводит к появлению более кремне-щелочно-салических расплавов с высокой концентрацией летучих (особенно хлора, фтора и воды).

Причиной извержений, возможно, являются внедрения высокотемпературных базальтовых расплавов в промежуточные очаги, что нарушает равновесное состояние и провоцирует эксплозивные взрывы. Это предположение подтверждается изотопным датированием внедрения базальтов перед сильными эксплозиями. Таким образом, внедрения базальтов играют роль “спускового крючка”. Этот механизм предложен П.Френсисом и С.Сельфом после изучения катастрофического взрыва вулкана Кракатау в 1883 г. [11, 12].

Из данных анализа по хронологии извержений (табл. 1, 2, 3) можно сделать вывод, что частота катастрофических взрывов увеличивается с позднего плейстоцена, промежутки спокойствия сокращаются, а периодичность таких эксплозий имеет определенную закономерность, они происходят за последние 5000–4000 лет примерно через каждую тысячу лет.

Для решения этого важного вопроса необходимы более детальные исследования строения вулкана, получения данных по определению абсолютных возрастов пирокластических образований и эволюции флюидного режима, особенно за последний этап деятельности вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке фундаментальных исследований по программам № 13 и 16 Президиума РАН (ДВО–РФФИ, проект 06–05–9611; ДВО – проект 06–1–П16–065; Д–9–26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.К., Сахно В.Г., Кузьмин Я.В. и др. // ДАН. 2005. Т. 403. № 2. С. 242–247.
2. Чичагов В.П., Рим Квон Мук, Черкинский А.Е. и др. // ДАН. 1989. Т. 306. № 1. С. 169–172.
3. Геология Кореи / Под ред. Пэк Рен Чжун, Кан Хен Габ, Ким Чу Рер. Пхеньян: Изд-во книг на иностранных языках, 1993. 663 с.
4. Денисов Е.П., Тен Ха Чер. Вопросы геоморфологии и морфотектоники Южной части Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточ. кн. изд-во, 1966. С. 3–7.
5. Wei H., Sparks R.S. J., Liu R. et al. // J. Asian Earth Sci. 2003. V. 21. P. 515–526.
6. Macida H., Moriwaki H., Zhao D. // Geogr. Repts Tokyo Metropol. Univ. 1990. V. 25. P. 1–20.
7. Чернышев И.В., Лебедев В.А., Бубнов С.Н. и др. // Геохимия. 2002. № 11. С. 1–16.
8. Horn S., Schmincke // Bull. Volcanol. 2000. V. 61. P. 537–555.
9. Liu J. Volcanoes China // Sci. Publ. 1999. P. 219 (In China).
10. Razjigaeva N.G. // Volcanol. Sci. 1990. V. 10. P. 659–664.
11. Френсис П., Селф С. // В мире науки. 1984. № 1. С. 68–79.
12. Rampino M.R., Self S. // Quatern. Res. 1983. V. 18. P. 127–143.