

УДК 55:551.21

## РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ (КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ)

© 2002 г. А. П. Хренов, Т. М. Маханова, О. А. Богатиков, А. Н. Платэ

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, 109017*

Поступила в редакцию 26.12.2001 г.

Результатом многолетних полевых и аэрокосмических исследований вулканов Камчатки, в рамках Международного российско-американского проекта “Науки о Земле” с привлечением данных ИСЗ были получены и обработаны материалы дистанционного зондирования, главным образом, для вулканов Ключевской группы, как самой активной и продуктивной на Камчатке. Впервые была создана цифровая карта масштаба 1:100000 для вулканов Ключевской группы. На нее в системе координат нанесены все шлаковые конусы, при этом выделены: шлаковые конусы региональной зоны ареального вулканизма и эруптивные центры побочных извержений Ключевского вулкана с указанием их петрохимических характеристик и возрастов.

### ВВЕДЕНИЕ

Прошедшие за последнее десятилетие природные катастрофы резко стимулировали международное сообщество к объединению научного потенциала и материальных средств для организации слежения и контроля за быстро текущими процессами на Земле.

С 1990 года под эгидой ООН проходило Международное десятилетие борьбы с риском природных катастроф с основным упором на минимизацию локальных, региональных и глобальных последствий вулканических извержений.

Пароксизмальные извержения в умеренных и высоких северных широтах, такие как извержения вулканов Ксудач в 1907 г., Катмай в 1912 г., Безымянный в 1956 г., Шивелуч в 1964 г., Сент-Хеленс в 1980 г., Ключевской в октябре 1994 г., будут происходить снова, и наше понимание их механизма может быть существенно улучшено за счет комплексного подхода к методам и результатам аэрокосмического мониторинга.

Организация и создание системы эффективно-го мониторинга за действующими вулканами, с целью оценки масштаба и прогноза развития дальнейших событий, а также составление детальных геоморфологических, структурных, петрохимических и карт “погребенных структур”, – основная и главная задача проводимых исследований. На этом пути пока больше вопросов, чем ответов, но с полной уверенностью можно говорить, что будущее в изучении природных ресурсов Земли за аэрокосмическими методами, их компьютерной обработкой и анализом.

**Постановка задачи исследований.** Дистанционное зондирование Земли, как комплексное на-

правление исследований в науке и практике, стало быстро развиваться в нашей стране в течение последних 30 лет. Основанное на более чем полувековом опыте аэрофотосъемки, оно успешно применялось при решении многих задач природопользования, планирования и решения проблем промышленности, анализе последствий природных катастроф и деятельности человека.

Принципиально новые возможности дистанционные методы получили с развитием лидаров, многозональных инфракрасных сканеров, радиолокационных съемок, не только расширивших сферы применения этих методов, но и позволивших проводить исследования в любое время суток и при любой погоде [8, 9, 16, 19]. Дистанционные аэрокосмические методы изучения вулканов, несомненно, будут играть существенную роль в ближайшие годы [6, 19].

Современные возможности новых методов определяются в первую очередь, техническим совершенством съемочной и приемной аппаратуры, особенно той, которая устанавливается на борту спутника или самолета.

Также существуют проблемы собственных спектральных характеристик исследуемых объектов, прежде всего – отражение, поглощение и вторичное тепловое излучение потока энергии поверхности объектов. Результативность систем дистанционного зондирования при проведении специальных вулканологических работ только тогда будет высокой, когда будут накоплены следующие данные: специфичные спектральные характеристики эффузивных пород, количественные различия их спектральных яркостей и классификация по типам вулканогенных пород, на основе чего возможно тестирование и расшиф-

ровка получаемых данных космических съемок. Этим задачам и посвящена данная статья.

**Аэрокосмические и петрохимические исследования.** Исследования со спутников позволяют в полном объеме обеспечить постоянное наблюдение за изменением морфологии кратеров вулканов, следить за изменениями теплового потока на них и осуществлять оперативную передачу информации в обрабатывающие Центры и тем самым обеспечивая выявление критериев предвестников извержений в реальном времени. С появлением многоцелевых искусственных спутников Земли (ИСЗ), а также открытостью и доступностью многих уникальных материалов космических съемок, получаемых как с отечественных, так и зарубежных орбитальных станций, значительно расширился диапазон их применения. Явное преимущество таких исследований перед традиционными методами в геологии – это возможность непрерывных наблюдений, в малодоступных и малонаселенных районах [3–6, 14, 16, 19].

На радиолокационном снимке (рис. 1), выполненном в L-диапазоне, отчетливо выделяются региональные зоны ареального вулканизма. Основное достоинство таких изображений, кроме их структурной информативности, то, что они могут быть получены независимо от метеоусловий. А применение Радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО) с длиной волны свыше 1 м позволяет в аридных зонах проникать в земную поверхность на десятки метров и картировать “погребенные структуры”, например, морфологию склонов вулканов, скрытую толщами льда.

В 1982 г. в США был создан авиационный тепловой инфракрасный мультиспектральный сканер (TIMS), представляющий собой сканирующий радиометр, работающий в диапазоне от 8.0 до 12 мкм. Он оснащен шестью спектральными каналами для решения задач исследования природных ресурсов Земли и, в частности, успешно применяется в вулканологии [19, 20, 22, 28].

С 2000 года, по программе ASTER на орбиту выведена платформа TERRA с установленными на ней приборами дистанционного зондирования, в том числе – MODIS. Он оснащен тридцатью шестью спектральными каналами для решения задач исследования природных ресурсов Земли и в том числе, для мониторинга вулканов. Использование материалов этого прибора позволяет дешифровать не только геолого-геоморфологические и структурные особенности лавовых потоков (типа “пахое-хое”, “канатные”, “подушечные” или “аа” лавы), но и лавы, имеющие различные петрографические характеристики, разную степень кристалличности и другие физико-химические свойства. Предполагается, что идентификацию горных пород по их минеральному составу

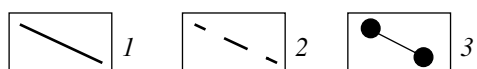
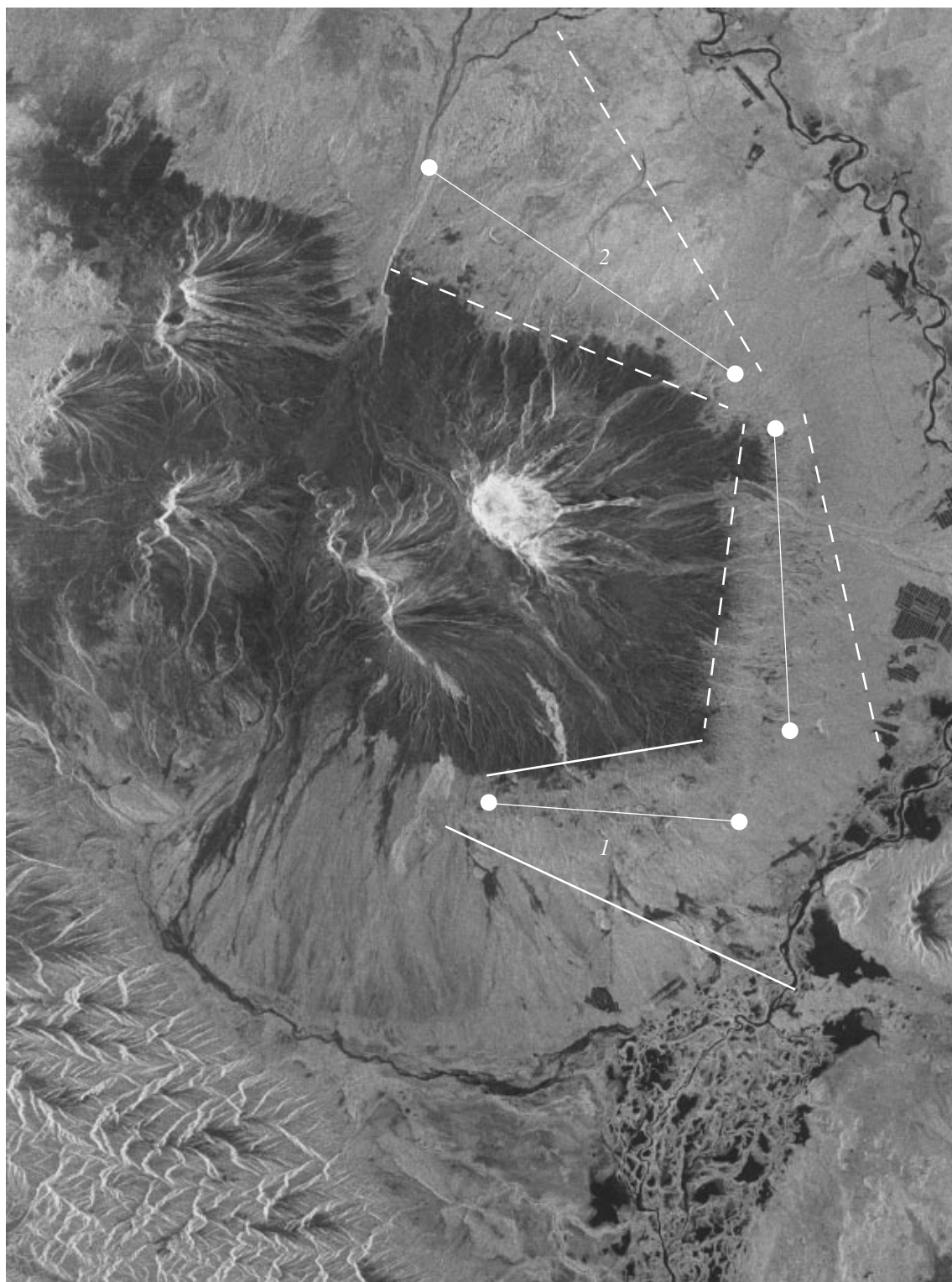
лучше всего можно получить, используя спектрометр, работающий в диапазоне от 2.0 до 2.5 мкм.

Наряду с этим, в ближайшем будущем мы будем иметь возможность использовать имеющиеся в США материалы дистанционного зондирования (например, AVHRR, GOES, Landsat и ASTER/MODIS), с целью создания всеобъемлющих ретроспективных и текущих баз данных, совместимых с вулканологическими измерениями. Предлагаемая нами совместная систематическая оценка объемов вулканического пепла и аэрозолей позволит нам создать базу данных о поступлении вулканогенных продуктов в атмосферу умеренных и высоких широт. Такая база данных позволит лучше охарактеризовать роль и масштаб вулканического воздействия на климат и погоду, на сокращение стратосферного озона в северном полушарии, а также будет способствовать выявлению траекторий движения вулканических облаков, что важно для безопасности полетов.

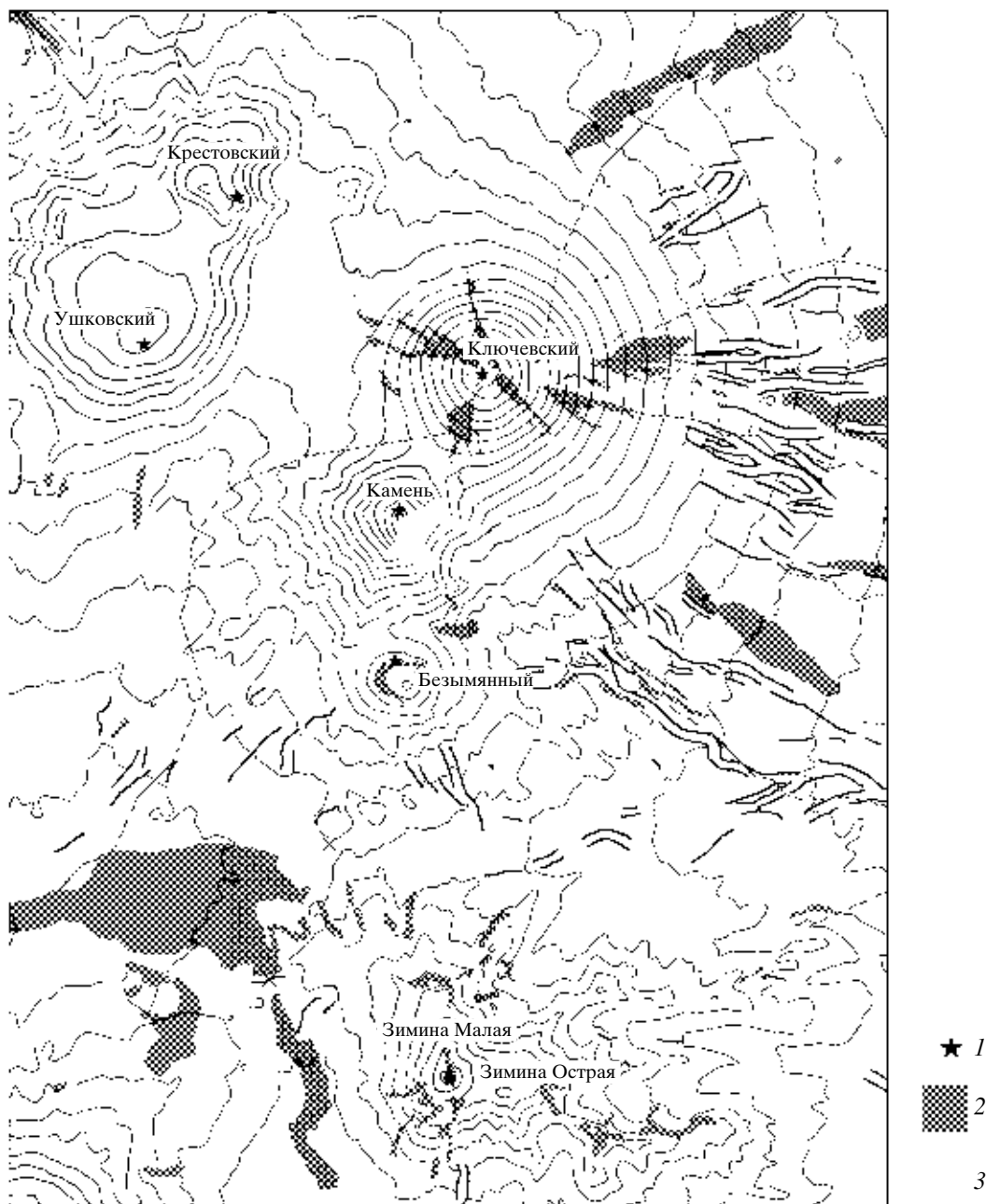
Проводимые в течение многих лет режимные, аэрофотосъемочные работы на вулканах Камчатки и Курил В.Н. Двигало и В.А. Дрозниным (Ин-т вулканологии ДВО РАН) позволили им выявить некоторые критерии оценки предвестников извержений для таких разных вулканов, как Ключевской, Безымянный, Шивелуч и Карымский [3–6, 14]. Наиболее эффективным результатом мониторинга за изменением состояния морфологии кратеров и экструзивных куполов активных вулканов Камчатки является фотограмметрическая обработка, выполняемая В.Н. Двигало [4–6].

В 1993–1996 гг. ИГЕМ РАН, в рамках международного российско-американского проекта “Науки о Земле”, проводил совместные аэрокосмические исследования на вулканах Камчатки. В них принимали участие самолеты Ан-30, Ан-24, Ту-154, Ил-24Н и Лиерджет-23 (НАСА). Итогом этих работ явилась комплексная аэросъемка: в видимом, спектрально-инфракрасном, ИК и радиодиапазонах длин волн. По материалам проведенных исследований, одновременно с привлечением данных ИСЗ, были получены и обработаны результаты дистанционного зондирования, пока главным образом, для вулканов Ключевской группы вулканов, как самой активной и продуктивной на Камчатке [2, 7, 10, 11, 13, 16–18]. На эту группу вулканов была создана цифровая карта масштаба 1 : 100 000 (рис. 2).

Для исследования информативности материалов радиолокационных съемок проводилось структурно-геологическое дешифрирование различных видов данных SIR-C, полученных с Shuttle в апреле и октябре 1994 г. и РЛС БО “Нить С1” – результат проведенных аэросъемочных работ в июне 1996 г. с использованием самолета-лаборатории Ил-24Н. Для предварительного визуального анализа был выбран восточный склон Ключевского вулкана



**Рис. 1.** Радиолокационное изображение Ключевской группы вулканов (РЛИ SIR-C, L-диапазон) от 5.10.1994 г.: 1 – региональная зона ареального вулканизма Ключевского вулкана; 2 – региональная зона ареального вулканизма Крестовского вулкана; 3 – осевые зоны.



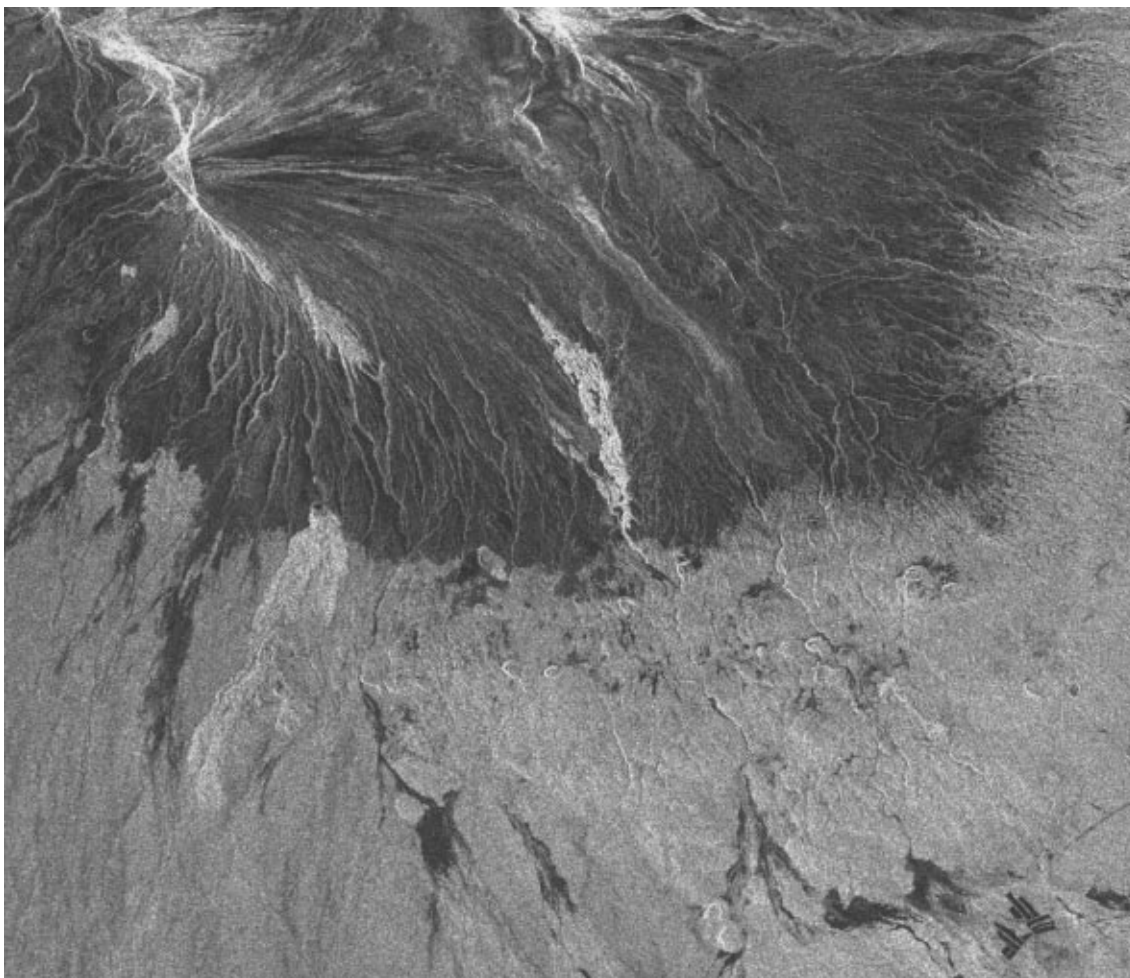
**Рис. 2.** Цифровая карта Ключевской группы вулканов (м-б 1 : 100000): 1 – вулканы; 2 – лавовые потоки современных извержений; 3 – ледники.

(рис. 3), где произошло большинство исторических извержений 1932–1990 гг. (табл. 1) и сосредоточено более 60 шлаковых конусов. На его восточный склон была построена детальная цифровая карта с нанесением на нее всех шлаковых конусов и лавовых потоков (рис. 4).

Традиционные геологические методы петрографии, геохимии, тефрохронологии и другие не позволили провести корректную классификацию шлаковых конусов, расположенных на склонах вулкана, что приводило в заблуждение некото-

рых исследователей относительно генетической природы магм Ключевского вулкана [2, 7, 11–13, 18, 19, 23]. По нашему мнению, нам удалось преодолеть это заблуждение, опираясь на современные методы математической обработки материалов дистанционного зондирования, в частности, с помощью компьютерного линеamentного анализа [19, 29].

Изменение параметров съемки оказывает существенное влияние на степень дешифрирования различных лавовых образований. Значительную



**Рис. 3.** РЛИ SIR-C восточного склона Ключевского вулкана (L-диапазона, 23 см), виток 88–20 от 5.10.1994 г., угол визирования 27.4°.

роль играет соотношение направления визирования и экспозиции склона. На рис. 5 представлены 3 фрагмента съемок SIR-C, полученных при разных направлениях и углах визирования. Хуже всего дешифрируются лавовые потоки, расположенные на “освещенных” склонах вулкана, обращенных к источнику излучения. Гораздо лучше выделяются потоки в случаях, когда направление визирования ориентировано “по касательной” к склону, а также потоки, расположенные на “теневом” склоне. Так, на рис. 5,а хорошо выделяются поток 1932 г. (группы Туйла) и неплохо – поток 1938 г. (Билюкая). Практически не видны потоки 1946 г. и 1956 г.; а на рис. 5,б, наоборот, поток 1932 г. виден несколько хуже, зато лучше дешифрируются поток 1938 г.

Характерный пример – лавовые потоки 1953 (6) и 1966 (8) гг. На изображениях с вертикальной поляризацией (ВВ) эти потоки практически не видны (рис. 5,а). На изображении ГГ заметен только общий контур обоих потоков, но между со-

бой они не разделяются (рис. 5,б). При кросс-поляризации (ГВ) светло-серый контур потока 6 четко отделяется от более темного потока 8 (рис. 5,в). Такой же сильный отраженный сигнал на изображении ГВ характерен для лавовых потоков 1938 (2), 1946 (4), 1956 (7), 1983 (11) и 1988 (15) гг. Однако поток 1932 г. (1) лучше виден на изображениях ВВ (рис. 5,а), а на ГГ и ГВ дешифрируется менее четко.

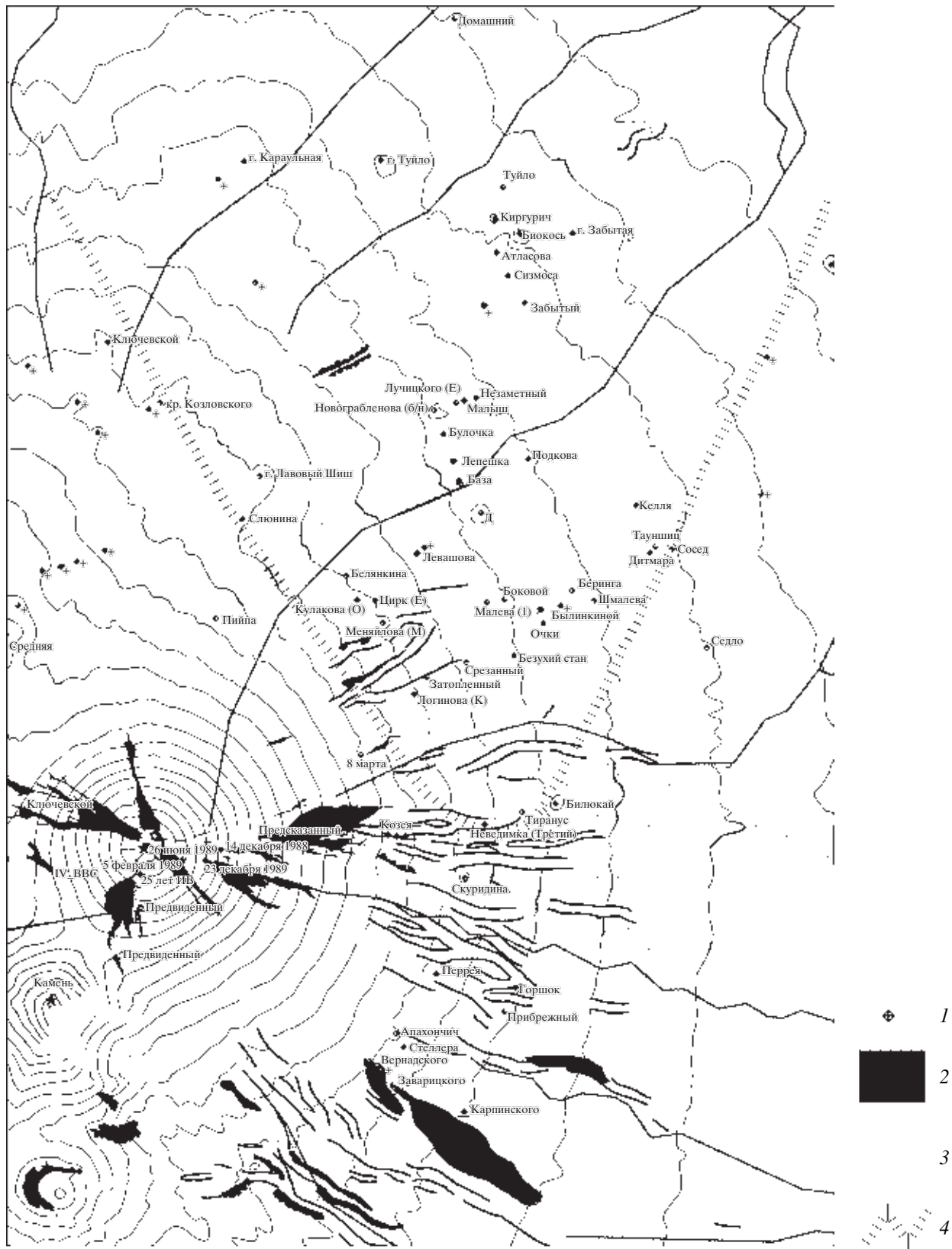
Большой практический интерес представляют изображения съемок с перекрестной поляризацией (рис. 5,в). На таком изображении хорошо дифференцирована прикратерная часть вулкана (темный тон) от нижней части восточного склона (светло-серый тон). По-видимому, это связано с растительностью на склоне, и граница сильного и слабого отраженного сигнала соответствует верхней границе кустарника.

На всех представленных фрагментах SIR-C (рис. 3, 5) в правой части выделяется (в основном, по текстурным признакам) зона развития более

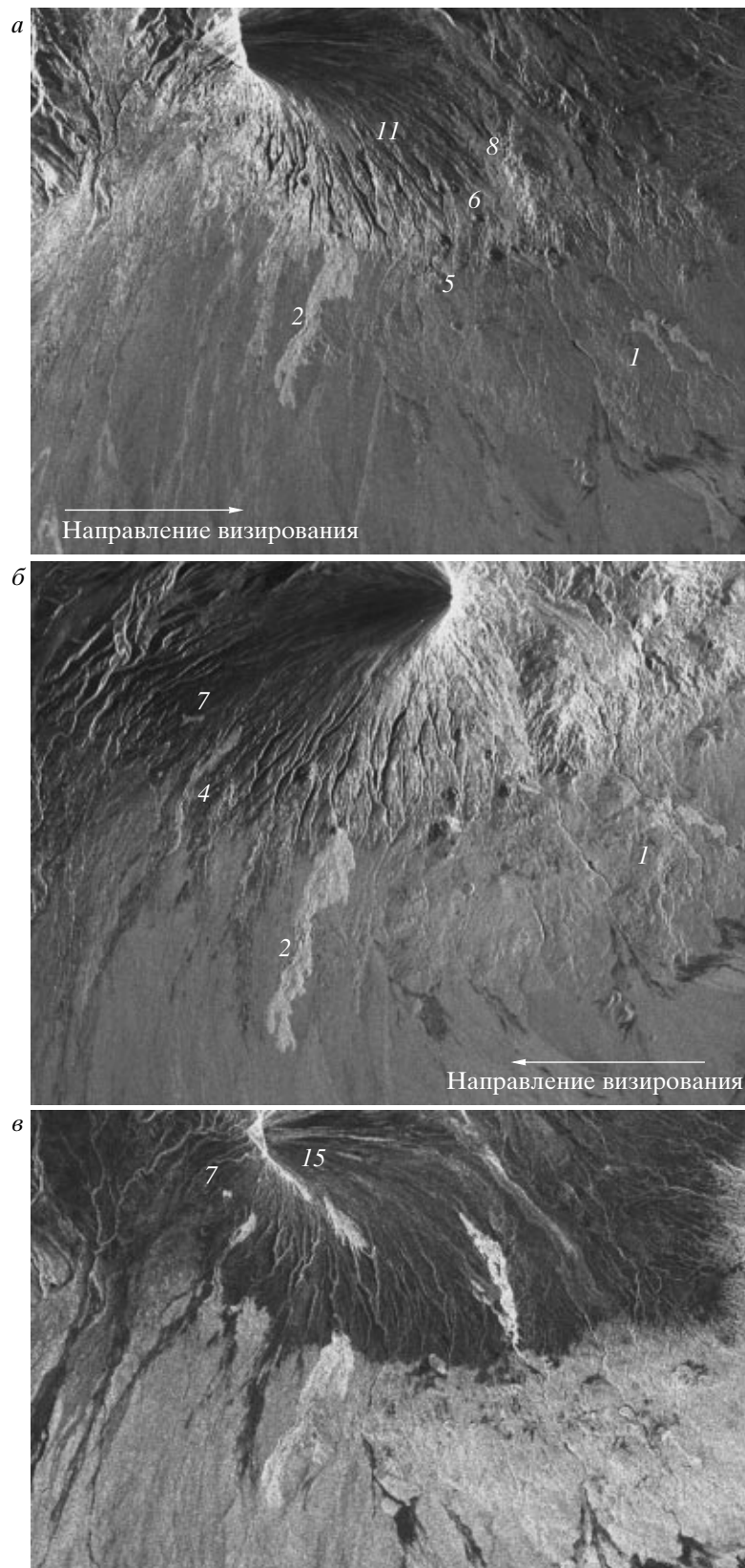
Таблица 1. Характеристика вершинных извержений и на склонах Ключевского вулкана (1932–1994 гг.)

№№ п.п.	Название извержения	Начало извержения, годы	Продолжительность извержений	Высоты эруптивных центров, м	Площадь лав. потока, км <sup>2</sup>	Мощность потока (средн.), м	Объем лавы, км <sup>3</sup>	Объем пепла, млн. м <sup>3</sup>	Весовой объем лавы, млн.т. = 2.5	Вес. объем пепла, млн.т. = 1.2	Индекс эксплозивности	Последовательность кристаллизации	Характер извержения	
Извержения на склоне Ключевского вулкана, в его региональной зоне ареального вулканизма														
1	Группа Туйлы Киргурич Туйла Биокось	25.01.1932 01.06.1932 10.1932	12 мес.	450–500	4.1	20–25	0.09	6	230	7.2	12	Ol + Px +Pl	Три самостоятельных эруптивных центра по дугообразной трещине	
2	Билюкай	7.02.1938	13 мес.	1000–1900	14.0	20–25	0.31	20	785	24.0	15	Ol+Px +Pl	С образованием взрывных воронок	
Побочные извержения														
3	Юбилейный	19.06.1945	19 дней	1100–1400	3.0	20	0.06	23	152	27.6	40	Pl + Ol + Px	Один эруптивный центр Два эруптивных центра Четыре эруптивных центра Два эруптивных центра С образованием взрывных воронок С образованием взрывных воронок Четыре эруптивных центра Один эруптивный центр Излияние лавового потока по трещине Два эруптивных центра Радиальные трещины Один эруптивный центр Один эруптивный центр	
4	Апахончич	23.10.1946	29 дней	1500	2.4	15	0.04	0.7	90	0.8	5	Pl + Ol + Px		
5	Былинкиной	20.11.1951	10 дней	950	0.5	30	0.01	2.5	35	3.0	15	Pl + Ol + Px		
6	Белянкин	07.06.1953	11 дней	1300–1400	1.1	10–15	0.01	1.0	35	1.2	2	Pl + Ol + Px		
7	Вернадского, Крыжановского	27.07.1956	5 дней	1360–1380	0.7	10–15	0.08	–	22	–	2	Pl + Ol + Px		
8	Пийпа	06.10.1966	3 мес.	1900–2100	4.7	20	0.09	10	235	12	30	Pl + Ol + Px		
9	4 ВВС	23.08.1974	3 мес.	3340–3600	1.1	20	0.02	–	58	–	2	Pl + Ol + Px		
10	8 Марта	06.03.1980	7 дней	1600–1800	0.2	2	0.0003	–	0.8	–	0	Pl + Ol + Px		
11	Предсказанный	08.03.1983	112 дней	2300–2900	3.3	25	0.05	–	185	–	0	Pl + Ol + Px		
12	Предвиденный	24.02.1987	10 дней	3900–2900	0.2	10	0.001	–	0.5	–	0	Pl + Ol + Px		
13	25 лет ИВ	29.01.1988	230 дней	3900–4100	4.0	30	0.06	–	300	–	0	Pl + Ol + Px		
14	14 декабря 1988 г.	14.12.1988	6 дней	3900–4250	0.2	5	0.0003	–	0.8	–	0	Pl + Ol + Px		
15	23 февраля 1988 г.	23.02.1988	25 дней	4200–4400	0.3	5	0.01	–	25	–	0	Pl + Ol + Px		
16	5 февраля 1989 г.	05.02.1989	21 день	4500	0.2	5	0.01	–	20	–	0	Pl + Ol + Px		
17	26 июля 1989 г.	26.08.1989	198 дней	4200	3.0	10	0.04	–	156	–	0	Pl + Ol + Px		
Вершинные извержения														
1	1945	01.01.1945	1 мес.	4750			0.1	500	250	36	80	Pl + Ol + Px		Параксизмальное
2	1978–1980		3 мес.	4750			0.03	4	125	–	2	Pl + Ol + Px	Излияние лавы по Козыревскому желобу	
3		06.04.1984	18 мес.	4709		30	0.1	2	250	–	2	Pl + Ol + Px	Формирование внутрикратерных шлаковых конусов, с излиянием лавовых потоков на склоны вулкана по Крестовскому, Козыревскому и Апахончивскому желобам.	
4		1985–1986	5 мес.	4766		30	0.05	3	250	–	2	Pl + Ol + Px		
5	Новый эруптивный цикл	1986–1987	5 мес.	4850		30	0.06	5	375	6	2	Pl + Ol + Px		
6		1988	4 мес.	4850		30	0.1	5	250	–	2	Pl + Ol + Px		
7		1989–1990	6 мес.	4750		30	0.05	5	260		2	Pl + Ol + Px	Разрушение островершинного кратера	
8	1994	01.10.1994	10 дней	4800			0.1				100	Pl + Ol + Px	Параксизмальное	

Примечание. Pl – плагиоклаз, Ol – оливин, Px – пироксен.



**Рис. 4.** Цифровая карта восточного склона Ключевского вулкана: 1 – шлаковые конусы на склоне вулкана; 2 – лавовые потоки после 1980 г.; 3 – лавовые потоки до 1980 г.; 4 – региональная зона ареального вулканизма Ключевского вулкана.



**Рис. 5.** РЛИ SIR-C восточного склона Ключевского вулкана (L-диапазона, 23 см): *а* – виток 120–20 от 7.10.1994 г., поляризация ВВ, угол визирования – 21.3°; *б* – виток 121–10 от 7.10.1994 г., поляризация ВВ, угол визирования – 28.5°; *в* – виток 88–20 от 5.10.1994 г. поляризация ГВ, угол визирования – 27.4°.



“древних” магнезиальных базальтов (4–2.5 тыс. лет назад) шлаковых конусов на склоне Ключевского вулкана. На изображении ГВ эта зона отличается еще и более ярким тоном. В центральной части изображения ГВ дешифрируются небольшие изометричные области более “молодых” лавовых потоков глиноземистых базальтов (1–0.3 тыс. лет назад).

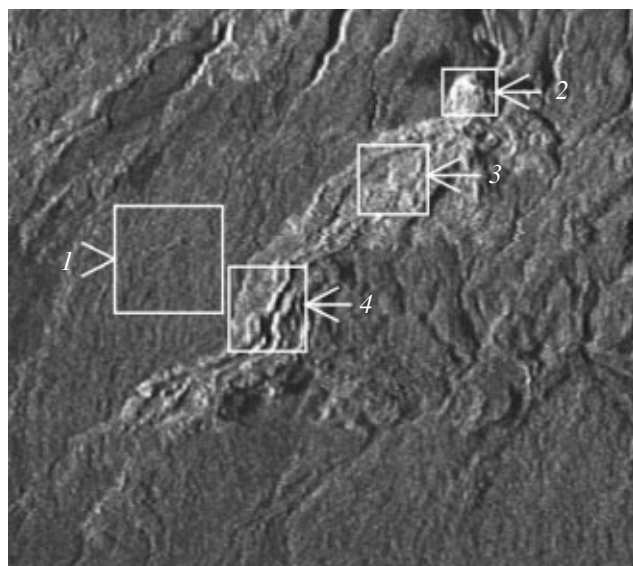
**Метод кросс-поляризации в L диапазоне (23 см) наиболее эффективен при выделении на радиолокационных изображениях лавовых потоков различного возраста.** В качестве более детального объекта анализа, по результатам аэросъемочных работ лета 1996 г. самолета-лаборатории Ил-24Н, был выбран один из самых больших лавовых потоков Билукая на восточном склоне Ключевского вулкана, с “контрастной” поверхностью (рис. 3) [11]. Полевыми исследованиями было установлено, что лавовый поток Билукая имеет неоднородную поверхность, впрочем, как и почти все глыбовые базальтовые лавовые потоки типа “аа”. У истока лавовый поток имеет шлаковую и мелкоглыбовую поверхность. По латерали поверхность лавового потока постепенно становится крупноглыбовой, а на фронте образует гигантские глыбы размерами до 5–7 м.

Протяженность видимого на радиолокационном изображении потока 11 км. Ширина в средней части – 2 км. Координаты начала потока  $56^{\circ}05'$  с.ш. и  $160^{\circ}47'$  в.д., конца потока  $56^{\circ}03'$  с.ш. и  $160^{\circ}57'$  в.д. Радиолокационное изображение участка лавового потока приведено на рис. 6.

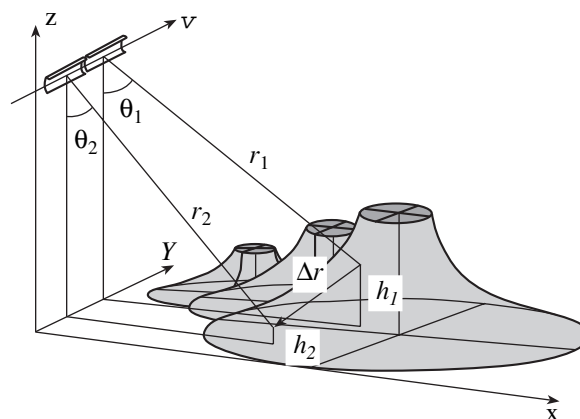
Уровень обратного рассеяния любого природного образования определяется, в основном, диэлектрической проницаемостью и проводимостью слагающих пород, углами облучения и спектральной плотностью шероховатости его поверхности. Рассмотрим с этой точки зрения фрагмент радиолокационного изображения лавового потока на склоне вулкана Ключевской. Ориентировочная схема взаимного расположения лавового потока и антенн съемочного радиолокационного комплекса изображена на рис. 7.

Из анализа радиолокационного изображения и параметров полета можно определить, что на лавовый поток зондирующие импульсы падают под углом  $\theta = 79.9^{\circ}$ , а весь поток находится в очень узком диапазоне углов облучения  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = 1.5^{\circ}$ .

Для подробного анализа данных радиолокационного наблюдения необходимо дополнительно иметь сведения о радиофизических свойствах слагающих поверхность вулкана пород и структуре их поверхности. Исходя из имеющихся ограниченных сведений, можно предположить, что контраст между фоновым участком на склоне вулкана и самим лавовым потоком вызван в меньшей степени отличием радиофизических свойств сла-



**Рис. 6.** Фрагмент лавового потока извержения 1938 г. по данным РЛС БО. Для анализа характеристик радиолокационного рассеяния выбраны фоновый (1) верхний (2), средний (3) и нижний (4) участки лавового потока.



**Рис. 7.** Схема расположения лавы и антенн.

гающих фон и поток пород и в большей степени увеличением спектральной плотности шероховатости поверхности лавового потока с характерными размерами  $\lambda/\cos\theta = 12.5$  см. Увеличение дисперсии рассеянных сигналов по течению потока связано, по-видимому, с увеличением размеров отдельных глыб на его поверхности, с “изрезанностью рельефа”, его контрастностью, что привело к появлению полностью затененных участков и участков с близким к “зеркальному” механизмом отражения зондирующих сигналов. Практическая реализация перечисленных потенциальных возможностей мониторинга требует проведения детальных исследований по следующим направлениям:

– отработка технологии построения цифровых многомерных моделей вулканов, отражающих их морфологическую и радиоаркостную структуру,

– разработка алгоритмов точной привязки и обнаружения изменений состояния вулканов по результатам дистанционного радиолокационного наблюдения,

– создание технологии выявления изменений во внутренней структуре вулканов по сопоставлению результатов съемок в микроволновом и длинноволновом радиодиапазонах,

– разработка принципов формирования базы знаний для автоматизированного распознавания и прогнозирования развития вулканического процесса по данным дистанционного зондирования с помощью экспертных систем.

Дистанционные методы (в обязательном комплексе с геолого-геофизическими) наиболее информативны при изучении структур земной коры. Выделяемые на аэрокосмических снимках линейные элементы обычно соответствуют либо непосредственно дизъюнктивным нарушениям, либо так называемым скрытым разломам. В любом случае дешифрируемые объекты прямо или косвенно отражают элементы тектонической структуры, поэтому линейный анализ материалов дистанционных съемок в сочетании с другими методами – один из основных способов выявления разрывных нарушений.

Широкое использование аэрокосмических изображений в геологии как источника сведений о линейных элементах (прямолинейных элементах ландшафта преимущественно тектонического происхождения) традиционно. Накоплен большой опыт визуального дешифрирования линейных элементов, разработаны многочисленные методики (к сожалению, часто весьма трудоемкие) статистического анализа линейных сетей. Большая роль в снижении трудоемкости работ, повышении их качества и объективности принадлежит автоматизированному линейному анализу.

С помощью программы автоматизированного линейного анализа “LESSA” был обработан фрагмент РЛИ SIR-C (виток 121-10), охватывающий район восточного склона Ключевского вулкана (рис. 1, 3). Анализ результатов автоматизированного анализа позволяет уточнить положение зон тектонических нарушений, выделить блоки с разным характером трещиноватости, что дает ценную дополнительную информацию для изучения районов современного вулканизма. На рис. 8 в изолиниях отчетливо видна клинообразная зона, которую следует считать региональной зоной ареального вулканизма на Ключевском вулкане и которая своим углом упирается в исток конуса Билюкая.

Из этого анализа следует, что в пределах постройки Ключевского вулкана существует субши-

ротная зона шлаковых конусов, которые можно рассматривать как зону ареального вулканизма, а ее активизация в историческое время проявилась в извержениях группы Туйлы (1932 г.) и Билюкая (1938 г.).

Фундаментальная сводка о деятельности и истории развития Ключевского вулкана была сделана Б.И. Пийпом в его монографии [13]. В ней же дано подробное описание извержения вулкана в 1944–1945 гг. Наиболее широкая комплексная программа исследований Ключевского вулкана осуществляется с начала 80-х годов, когда в Ин-те вулканологии ДВО РАН была создана комплексная геолого-геофизическая экспедиция (научный руководитель – академик С.А. Федотов). В задачи экспедиции (1984–1991 гг.) входило: проведение специальных вулканологических исследований, детальное петрохимическое опробование постройки вулкана, зон ареального вулканизма, всех шлаковых конусов и лавовых потоков на склоне вулкана (А.П. Хренов); тефрохронологические исследования (В.В. Пономарева); выполнение геофизических работ по изучению внутреннего строения вулкана (А.А. Каргопольцев); продолжение программы геодезических наблюдений (Н.А. Жаринов).

Изучение такого вулкана-гиганта как Ключевской сопряжено с рядом трудностей: работа на больших высотах, суровые климатические условия и частые извержения, которые приводили иногда к трагическим последствиям. При проведении исследований на вулкане погибли: в 1951 г. – вулканолог Алевтина Былинкина, в 1970 г. – гляциолог Андрей Иванов, в 1983 г. – геодезист Юрий Скуридин, в 1986 г. – телеметрист Игорь Логинов. После длительной работы в кратере Ключевского вулкана в 1987 г. из-за болезни сердца умер кинооператор Владимир Иванченко, постоянный участник многих вулканологических экспедиций на извержениях вулканов Камчатки и Курил.

Многие выдающиеся ученые-современники начинали свое восхождение к вершинам науки через восхождение на Ключевской вулкан. К ним относятся – первая женщина-вулканолог С.И. Набоко, а также В.И. Влодавец, А.А. Меняйлов, Е.К. Мархинин и др.

В пределах Ключевской группы вулканов существует, заложенная в голоцене долгоживущая региональная зона ареального вулканизма субмеридионального простираения. При образовании и формировании Ключевского вулкана его восточный склон частично перекрыл западную окраину ареальной зоны. Из-под аллювиальных и лавовых образований вулкана на его склоне сохранились не погребенные до конца шлаковые конусы (Подкова). Можно предполагать, что в это же время и на севере зоны произошло мощное изли-

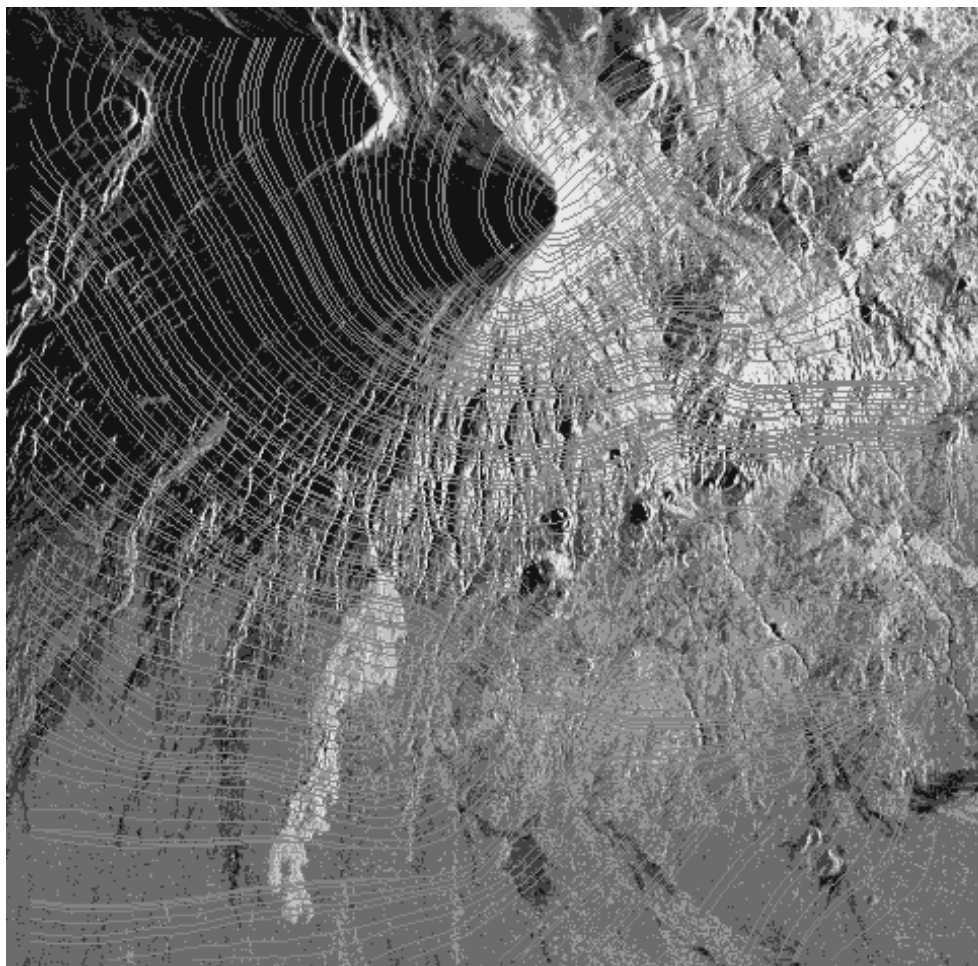


Рис. 8. Результаты автоматизированного линеаментного анализа РЛИ.

яние мегаплагиофировых андезитов Лавового Шиша. Извержения в ареальной зоне продолжают и теперь, и ее шлаковые конусы формируются или насаживаются на восточный и северо-восточный склоны вулкана, и зачастую идентифицируются, как его побочные образования.

В.В. Пономаревой определены возрастные интервалы формирования большинства шлаковых конусов, расположенных на его склонах. Наиболее древними, старше самого Ключевского вулкана, надо считать доледниковые конусы Подкова (14) и Холм (83). В скобках указаны номера конусов опубликованные в работе В.А. Ермакова [7].

Далее, 4.0–2.5 тыс. лет назад (л.н.) образовались конусы: Атласова (5), незаметный (8), Лучицкого (F, 9), Малыш (10), Новограбленова (11), Булочка (12), Лепешка (13), Келля (16), Дитмара (17), Малеева (J, 26), Боковой (27), Логинова (K, 30), Меняйлова (M, 31).

2.5–2.0 тыс. л.н. извергались: Д (15), Очки (23), Цирк (E, 32), Левашова (34), возможно – Сизмоса (6) и Забытый (7).

В интервале между 2.0–1.5 тыс. л.н. образуется всего два конуса: Стеллера (40) и Слюнина (67).

Наиболее “молодые” конусы: Кулакова (O, 33) и Скуридина (S, 37), образовались менее 500 лет назад.

Для Ключевского вулкана нами создана цифровая карта масштаба 1 : 100 000 (рис. 4), на которой выделены конусы побочных извержений и конусы региональной зоны ареального вулканизма, указаны их возраст и петрохимический состав, нанесены все исторические извержения и лавовые потоки, включая и потоки после 1980 г. (табл. 1).

Мы предлагаем несколько изменить нумерацию шлаковых конусов [7] с сохранением их прежних названий, опираясь на возраст и генетическую классификацию (табл. 2). Так, древние конусы теперь будут иметь первые номера, при этом, как правило, большинство из них относится к региональной зоне ареального вулканизма. Эти конусы имеют более магнезиальный состав базальтов, который варьирует от 12 до 7% MgO. По

Таблица 2. Шлаковые конусы на склоне Ключевского вулкана

№ по порядку	№ старый	Название	Год извержения	№ по порядку	№ старый	Название	Год извержения		
			До ледниковые				2.5–2.0 л.н.		
1	14	Подкова	4.0–2.5 л.н.	31	6	Сизмоса			
2	83	Холм		32	7	Забытый			
3	5	Атласова		33	15	Д			
4	8	Незаметный		34	23	Очки			
5	9F	Лучицкого		35	32 E	Цирк			
6	10	Малыш		36	34(4)	Левашова			
7	11	Новограбленова		37	40	Стеллера			
8	12	Булочка		38	67	Слюнина			
9	13	Лепешка						500 л.н.	
10	16	Келля		39	33	Кулакова		Исторические	
11	17	Дитмара		40	37(S)	Скуридина			
12	26 J	Малеева		41	2	Киргурич			1932
13	27	Боковой		42	1	Туйла			1932
14	30 K	Логина		43	3	Биокось			1932
15	31 M	Меняйлова		44	51	Козей			1938
		Возраст не определен	45	58	Тиранус	1938			
16	18	Тауншиц	46	59	Билюка	1938			
17	19	Сосед	47	50	Юбилейный	1945			
18	20	Академии Наук	48	60	Апахончич	1946			
19	25	Безухий стан	49	69	Былинкиной	1951			
20	28	Срезанный	50	70	Белянкина	1953			
21	29	Затопленный	51	68	Вернадского и Кржижановского	1956			
22	35	Седло	52	79	Пийпа	1966			
23	36	Лесной	53		4 ВВС	1974			
24	38	Перрея	54		8 Марта	1980			
25	39	Горшок	55		Предсказанный	1983			
26	41	Карпинского	56		Предвиденный	1987			
27	42	Пещерный	57		25 лет ИВ	1988			
28	43	Маленький	58		14 декабря	1988			
29	44	Прибрежный	59		23 декабря	1988			
30	61	Погребенный	60		5 февраля	1989			
			61		26 июля	1989			

химическому составу мы выделили высокомагнезиальные базальты с содержанием MgO от 12 до 8%, магнезиальные (промежуточные) с MgO от 8 до 6% и глиноземистые с MgO от 6 до 4.5%. Все эти разновидности базальтов хорошо изучены, а результаты петрографических, минералогических и геохимических исследований опубликованы в многочисленных работах [2, 7, 11–13, 16, 19, 21, 23, 24 и др.].

По петрохимическому составу продукты извержения и постройки вулкана, а также большинства его шлаковых конусов на склонах отвечают высокоглиноземистому базальту, хотя среди них и встречаются шлаковые конусы и лавовые потоки магнезиальных базальтов. Очень важен тот факт, что все эти конусы и лавовые потоки от начальных порций к конечным имеют постоянный (глиноземистый или магнезиальный) химический состав (табл. 3).

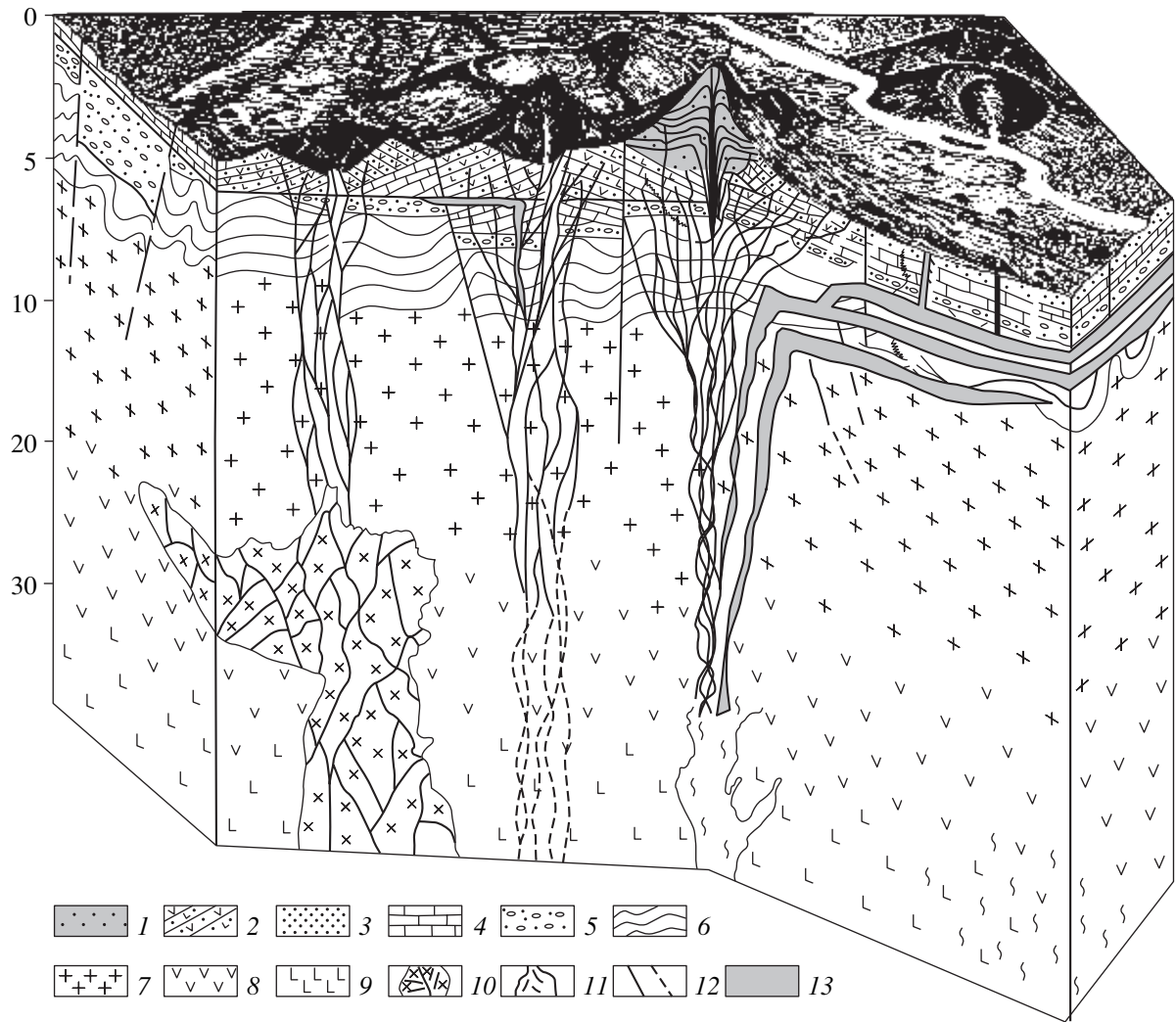
Таблица 3. Представительные химические анализы района Ключевского вулкана и его некоторых исторических извержений

№	Образец	Название извержения, год	Характеристика образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	12-5	конус Булочка	плотная разновидность лавы	52.28	0.91	13.35	3.52	5.53	0.15	12.21	9.16	2.28	0.72	0.16	0.06	0.15	100.48
2	12-12	конус Булочка	бомба	51.76	0.92	13.76	0.03	8.87	0.16	11.40	9.68	2.70	0.78	0.05	0.21	0.15	100.47
3	10-1	конус Малыш	плотная разновидность лавы	51.26	0.90	13.28	2.88	6.48	0.17	11.60	9.76	2.39	0.68	0.04	0.22	0.22	99.88
4	22-1	конус Шмалева	пористая порода с редкими вкрапленниками оливина	52.37	0.99	16.80	2.62	6.74	0.15	7.47	8.40	2.70	0.91	0.00	0.36	0.19	99.70
5	AB-86-1	конус Перевальный	бомба, шлак	52.40	0.96	16.17	1.65	7.15	0.12	7.20	8.96	3.49	0.98	0.20	0.18	0.29	99.75
6	67-33	конус Свюнина	фронт лавового потока	0.84	14.55	1.90	54	6.77	0.16	8.60	8.70	2.55	0.80	0.00	0.34	0.16	99.69
7	30-10	конус Логинова ("К")	бомба	52.15	1.04	16.86	3	5.67	0.17	8.55	9.10	2.88	0.84	0.02	0.32	0.18	99.51
8	26-7	конус Малеева ("Г")	пирокластический материал	53.35	0.89	14.55	1	6.42	0.16	7.42	9.45	2.81	0.66	0.05	-	0.13	99.51
9	15-1	конус "Д"	пирокластический материал	52.44	0.91	15.88	1.75	6.77	-	7.45	9.20	2.95	0.90	-	0.48	0.14	99.61
10	33-12	конус Кулакова ("О")	фронт лавового потока конуса	53.40	1.07	18.76	3.39	5.24	0.14	5.30	7.64	3.33	1.20	0.00	0.00	0.20	99.67
11	37-13	конус Скуридина ("S")	порфировый лавовый поток	53.84	0.75	16.88	1.66	6.88	0.15	6.46	8.37	3.17	0.96	0.11	0.14	0.16	99.53
12	1-6	конус Киргурич, 1932	лава, первая порция	52.82	0.71	15.72	3.24	5.70	0.16	7.58	9.69	2.61	0.98	0.05	0.09	0.16	99.51
13	1-3	конус Киргурич, 1932	перьевидная лава, пористый 01-Rx базальт, последняя порция	52.77	0.77	14.97	2.52	5.90	0.20	9.69	8.99	2.54	0.96	0.07	0.01	0.20	99.59
14	2-2	конус Туйла, 1932	лава, плотный 01-Rx базальт, ближе к истоку	52.23	0.81	14.82	5.07	3.31	0.21	8.76	9.60	2.50	0.90	0.05	0.10	0.20	99.56
15	2-1	конус Туйла, 1932	лава, пористый 01-Rx базальт, правый борт лавового поля	52.78	0.67	14.88	3.35	5.82	0.15	8.81	9.71	2.61	0.98	0.12	0.10	0.16	100.14
16	3-6	конус Биокись, 1932	лава, исток первая порции	52.36	0.66	15.91	2.93	5.76	0.15	7.94	9.53	2.65	1.06	-	0.36	0.19	99.50
17	3-1	конус Биокись 1932	лава, последняя порция	52.31	0.77	14.75	1.90	6.38	0.20	10.14	9.28	2.45	0.90	0.06	0.20	0.20	99.51
18	53-1	кратер Козей, 1938 взрывные воронки	бомба	54.08	0.69	17.29	2.64	6.13	0.15	5.73	8.41	3.11	1.20	0.03	0.34	0.20	100.00
19	80-4	конус Неведимка	лава, 150 м от истока	53.34	0.69	16.94	2.88	5.93	0.15	6.41	8.48	3.17	1.13	0.01	0.13	0.19	99.50
20	59-3	конус Билюкай, 1938	лава, поток у основания конуса	53.24	0.69	16.78	2.35	6.21	0.15	6.65	8.99	2.97	1.13	0.03	0.15	0.19	99.53
21	59-7	конус Билюкай, 1938	лава, пористый 01-Rx базальт, конечная порция лавы	53.14	1.15	15.10	2.60	6.36	0.21	8.40	9.33	2.90	0.43	-	-	-	99.85
22	50-3	прорыв Юбилейный, 1945	лава	53.50	1.04	17.27	2.40	6.02	0.15	5.71	8.34	3.40	1.20	0.01	0.27	0.20	99.50

Таблица 3. Окончание

№	Образец	Название извержения, год	Характеристика образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
23	50-7	прорыв Юбилейный, 1945	лава	53.20	1.05	17.83	2.51	6.36	0.18	5.53	8.38	3.23	1.14	0.00	0.08	0.22	99.71
24	60-8	прорыв Апахончич, 1946	лава, 2600 м от фронта потока	52.47	1.10	17.99	6.42	3.25	0.16	5.45	8.36	3.17	1.08	0.04	0.20	0.23	99.94
25	69-1	прорыв Былинкиной, 1951	лава, западный край лавового поля	53.23	1.12	17.98	2.62	5.95	0.17	5.04	8.16	3.52	1.29	0.05	0.14	0.23	99.51
26	70-2	прорыв Белянкина, 1953	лава, 500 м вниз от шлакового конуса	52.46	1.12	19.22	2.92	5.85	0.14	4.68	7.73	3.76	1.34	–	0.12	0.22	99.56
27	68-4	прорыв Вернадского и Крыжановского, 1956	лавовый поток	53.39	1.18	18.17	2.87	4.89	0.15	4.90	8.96	3.32	1.04	0.66	0.53	0.00	100.08
28	79-4	прорыв Пийпа, 1966	лава, 800 м от истока	53.11	1.07	17.09	2.55	6.25	0.16	6.05	8.41	3.29	1.14	0.03	0.23	0.16	99.54
29	79-6	прорыв Пийпа, 1966	лава, 2000 м от истока	53.22	1.09	17.69	2.00	6.45	0.15	5.89	8.38	3.11	1.14	0.02	0.12	0.24	99.50
30	АВ-25	прорыв IV ВВС, 1974	лавовый поток 8 сентября, 1 фаза из +D12вержения	53.10	1.18	17.16	3.05	6.12	0.16	5.28	9.20	3.57	1.16	0.00	0.34	0.17	100.49
31	98-2	прорыв 8 Марта, 1980	лава	53.16	1.14	18.17	3.76	5.18	0.16	5.19	8.41	3.35	1.14	0.03	0.23	0.14	100.06
32	128	прорыв Предсказанный, 1983	шлак	52.96	1.03	18.09	3.38	6.02	0.17	5.37	8.08	3.37	1.24	–	0.18	0.22	100.11
33	АХО-100-5	прорыв Предвиденный, 1987	исток лавы на высоте 3900 м. 23.02.87	52.08	1.12	18.75	2.38	6.58	0.15	5.36	7.86	3.66	1.36	0.06	–	0.20	99.56
34	АХО1-100	прорыв Предвиденный, 1987	лава, прорыва на перевале высота 2900 м	52.09	1.12	18.83	3.17	6.02	0.16	5.36	8.06	3.60	1.32	0.02	0.12	0.18	100.05
35	АХО-150	Козыревский желоб	лавовый поток, излившийся в январе 1987 г.	52.20	1.13	18.62	3.14	6.02	0.18	5.36	8.06	3.40	1.25	0.07	0.18	0.18	99.79
36	101-25	прорыв 25 лет ИВ, 1988		53.26	1.11	17.88	2.83	6.11	0.14	5.32	8.02	3.26	1.14	–	0.38	0.19	99.64
37	АХО-200	постройка, правый борг Крестовского желоба	субинтрузивно-эффузивное тело, выдержанное по мощности до 2 м	53.44	1.01	18.32	3.45	5.67	0.16	5.02	7.78	3.32	1.15	0.19	0.16	0.21	99.88
38	102-3	14 декабря 1988	лава	52.98	1.07	17.84	5.40	3.92	0.17	5.12	8.18	3.31	1.14	0.14	0.24	0.22	99.73
39	АХО-301	лавовый поток вершинный кратер, 1988	вершинное извержение, январь 1988 г., лавовый поток из вершинного кратера	52.66	1.10	18.38	3.51	5.64	0.15	5.22	8.26	3.76	1.25	0.00	0.23	0.21	100.16
40	105-7	26 июля 1989	лава	52.88	1.09	17.30	2.27	7.00	0.16	5.30	8.20	3.51	1.25	–	0.37	0.18	99.51

Примечание. Аналитик А.И. Округина ЦХЛ ИВ ДВО.



**Рис. 9.** Схематическая модель Ключевской группы вулканов: 1 – постройка вулкана; 2 – четвертичные отложения; 3 – палеоген-неогеновые образования; 4 – меловые отложения; 5 – осадочные отложения; 6 – вулканогенно-осадочные отложения; 7 – “гранитный слой”, 8 – “базальтовый слой”, 9 – переходная зона между базальтовым слоем и верхней мантией; 10 – периферические камеры и очаги; 11 – магма-генерирующие зоны питания вулканов; 12 – магматическая система магма выводящих даек; 13 – силлоподводящие магматические тела региональной зоны арельного вулканизма.

Только у лав двух извержений 1932 и 1938 гг. на склоне вулкана химический состав закономерно меняется:

– в 1932 г. от магнезиальных базальтов в начале извержения (7.6–8.5% MgO) к высокомагнезиальным – к концу (8.8–10.1% MgO). При извержении Киргурича и Биокось каждый новый эруптивный центр начинался с менее магнезиальных базальтов, а заканчивался более магнезиальными. Причем это никак не зависело от объема изверженного материала. Но “промежуточное” по времени извержение вулкана Туйлы имело постоянный магнезиальный состав (8.5–8.8% MgO);

– во время извержения Билукая 1938 г. (если его рассматривать как единое извержение по радиальной трещине), через верхние взрывные во-

ронки (Козей) вместе с резургентным материалом выбрасывались и изливались только глиноземистые ювенильные базальты (MgO = 5.6%), из более нижней (Тиранус) – промежуточного состава (MgO = 6.3%), а из нижнего эруптивного центра, Билукая, после первых порций промежуточного состава (MgO = 6.7%), на поверхность изливались высокомагнезиальные лавы (MgO = 8.2%).

Во время этого извержения, по-видимому, происходило смешение магм глиноземистого состава Ключевского вулкана с магнезиальными – его региональной зоны арельного вулканизма. Необходимо отметить, что все базальты на Ключевском вулкане имеют почти постоянное содержание SiO<sub>2</sub> – 52–53%.

Достоверно установлено, что начиная с 1945 г. до наших дней, на каком бы гипсометрическом уровне склона вулкана не происходило побочное извержение и каким бы не был период покоя между извержениями, а также независимо от объема изверженного материала, – состав лав и пирокластического материала (пепла), продуцируемый вулканом, оставался неизменным, что свидетельствует об отсутствии кристаллизационно-гравитационной дифференциации в канале вулкана [16, 18, 19].

Нами предложена схематическая модель магматического питания Ключевской группы вулканов (рис. 9), с учетом материалов геофизических исследований (А. Каргопольцев). Мы считаем, что нужно отказаться от представлений, что питающая система вулканов являет собой некие цилиндрические “трубы” с диаметром, приравненным к диаметру кратеров вулканов, по которым магма достигает поверхности. Неоднократно уже объяснялось [17, 18 и др.], что магма достигает поверхности по сложной системе питающих даек, которые, как правило, образуют внутри вулкана магмоподводящую зону. Магма должна “созреть”, прежде чем она достигнет земной поверхности. В противном случае она только внедрится в тело вулкана, дополнив собой многочисленные магматические тела, формирующие его “скелет”. Понятно, что для некоторых исследователей пока проще использовать в своих построениях “трубы”. Так им легче, используя математические расчеты, найти следы кристаллизационно-гравитационной дифференциации и т.д. [12, 23].

Цифровые карты составлены в форматах Arc Info и включены как отдельные слои в разрабатываемую в ИГЕМ РАН геоинформационную систему “Вулканоопасность”. ГИС “Вулканоопасность” выполняет функции ввода и обработки информации, формирования и актуализации базы данных (БД) паспортов вулканов, моделирования вулканических объектов и процессов, решения прикладных задач оценки степени вулканоопасности, справочного обслуживания пользователей.

Здесь накапливаются и передаются на рабочие места цифровые карты различных вулканических областей и отдельных вулканов Российской Федерации в масштабах от 1 : 1000000 до 1 : 100000 и крупнее. Геоинформационная среда ГИС “Вулканоопасность” предоставляет возможности хранения, редактирования, обновления и распространения в единой системе разнообразных данных (таблицы, карты, аэро- и космоснимки), как на регионы современного вулканизма, так и на отдельные вулканы.

Соблюдение принципа технологической открытости ГИС “Вулканоопасность” позволяет подключать новые БД, добавлять поля в существующие таблицы, оперативно актуализировать

БД, наращивать производительность программно-аппаратного комплекса системы. В ГИС предусмотрена возможность проведения стратифицированного анализа массивов картографических данных (разделение на “слои” и объединение в виде общей модели), а специальный интерфейс системы позволяет получать из БД интересующую специалиста атрибутивную информацию.

**Выводы.** После проведения исследований активных вулканов Камчатки аэрокосмическими методами (1993–1997 гг.) и анализа полученных материалов, можно считать, что в областях современного вулканизма, наиболее перспективными методами дистанционного зондирования, в первую очередь являются радиолокационные системы, работающие в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин волн с синтезированной апертурой.

Одним из основных результатов работ явилось исследование Ключевской группы вулканов с целью выявления генетической приуроченности шлаковых конусов Ключевского вулкана и его региональной зоны ареального вулканизма. В результате автоматизированного линеamentного анализа по изображению материалов SPOT, восточного склона Ключевского вулкана выделена зона шлаковых конусов, которую мы относим к продуктам ареального вулканизма.

Построена цифровая карта, на которой выделены шлаковые конусы побочных извержений и конусы региональной зоны ареального вулканизма с указанием их возрастов и петрохимической специализации.

Комплексное использование методов дистанционного зондирования наряду с традиционными геологическими и вулканологическими исследованиями, несомненно, расширят наши знания в области наук о Земле, позволят перейти к количественным оценкам баланса вещества в эруптивном процессе, включая отбор и анализ газов и аэрозолей [1].

Целесообразно использовать интерференционную систему SAR, что позволит выполнять съемку вулканов со всех сторон и, опираясь на математические расчеты и совершенствование систем космического, самолетного и наземного мониторинга создать детальные цифровые модели вулканов. Метод кросс-поляризации в L-диапазоне (23 см) очень эффективен при выделении на радиолокационных изображениях свежих лавовых потоков.

Плодотворное сотрудничество со специалистами из НПО Машиностроения, СП РГНЦ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, при проведении исследований вулканов Курило-Камчатского региона, позволило на принципиально новом уровне обрабатывать уникальные аэрокосмические данные, получаемые как с самолетов-лабораторий (на аппаратуре



АФА, TIMS, ZEISS), так и с космических аппаратов “Алмаз-1”, “Мир”, “Ресурс-Ф”, SPOT, Shuttle.

Исследования проводятся при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий России, Департамента наук о жизни и Земле (руководитель А.М. Новиков), в рамках Международного проекта (700) и гранта РФФИ № 01-07-90176.

Авторы выражают признательность Я.Д. Муравьеву, В.В. Зайцеву, В.Е. Шкарину и Е.М. Федоровой за помощь при подготовке рукописи к печати.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богати́ков О.А., Хренов А.П., Ховавко С.А., Мальцев А.Л. Состав, структура и оценка количества аэрозолей в эксплозиях вулканов центрального типа (Камчатка) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 111–116.
2. Влодавец В.И. Ключевская группа вулканов // Тр. Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. 1940. № 1. 124 с.
3. Двигало В.Н., Дроздин В.А. Аэрофототепловая съемка побочного извержения Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1980. № 5. С. 77.
4. Двигало В.Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. по фотограмметрическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104–109.
5. Двигало В.Н. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968–1988 гг. (по аэрофотограмметрическим наблюдениям) // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 3–18.
6. Двигало В.Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3–16.
7. Ермаков В.А. О характере дифференциации магмы в каналах действующих вулканов // Бюлл. вулканологических станций. 1974. № 50. С. 19–31.
8. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 350 с.
9. Макаров В.И., Трифонов В.Г. Космос и геология. Новое в жизни, науке и технике. Сер. Науки о Земле. М.: Знание, 1987. 48 с.
10. Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
11. Набоко С.И. Извержение Билюкая – побочного кратера Ключевского вулкана в 1938 году // Тр. Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. 1947. № 5. 134 с.
12. Озеров А.Ю., Арускин А.А., Кайл Ф. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. № 6. С. 614–625.
13. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 309 с.
14. Селезнев Б.В., Двигало В.Н., Гусев Н.А. Развитие вулкана Безымянный по данным стереофотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемок 1950, 1967 и 1976–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 52–64.
15. Сладкопевцев С.А. Изучение и картографирование рельефа с помощью аэрокосмической информации. М.: Недра, 1982. 216 с.
16. Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932–1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3–16.
17. Федотов С.А. Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23–45.
18. Хренов А.П., Двигало В.Н., Курсанов И.Т. Ключевской вулкан // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. С. 45–74.
19. Хренов А.П., Пиери Д., Блинков А.Н., Зайцев В.В., Шкарин В.Е. Аэрокосмические исследования действующих вулканов Камчатки в 1993–1996 годах // Исследование Земли из космоса. 1999. № 6. С. 70–82.
20. Abrams M., Abbott E., Kanle A. Combined Use of Visible, Reflected Infrared, and Thermal Infrared Images for Mapping Hawaiian Lava Flows // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B1. P. 475–484.
21. Arculus R.J., Halliday A.N., Holden P. et al. High-Mg/High-Al basalt genesis: Klyuchevskoy Volcano, Kamchanka, USSR E.T.A.G.U.S.-Francisco, 1988. P. 1494.
22. Kahle A., Gillespie A., Abbot E. et al. Relative Dating of Hawaiian Lava Flows Using Multispectral Thermal Infrared Images: A New Tool for Geological Mapping of Young Volcanic Terranes // J. Geoph. Res. 1988. V. 93. № B12. P. 15239–15251.
23. Kersting A.B., Arculus R.J. Klyuchevskoy Volcano, Russia: The Role of High-Flux Recharged, Tapped, and Fractionated Magma Chamber (s) in the Genesis of High- $Al_2O_3$  from High-MgO Basalt // J. Petrology. 1994. V. 35. Part 1. P. 1–41.
24. Khrenov A.P., Okrugin V.M., Fedotov S.A., Arculus R.J., Davidson J. Klyuchevskoy: a big basaltic, explosive, fast-growing strto-volcano in Kamchatka, USRRR F.T.A.G.U. 69 (16). 1988. P. 267.
25. Khrenov A.P., Dvigalo V.N. Geological effect of Kluchevskoy eruptions in 1932–1988. Continental magmatism. 1989. IAVCEI, General Assembly (Santa Fe, New Mexico, USA). Bul. 131. P. 152.
26. Khrenov A.P. Airborne remote sensing of the active Kamchatka volcanoes from the laboratory planes An-30, An-24, Tu-154 and Il-18 in 1993–1995. International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco USA. ERIM. 1996. VI. 1. P. 481–489.
27. Pieri D.C., Glaze L.S., Abrams M.J. Thermal radiance observations of an active lava flow during the June 1984 eruption of Mount Etna // Geology. 1990. V. 18. P. 1018–1022.

28. *Pieri D.C., Khrenov A.P., Droznin V.A., Dvigalo V.N. et al.* The 1993 Airborne Multispectral Thermal Infrared Survey of Volcanoes on the Kamchatka Peninsula, Russia. EOS, Transactions, American Geophysical Union. 1995. P. 15.
29. *Khrenov A.P., Pieri D.C., Blinkov A.N. et al.* Airborne Remote Sensing of Active Volcanoes in Russia in 1993–1996. Thirteenth International Conference Workshops Applied Geologic Remote Sensing (ERIM) Vancouver, B.C. Canada. II. 1999. P. 70–78.

## **Results from Air- and Space-Borne Studies of Kamchatkan Volcanoes: the Klyuchevskoy Volcanic Cluster**

**A. P. Khrenov, T. M. Makhanova, O. A. Bogatkov, A. N. Plate**

*Institute of Ore Field Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 109017, Russia*

Long-continues field, and air- and space-borne studies of Kamchatkan volcanoes carried out within the framework of the International Russian-American project “Earth Sciences”. In conjunction with the use of deep seismic sounding observations, yielded materials of remote sounding which have been mostly processed for the Klyuchevskoy volcanic cluster, this being the most active and productive in Kamchatka. For the first time ever, a digital map of volcanoes of the Klyuchevskoy cluster to scale 1 : 100000 has been made. All cinder cones were superposed on the map in a system of coordinates with special indication of the cinder cones in the regional zone of areal volcanism and the eruptive centers of bocca eruptions on Klyuchevskoy volcano along with their petrochemical characteristics and ages. This paper also provides information on the “single primary” magma of Klyuchevskoy Volcano.