

УДК 551.21

© 1994 г. ЛЕОНОВ В. Л.

**ЛИНЕАМЕНТЫ, ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ
СКЛОНОВ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА**

На склонах Ключевского вулкана и вблизи него на площади 30x40 км изучены линейные формы рельефа (линеаменты) и тектоническая трещиноватость. Выделены зоны с преобладанием линеаментов различного направления. По пересечению одних зон другими установлен их относительный возраст (возраст последней активизации). Показано, что наиболее молодой и активной в последние годы является линейная зона северо-западного простирания. Особо выделены две зоны, отличающиеся своеобразным структурным рисунком: дуговая, окаймляющая вулкан с востока на высотах 900—2500 м, и на крутом склоне конуса (выше 2500 м). В пределах последней выделена система дуговых трещин и сбросов, свидетельствующая о растяжении конуса («паукообразный» структурный рисунок). На основании анализа распространения подобных систем трещин и сбросов на других вулканах установлено, что они могут служить прогностическим признаком, указывающим на процессы разрушения, происходящие на вулканах, и на места будущих побочных прорывов или обрушений склонов. Для Ключевского вулкана установлено, что наиболее опасен его юго-восточный склон, где в будущем возможны крупные обвалы или проседания.

LINEAMENTS, FRACTURING AND STABILITY OF THE FLANKS OF KLYUCHEVSKOY VOLCANO, by Leonov V. L. Linear forms of topography (lineaments) and tectonic fractures were studied on the flanks of Klyuchevskoy volcano and around it in the area of 30x40 km. The linear zones with prevailing one or another strike have been recognized. Their relative age (the age of their latest intensified activity) was determined on shearings of one linear zones by other. A NW-trending linear zone is shown to be the youngest and most active in recent years. Of particular interest are two zones having a peculiar structural pattern: one is the arched zone bordering the volcano from the east at elevations of 900—2500 m and another, on a steep slope of the cone (above 2500 m). Within the latter, one can distinguish a system of arched fissures and faults indicative of extension of the cone («spider-like» structural pattern). The analysis of the distribution of similar fracture and fault systems on other volcanoes implies that their presence may serve as a criterion pointing to the destruction processes occurring on a volcano and for forecasting the sites of future flank eruptions and failures of its slopes. It is inferred that on Klyuchevskoy, the most hazardous is the southeastern slope where extensive collapses and subsidences may occur in the future.

(Received December 1, 1993)

*Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

Настоящая работа посвящена вулкану Ключевскому, наиболее крупному и активному вулкану Курило-Камчатской вулканической области [17]. Особое внимание уделено структурному анализу, линеаментам и трещиноватости, которые ранее ни на вулкане, ни в его окрестностях специально не рассматривались. Выводы об особенностях строения и структурной локализации вулкана, полученные на основе этих исследований, могут быть полезны как для лучшего понимания проблем магматического питания, механизма вулканической деятельности, сейсмичности, так и для оценки устойчивости вулканического конуса, определения мест возможных обвалов и обрушений на нем. Исследования устойчивости вулканических построек получили развитие особенно после известного извержения

вулкана Сент-Хеленс в США 18 мая 1980 г. Это извержение было связано с гравитационным обрушением северного склона вулкана, вследствие которого произошел катастрофический направленный взрыв, унесший жизни многих людей [14]. В дальнейшем исследователи ряда стран провели анализ распространения обвалных отложений в вулканических районах, оценили их опасность и возможную связь с сейсмичностью и вулканической деятельностью [12, 30, 31 и др.]. Исследуя распространение обвалов на вулканах Камчатки и Курильских островов, И. В. Мелекесцев и О. А. Брайцева [12] сделали вывод о большой вероятности возникновения обвалов на вулканах Ключевском, Кизимене и Мутновском. Наиболее опасен в отношении возникновения сейсмотектонических и вулкано-сейсмотектонических обвалов предположительно северо-западный сектор конуса Ключевского вулкана. Вероятность такого обрушения отмечена также в работе [16]. Дополнительным импульсом для постановки вопроса об изучении возможности крупных обрушений на Ключевском вулкане послужили события конца 1980-х гг., когда значительная часть постройки вулкана от абсолютных отметок 2000 м до вершины подверглась интенсивному трещинообразованию [7]. В работе [17] отмечено, что одним из вариантов дальнейшего развития событий на Ключевском вулкане может быть возникновение крупных обвалов и разрушение его постройки по тому же типу, что на вулканах Камень и Острый Толбачик, расположенных поблизости. У подножия Ключевского вулкана расположены г. Ключи, для которого возможные крупные обвалы и крупные извержения представляют реальную опасность. В этой связи исследование устойчивости постройки Ключевского вулкана особо остро необходимо. В настоящей работе этот вопрос рассмотрен со структурных позиций.

Анализ сети линеаментов, развитой на склонах Ключевского вулкана и в его окрестностях. На первом этапе структурного изучения территории использована стандартная методика морфоструктурного анализа, подробно описанная в работе [9]. В результате дешифрирования аэроснимков и работы с топографическими картами установлены прямолинейные формы рельефа, которые рассматривались как линеаменты, отражающие существующую в районе сеть неотектонических разрывных нарушений. В качестве линеаментов рассматривались также оси рядов лавовых куполов, эруптивные трещины растяжения, трещины, трассирующиеся выходами однородных по составу лав и т. д. Подробное описание различных типов линеаментов, проявляющихся в вулканических областях, приведено, в частности, в работе [29], что избавило автора от более подробного рассмотрения этого вопроса.

Основой настоящих работ послужили топографические карты и аэрофотоснимки масштаба 1 : 50 000, которые оказались наиболее информативными. В качестве вспомогательных использованы также материалы других масштабов, включая космические снимки. В работе [9] отмечено, что карты и снимки разных масштабов не дублируют друг друга, на них отражены тектонические структуры разной протяженности и глубины заложения. На топографических картах масштаба 1 : 50 000 в процессе работ выделены линеаменты длиной в сотни метров — первые километры, затем по преобладанию линеаментов того или иного направления — зоны, протягивающиеся на десятки и сотни километров, которые трассировались на снимках и картах мелкого масштаба.

Всего на изученной площади (размером 30x40 км) выделено 1028 линеаментов; наиболее крупные из них показаны на рис. \a. По преобладанию линеаментов того или иного простирания отчетливо выявляется несколько зон. На северо-западе района, в бассейне ручьев Ключевской, Многоисточный, Правый Эульченко, преобладают линеаменты меридионального простирания. Юго-восточнее, в бассейнах рек Столбовой, Сухой, Крутенькой и Киргурич, наиболее широко распространены линеаменты северо-восточного простирания, которые трассируются на юго-запад вплоть до подножия сопки Плоская Ближняя и Ключевская. На юго-востоке, в бассейне рек Глубокая и Каменистая, явно преобладают линеаменты широтного простирания. Ближе к вулкану Ключевскому структурный рисунок

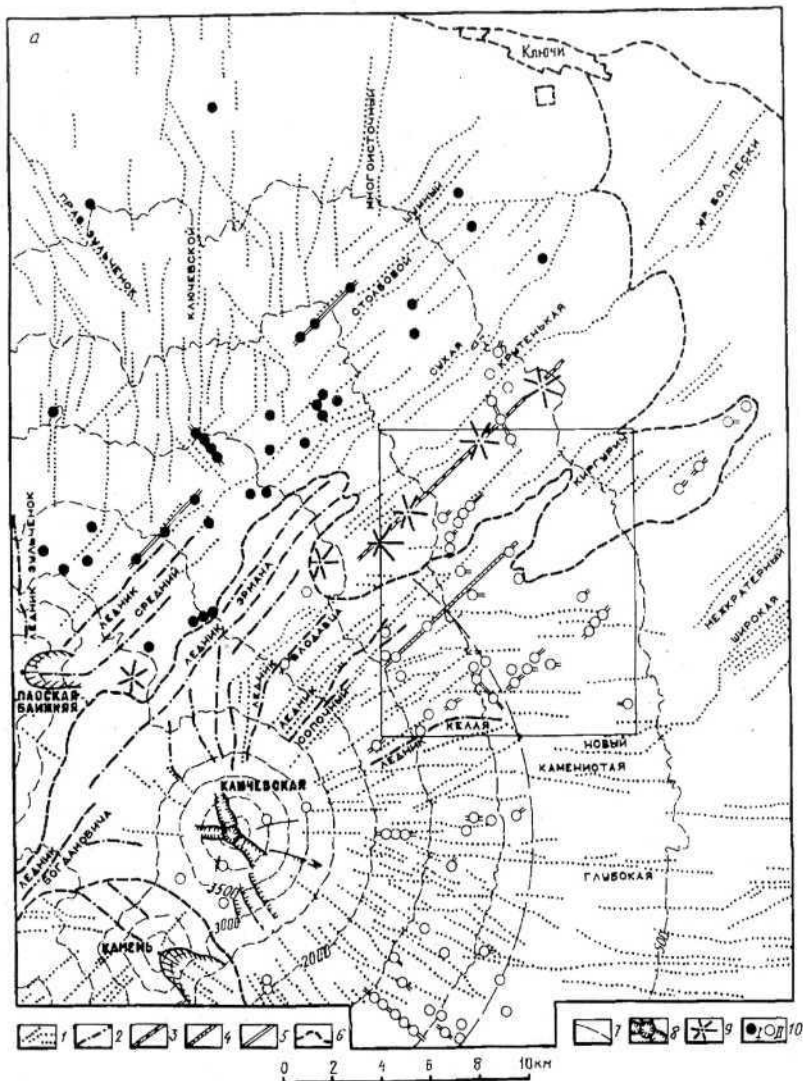


Рис. 1. Схема (а) распространения линеаментов района Ключевского вулкана: 1 — морфо-линеаменты (спрямленные участки рек, ручьев, долин, уступы склонов); 2 — предполагаемые захороненные зоны трещин и разломов, трассирующиеся ледниками; 3 — оси рядов лавовых куполов; 4 — линеаменты, трассирующиеся выходами однородных по составу лав [18]; 5 — трещины растяжения на шлаковых конусах, эруптивные трещины; 6 — граница области распространения отложений, связанных с Ключевским вулканом; 7 — границы дуговой зоны на склонах Ключевского вулкана, различающейся по структурному рисунку; 8 — уступы просядок, выделяющихся в крутосклонной части конуса Ключевского вулкана; 9 — лавовые куполы построек типа горы Лавовой Шиш; 10 — шлаковые конусы и побочные прорывы: I — верхнеплейстоценового возраста, II — голоценовые и современные. Прямоугольником отмечен район, показанный на рис. 3. б — Розы-диаграммы частоты встречаемости и суммарной длины линеаментов по зонам А—Е (обоснование выделения зон см. в тексте), в — Предполагаемая схема взаимоотношения основных зон сгущения линеаментов (заштрихованы)

заметно меняется. На отметках от 900 до 2500 м выделяется дуговая зона, огибающая вулкан с востока и отличающаяся, с одной стороны, заметным увеличением количества линеаментов, а с другой — примерно равномерным распределением линеаментов разного простирания. Особым структурным рисунком обла-

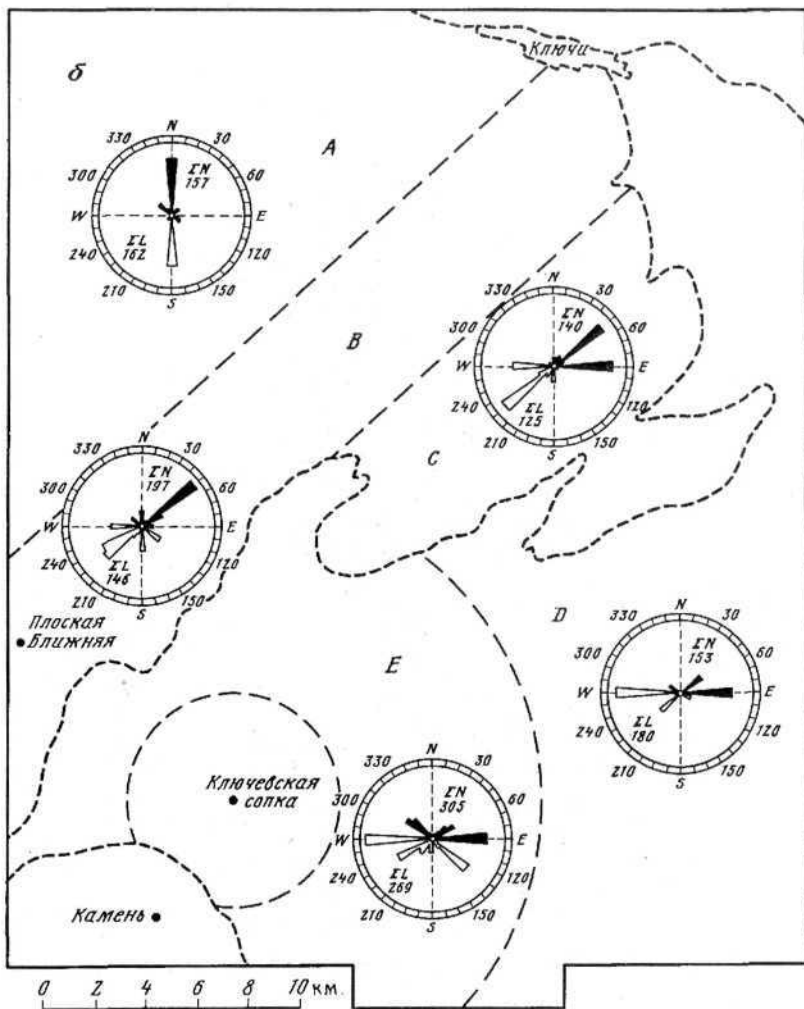


Рис. 1, б

дает крутосклонная часть конуса Ключевского вулкана (от отметок 2500 м до вершины). Здесь отчетливо проявлена система дуговых трещин и разломов, образующих характерный «паукообразный» рисунок, который подробно описан далее.

Всего по преобладанию того или иного структурного рисунка и с учетом особенностей геологического строения в зоне подножия Ключевского вулкана выделено пять зон (A, B, C, D, E); для каждой из них подсчитано количество линеаментов по простиранию и по суммарной длине (по секторам в 10°) (рис. 1, б). Рассмотрим кратко результаты этих подсчетов. В зоне A (северо-западная часть изученного района) выделено 157 линеаментов, имеющих суммарную длину 162 км. Как уже отмечено, здесь явно преобладают (как по частоте встречаемости, так и по длине) линеаменты меридионального простирания. Примерно в 3 раза реже встречаются линеаменты северо-западного простирания (310° СЗ) и совсем редко — линеаменты с простиранием 320° СЗ, 50° СВ и др.

В зоне B (зона шлаковых конусов, протягивающаяся к северо-востоку от горы Плоская Ближняя) выделено 197 линеаментов, имеющих суммарную длину 146 км. Среди них преобладают линеаменты северо-восточного простирания (50° СВ). Значительно реже встречаются линии с простиранием 60° СВ, 0° С, 310°

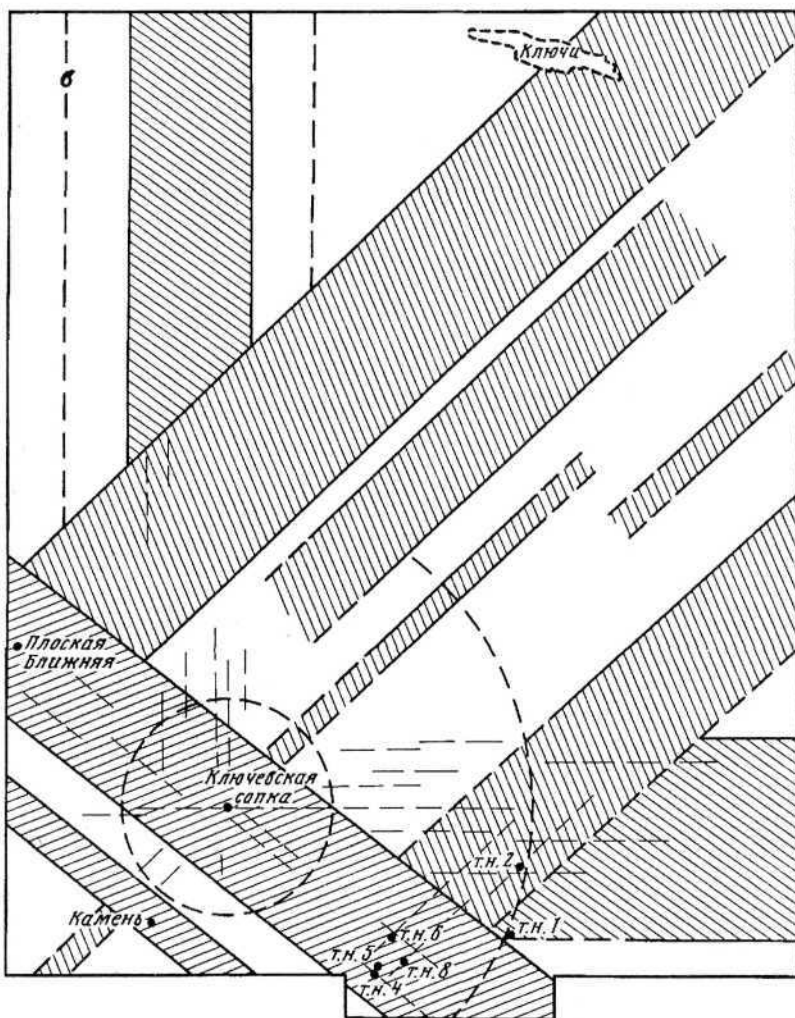


Рис. 1, б

СЗ, 90° В и др. В зону С выделен район распространения раннеголоценовых лавовых образований типа постройки горы Лавовый Шиш (среднее течение рек Крутевская и Киргурич). Здесь установлено 140 линеаментов, имеющих суммарную длину 125 км. По частоте встречаемости примерно равное значение (преобладая над остальными) имеют линеаменты северо-восточного (50° СВ) и широтного (90° В) простирания. При этом по суммарной длине вторые явно уступают первым. Линеаменты иных направлений (меридиональные, 30° СВ, 60° СВ, 310° СЗ и др.) распространены незначительно.

В зоне D (восточная часть изученного района, покрытая отложениями подножий Ключевского вулкана) выделено 153 линеамента, имеющих суммарную длину 180 км. Здесь и по частоте встречаемости, и по суммарной длине преобладают линеаменты широтного простирания (90° В), значительно распространены также линеаменты северо-восточного простирания (50° СВ). Остальные направления выражены слабее. В зоне E (дуговой зоне восточных подножий Ключевского вулкана на отметках от 900 до 2500 м), особенности которой отмечены выше, выделено 305 линеаментов с суммарной длиной 269 км. Наибольшим распространением среди них, как и в зоне D, пользуются линеаменты широтного про-

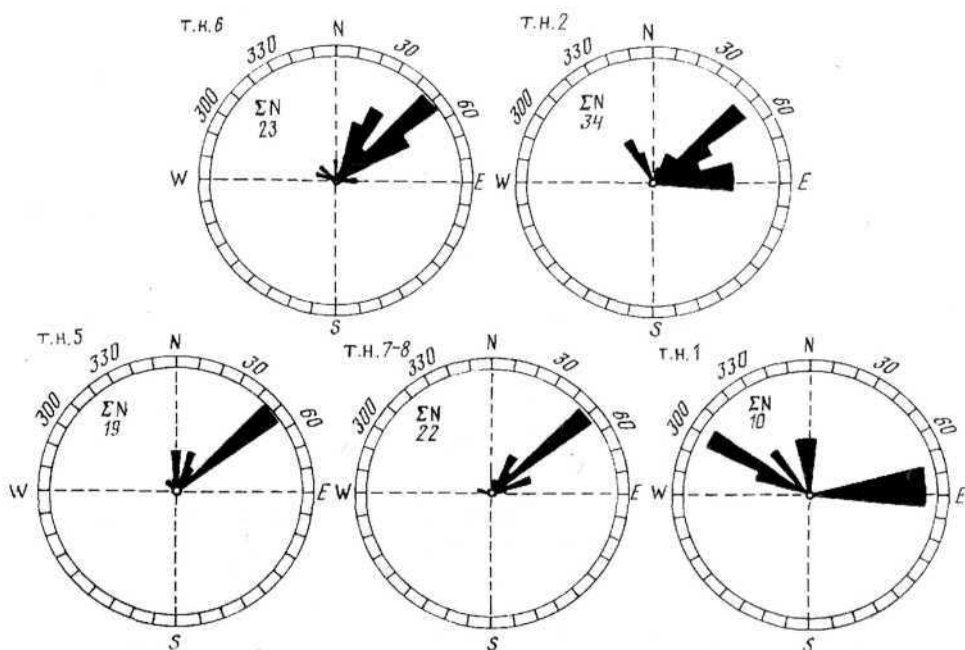


Рис. 2. Розы-диаграммы частоты встречаемости тектонических трещин в лавах Ключевского вулкана (точки наблюдений 1—8 — точки замеров трещиноватости; местоположение их см. на рис. 1, ΣN — количество измеренных трещин)

стирания (90° В). Почти столь же часто встречаются линеаменты с простиранием 310 и 320° СЗ, реже распространены линеаменты северо-восточных румбов (от 30 до 60° СВ).

Взаимоотношение линейных зон линеаментов и их относительный возраст. Описанные выше линейные зоны линеаментов свидетельствуют о том, что район раскается сразу несколькими зонами трещин и разломов — по-видимому, частями региональных структур, протягивающихся в длину на десятки километров. Отчетливо проявлено пересечение одних зон другими, что подчеркивает разный возраст их последней активизации (рис. 1, θ). Так, зона меридиональных линеаментов, трассирующая долиной ручья Ключевского и расположенная на северо-западе рассматриваемого района, срезается зоной линеаментов северо-восточного простирания (зоной В). Последняя в свою очередь в районе вулкана Ключевского срезается зоной с преобладанием линеаментов северо-западного простирания. Сложнее взаимоотношение разнонаправленных линеаментов на юго-востоке района, восточнее Ключевского вулкана, где накладываются друг на друга сразу несколько зон линеаментов, имеющих северо-восточное, широтное и северо-западное простирание. Кроме того, данный район попадает также в пределы описанной выше дуговой зоны (зоны Е), в которой значительную роль играют линеаменты, ориентированные радиально по отношению к Ключевскому вулкану. Для получения дополнительной информации по этому району здесь летом 1993 г. проведены специальные полевые работы по изучению тектонической трещиноватости. В обнажениях, в основном на больших плоскостях древних лавовых потоков, отшлифованных временными водотоками, измерены параметры всех тектонических трещин (углы падения, простирания, раскрытие, заполнение). Точки, в которых проведены замеры, показаны на рис. 1. Несмотря на небольшое количество трещин (всего их измерено 114), проявилась отчетливая тенденция: в пяти из семи изученных точек наблюдения преобладали трещины с простиранием 50° СВ (рис. 2). При этом чаще всего их плоскости были наклонены к северо-западу под углом от 60 до 80° . Исключение составили лишь точка наблюдения 1,

где преобладали трещины широтного ($80-90^\circ$ В) и запад-северо-западного ($290-300^\circ$ СЗ) простираний, и точка наблюдения 4 (на конусе Обручева Юбилейного прорыва), где замерено несколько трещин северо-западного простирания ($320-335^\circ$ СЗ).

Участок, на котором проведены замеры трещин, находится на продолжении сгущения линсаментов северо-восточного простирания в бассейнах руч. Межкратерного и р. Широкой (рис. 1), поэтому сделан вывод, что изученные трещины трассируют здесь единую региональную зону северо-восточного простирания, протягивающуюся только в пределах района более чем на 20 км. Б. И. Пийп [13] считал, что здесь проходит разлом, трассирующийся зоной шлаковых конусов, расположенных северо-восточнее вулкана Плоский Толбачик, т. е. протяженность данной зоны более 50 км. Точка наблюдения 1 находится, по-видимому, уже за пределами этой зоны. Обращает на себя внимание также то, что в сети линсаментов на данном участке северо-восточное направление фактически не проявлено, т. е. линеаменты здесь не отражают в полной мере сеть новейших разрывных нарушений. Это связано, по-видимому, с влиянием вулканической постройки — на ее склонах (в пределах выделенной выше зоны *E*) освоены водоотками и проявлены в виде линеаментов лишь трещины, ориентированные радиально по отношению к Ключевскому вулкану.

Вернемся вновь к выделению крупных линейных зон, особенностям их пересечения между собой. Изложенные выше данные позволяют предполагать, что на юго-востоке рассматриваемого района наиболее древней является зона линсаментов широтного простирания, которая западнее точки наблюдения 1 срезается зоной трещин северо-восточного простирания. В целом, представления автора о взаимоотношении различных линейных зон на рассматриваемой территории отражены на рис. 1,б. В качестве наиболее древних из них выделяются меридиональная и широтная, которые в центре района пересекаются полосой северо-восточного простирания, имеющей ширину ~ 23 км. Последняя на траверсе сопки Ключевская — Плоская Ближняя пересекается зоной северо-западного простирания. Исходя из изложенного, северо-западную зону следует рассматривать как имеющую наиболее молодой возраст последней активизации.

Вулканические линеаменты и особенности строения зоны крутосклонного конуса. В качестве вулканических линсаментов выделяются эруптивные трещины, ряды лавовых и шлаковых конусов, цепочки кратеров и эрозионных цирков на склонах конусов и т. д. [29]. На рис. 3,а показаны некоторые примеры подобных форм. Рассмотрим их, как и описанные выше линеаменты, по зонам, выделив зоны дальних подножий (зоны *C* и *D*), зону ближних подножий (зону *E*) и зону крутосклонного конуса (выше абсолютных отметок 2500 м). Установленные в этих зонах вулканические линеаменты перечислены в табл. 1—3, где указаны их простирание и ориентировочная длина. На рис. 3,б — г показаны розы-диаграммы частоты встречаемости и суммарной длины вулканических линеаментов (по секторам в 10°). В зоне дальних подножий (рис. 3,г) они чаще всего имеют северо-восточное и широтное простирание (50° СВ и 90° В), что полностью совпадает с особенностями распространения в этих зонах (*C* и *D*) невулканических линеаментов (рис. 1). В зоне ближних подножий (зоне *E*) по частоте встречаемости вулканических линеаментов ни одно из направлений особо не выделяется (рис. 3,в). По длине незначительно преобладают линеаменты северо-западных простираний (320° СЗ). В пределах крутосклонного конуса, несмотря на небольшое количество данных (измерены параметры всего восьми эруптивных трещин), можно отметить направления: 30 и 50° СВ, а также 310° СЗ (рис. 3,б).

Кроме вулканических линеаментов в этой части конуса выделены три вулкано-тектонических желоба (Крестовский, Козыревский и Апахончичский) и ряд крупных дуговых трещин и сбросов; их положение относительно вершины Ключевского вулкана показано на рис. 4. Отчетливо проявляется зеркально-симметричное расположение отмеченных структурных форм относительно плоскости, проходящей через вершину вулкана и имеющей простирание 310° СЗ. Крестовский

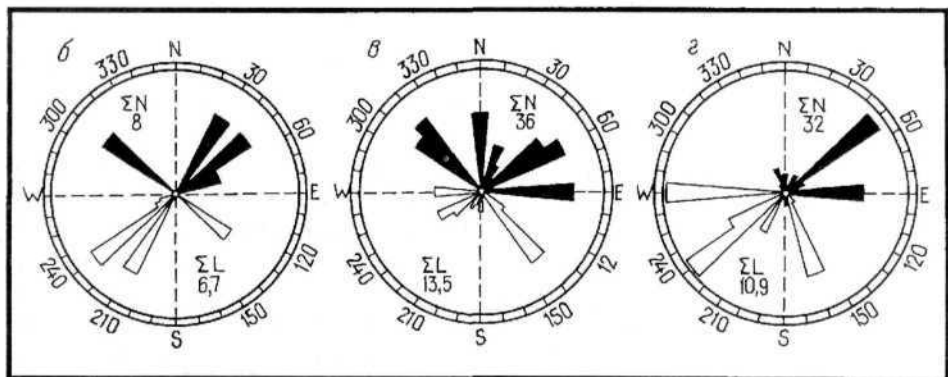
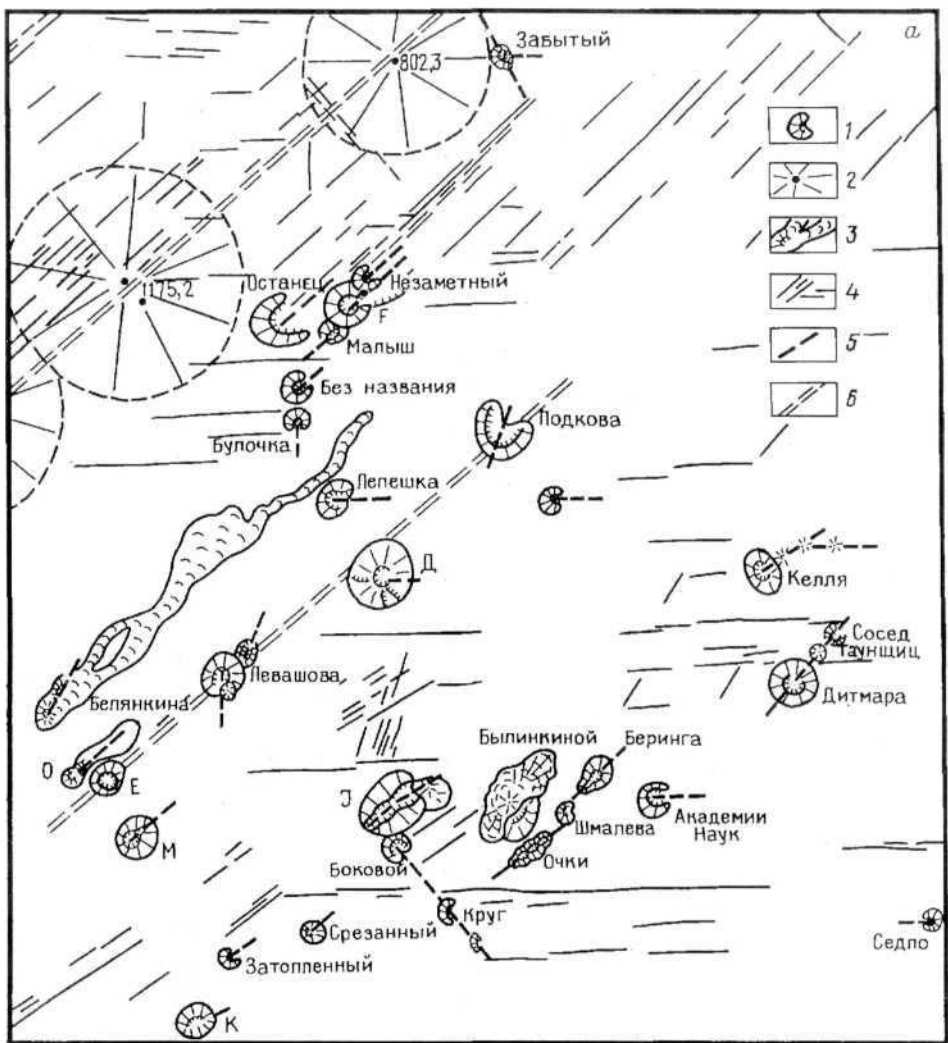


Рис. 3. Вулканические линеаменты: а — примеры их выделения (район отмечен прямоугольником на рис. 1); б — г — розы-диаграммы частоты встречаемости и суммарной длины по зонам: б — крутосклонного конуса, в — ближних подножий, г — дальних подножий; 1 — шлаковые конусы побочных прорывов, связанных с Ключевским вулканом; 2 — лавовые куполы построек типа горы Лавовый Шиш; 3 — современные побочные прорывы и связанные с ними лавовые потоки; 4 — морфолинеаменты (прямолинейные участки долин, рек, ручьев, уступы склонов); 5 — вулканические линеаменты (цепочки кратеров, рытвин и промоин на склонах вулканических построек); 6 — вулканические линеаменты, трассирующиеся рядами вулканических построек с однородным составом лав

Вулканические линеаменты зон С и D

Кратер, прорыв	Простираение, град	Длина, км
Туйла	30	0,5
Атласова	335	2,0
Сизмоса	90	0,2
Забытый	50	0,1
Незаметный	50	0,3
Кратер	50	0,2
Мальш	50	0,2
Без названия	0	0,1
Булочка	90	0,3
Лепешка	25	0,5
Подкова	320	0,2
Кратер	90	0,5
	0	0,2
Келля	55	0,7
	90	0,5
Дитмара, Тауншиц, Со- сед	45	1,0
Академии наук	90	0,3
Беринга	50	0,5
Шмалева	90	0,1
Очки	55	0,7
Седло	90	0,2
228,2	90	0,5
260,5	50	0,1
373,5	50	0,3
Останец (Скалистый)	50	0,5
Линеамент Конус E — Подкова	50	7,0
Линеамент построек го- ры Лавовый Шиш — горы Забытая	50	10,0

и Козыревский желобы (азимуты их простираения соответственно 340 и 280°) расположены симметрично под углом 30° к этой плоскости, а Апахончичский желоб имеет одинаковое с ней простираение. Наглядно проявляется эта плоскость также при анализе расположения дуговых трещин и сбросов. Последние наиболее отчетливо видны на юго-восточных склонах вулкана (рис. 4). Южнее Апахончичского желоба здесь дешифрируются по крайней мере три крупных сбросовых уступа, которым даны названия: 1-я, 2-я и 3-я юго-западные стены. Их высота достигает 30—40 м, в длину они прослеживаются на 1—1,5 км. Во всех случаях крутые склоны уступов обращены к северо-востоку, к оси Апахончичского желоба, что предполагает наличие вдоль этой оси крупных просадок, охвативших значительную часть склона (ширина затронутой просадками зоны более 3 км).

К северо-востоку от оси Апахончичского желоба также фиксируется система дуговых трещин, но сбросовые уступы здесь обращены к юго-западу и выражены значительно слабее. Возможно, это связано с более мощной снежно-ледовой шапкой, скрывающей северные и северо-восточные склоны Ключевского вулкана. Для выявления деталей строения трещин и разломов на этом участке необходимо проведение дополнительных полевых работ.

В целом Апахончичский желоб и зоны трещин и разломов, обрамляющие его, представляют собой широкую зону растяжения, поперечный профиль которой

Вулканические линеаменты зоны E

Кратер, прорыв	Простираение, град	Длина, км
Круг (Безухий Стан)	320	1,5
Боковой	90	0,2
Кратер	90	0,5
	60	0,5
Срезанный	60	0,1
Затопленный	55	0,2
Кратер К (Новый)	60	0,1
Кратер М	50	0,2
Кратер О	50	0,5
Левашова	0	0,2
	20	0,2
Лесной	90	0,5
Кратер (Открытый)	30	0,4
Горшок (Зеленый)	90	0,2
Стеллера	310	0,5
Карпинского	310	0,5
Пещерный	310(?)	—
Маленький	90(?)	—
Прибрежный	310	0,2
Юбилейный прорыв	317	2,0
Группа Козея	90	1,0
Невидимка (Третий)	90	0,2
Тиранус	64	0,2
Билюкай	60	0,2
	20	0,2
Апахончич	310	0,1
Погребенный	315	0,2
Без названия	0	0,5
Слюнина	0	0,2
Вернадского	320 (?)	—
Белянкина	30	0,5
Прорыв Пийпа	15	0,3
	45	0,1
Холм	315	0,3
Прорыв им. 8 марта	59	1,0

Таблица 3

Вулканические линеаменты крутосклонного конуса Ключевского вулкана (выше 2500 м)

Прорыв	Простираение, град	Длина, км
Им. IV ВВС*, 1974 г.	60	0,5
Предсказанный, 1983 г.	70	0,4
Предвиденный, 1987 г.	30(?)	1,0
Им. 25-летия ИВ**, 1988 г.	30	1,0
	45	0,3
Мелкие прорывы конца декабря 1988 г., января и февраля 1989 г.	50	2,0
	310	0,5
Им. Ю. Ф. Скуридина, 1989—1990 гг.	310	1,0

* ВВС — Всесоюзное вулканологическое совещание.

** ИВ — Институт вулканологии.

напоминает профили широких грабенообразных структур, возникающих в новейших зонах растяжения земной коры (в Исландии, Афарской депрессии и т.д.). В то же время указанные особенности строения значительно отличают Апахончичский желоб от других вулcano-тектонических желобов (Крестовского и Козыревского), которые не сопровождаются столь широкими зонами растяжения и имеют характерную клиновидную форму, резко сужаясь к основанию конуса.

Проведенное дешифрирование аэрофотоснимков северо-западных склонов конуса Ключевского вулкана выявило здесь также систему дуговых трещин и сбросов, образующих структурный рисунок, симметричный относительно плоскости с простиранием 310° СЗ (рис. 4). В целом приведенные выше данные позволили выделить северо-западное направление, вдоль которого фиксируются отчетливые черты растяжения конуса Ключевского вулкана, как основную структурную линию, определяющую многие особенности строения вулкана.

Линеаменты, выделяемые по данным о сейсмичности, предваряющей побочные прорывы Ключевского вулкана. Рассмотрим данные о сейсмичности, иногда позволяющие выделить сейсмо-тектонические линии и оси, которые существенно дополняют общую картину распространения линеаментов [26]. Для района Ключевского вулкана в ряде случаев устанавливаются отчетливо вытянутые эпицентральные области роев землетрясений. Так, для роя, предварявшего побочный прорыв 1987 г. (Предвиденный), отмечено, что он вытянут с северо-запада на юго-восток, и в этом же направлении 20—22 февраля наблюдалось смещение эпицентров землетрясений накануне образования 23 февраля первой эруптивной трещины [16]. Указано, что подобное смещение эпицентров установлено также накануне побочного прорыва 1980 г. (имени 8 марта). Для побочных извержений им. XXV-летия Института вулканологии в 1988 г. и им. Скуридина в 1989 г. также характерно, что эпицентральные области предварявших их роев землетрясений вытянуты в северо-западном направлении [7].

Автор работы [8] провел анализ системы напряжений, действовавшей в районе Ключевского вулкана в период до побочного прорыва 1974 г. В этот период отмечены два роя землетрясений — в апреле и в августе. Побочное извержение произошло непосредственно после окончания августовского роя. Проведенный анализ показал, что в период апрельского роя 70% определений осей напряжений сжатия были заключены в диапазоне азимутов $0-90^\circ$, а в период августовского роя — в диапазоне $79-170^\circ$, т. е. и в этом случае непосредственно перед прорывом основную роль играло северо-западное направление: трещины этого направления находились в условиях растяжения. Таким образом, данные о сейсмичности полностью согласуются с распространением линеаментов и свидетельствуют о том, что выделенная выше зона северо-западного простирания, проходящая через Ключевской вулкан, представляет собой основную структурную линию, активную в новейшее время. Вдоль нее локализируются очаги землетрясений, предваряющих побочные прорывы, происходит их миграция, формируются просадки и широкие грабенообразные структуры на склонах; симметрично относительно оси этой зоны располагаются вулcano-тектонические желоба и побочные прорывы. Все это предполагает анизотропию строения конуса, которую необходимо учитывать при рассмотрении механизмов деятельности вулкана, создании модели его магматической питающей системы, моделировании процессов разрушения. Рассмотрим далее основные структурные факторы, определяющие разрушение вулканических построек и условия, определяющие локализацию структур разрушения на Ключевском вулкане.

Закономерности структурной локализации обвальных и взрывных цирков на вулканах. В районе Ключевской группы обвалы известны на вулканах Крестовском (сопка Плоская Ближняя), Камень, Овальная Зимина, Острый Толбачик и Плоский Толбачик [12]. На вулканах Камень и Острый Толбачик произошли наиболее крупные обвалы. В обоих случаях они были направлены на юго-восток. В этом же направлении ориентированы сформировавшиеся на этих вулканах цирки. На вулкане Камень такой цирк имеет размеры 4×7 км и крутые, местами

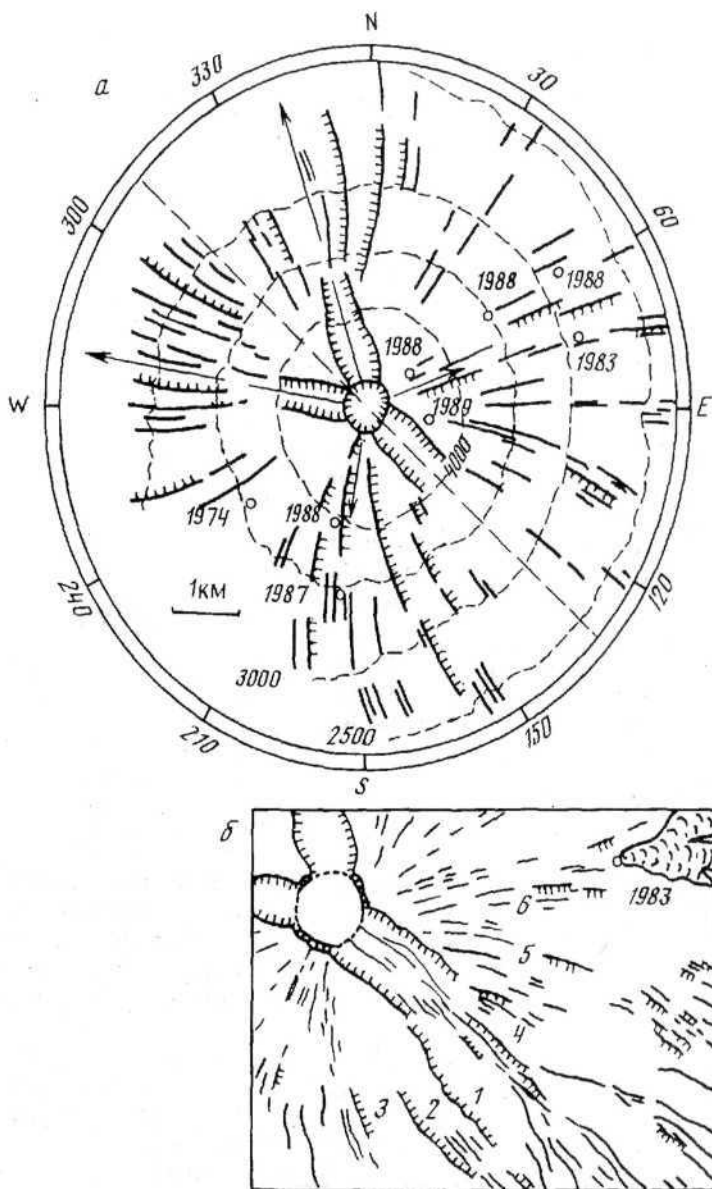


Рис. 4. Схема (а) расположения системы дуговых трещин, сбросов и побочных прорывов в привершинной части Ключевского вулкана (в зоне крутосклонного конуса). Пунктирная линия указывает ось «паукообразной» структуры, стрелки — простираение вулканотектонических желобов и направления по места концентрации побочных прорывов, б - Схема дешифрирования юго-восточных подножии вулкана (по аэрофотоснимку, сделанному 21.X. 1984 г.). Цифрами отмечены: 1—3 — первая, вторая и третья юго-западные стены, 4—6 — первая, вторая и третья северо-восточные ступи соответственно

вертикальные стенки высотой 2500 м [12]. В результате обвала на вулкане Крестовском (сопка Плоская Ближняя) сформировался цирк, вытянутый в широтном направлении (рис. 1). На вулкане Овальная Зимина в результате крупного обвала сформирован цирк размером 3х7 км. Цирк вытянут в северо-восточном направлении и, как на вулкане Камень, ограничен крутыми, местами вертикальными стенками.

Ориентировка обвалных цирков (а) и кратеров направленных взрывов (б) на вулканах Камчатки, град

Вулкан	а	б
Камбальный	45—50 СВ	210 ЮЮЗ
Ильинский	—	80 ВСВ
Желтовский	—	135 ЮВ
Ходутка	20 ССВ	—
Мутновский	45—50 СВ	—
Вилочинский	30 ССВ	—
Козельский	—	70 ВСВ
Лвачинский	—	220 ЮЮЗ
Большой Семячик	210 ЮЮЗ	—
Кихпиньч	110 ВЮВ	—
Узон	110 ВЮВ	—
Тауншиц	—	290 ЗСЗ
Плоский Толбачик	205 ЮЮЗ	—
Острый Толбачик	135 ЮВ	—
Овальная Зимина	45 СВ	—
Безымянный	—	110ВЮВ
Камень	135 ЮВ	—
Средний	135 ЮВ	—
Крестовский	90 В	—
Заречный	—	135 (?)ЮВ
Старый Шивелуч	—	145 ЮВ
Молодой Шивелуч	—	200 ЮЮЗ

Кроме описанных случаев, обширные цирки и вулканические расселины формируются также на вулканах в связи с их эксплозивной деятельностью. В северной группе вулканов к таким относятся Безымянный, Заречный, Старый и Молодой Шивелучи. В результате эксплозий на трех из этих вулканах сформированы цирки, открытые на юго-восток, а на Молодом Шивелуче — на юго-запад.

Обвалы и направленные взрывы известны на многих вулканах Камчатки. В табл. 4 суммированы данные об ориентировке цирков и кратеров, сформированных при этих процессах. Эти же данные вынесены на круговые диаграммы (рис. 5). Их анализ показывает, что обвалы на вулканах Камчатки происходят в основном вдоль направлений 20—30° ССВ, 45—50° СВ, 110° ВЮВ и 135° ЮВ. При этом неизвестно ни одного обвала, сошедшего к западу или северо-западу. Тот же вывод следует из анализа круговой диаграммы ориентировки известных на вулканах Камчатки направленных взрывов. Они происходили в направлениях: 70—80° ВСВ, 110—145° ЮВ и 200—220° ЮЗ (рис. 5). Лишь один направленный взрыв (на вулкане Тауншиц) произошел в направлении 290° ЗСЗ.

Во многих случаях устанавливается связь обвалов и направленных взрывов с региональными разрывными структурами. Так, в районе Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии вытянутая форма самой депрессии, обвалы на вулканах Узон и Кихпиньч, направленный взрыв на вулкане Тауншиц ориентированы в одном направлении — вдоль зоны Узонско-Валагинского разлома, имеющего простирание 290° ЗСЗ [10]. На вулкане Ильинском расположение побочных конусов и воронки взрыва определяется крупным Озерновским разломом широтного простирания [10]. На вулкане Мутновском ориентировка наиболее крупных обвалов определяется широкой пересекающей вулкан линейной зоной

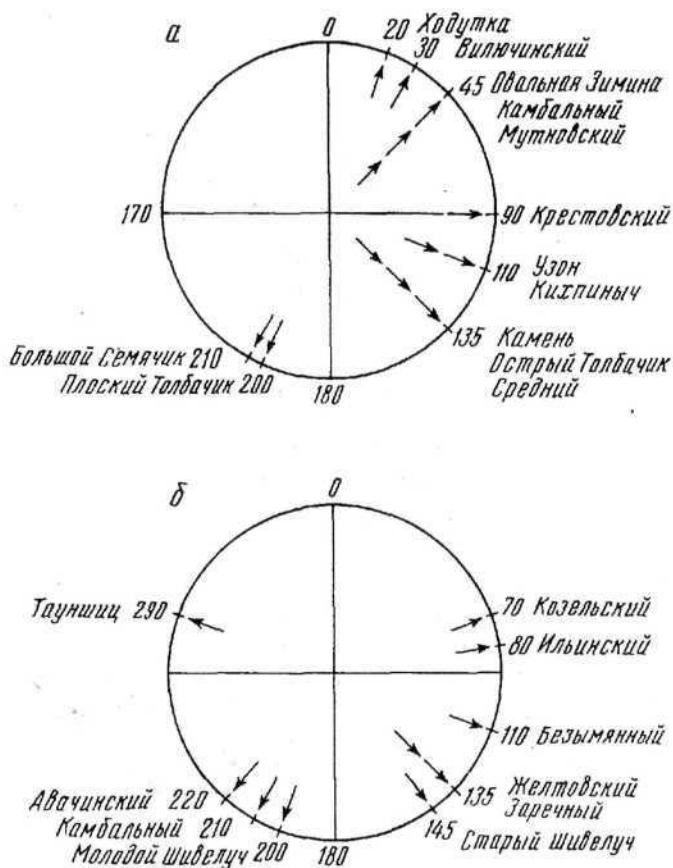


Рис. 5. Круговые диаграммы, показывающие ориентировку обвалов (а) и направленных взрывов (б) на вулканах Камчатки

(разломом) северо-восточного простирания [11]. Можно привести и другие примеры. Все они ясно показывают, что разломы, которые контролируют расположение вулканических построек и определяют многие особенности их развития, часто определяют и ориентировку происходящих на этих вулканах обвалов и направленных взрывов.

Еще одним структурным фактором, оказывающим влияние на процессы деформации вулканической постройки, является несимметричность вулканического конуса, его расположение на наклонном основании. Предполагается, в частности, что на таких вулканах, как Питон-де-ля-Фурнез (о. Реюньон) и Килауэа (о. Гавайи), подобное расположение вулканов приводит к возникновению огромных сползающих блоков [23]. Автор работы [5] показал, что возникающая при этом сила, направленная вдоль погружающейся плоскости основания, может вызвать смещение в сторону всего конуса вулкана. По-видимому, можно утверждать также, что эта сила делает предпочтительным разрушение тех склонов вулканов, наклон которых совпадает с наклоном поверхности основания. Среди Камчатских вулканов в качестве примеров можно привести расположение вулканов Камбального (на юго-юго-западном склоне крупной вулканической постройки плиоценового возраста), Таунища (на запад-северо-западном склоне более древнего вулкана Узон), вулкана Камень (на юго-восточном склоне массива сопки Плоских) и др. На всех этих вулканах разрушение их построек вследствие крупных обвалов и направленных взрывов происходило в направлении погружения поверхности основания (табл. 4). Большое значение силы тяжести, приводящей к разрушению вулканов, находящихся на наклонном основании, отмечено во многих сводках

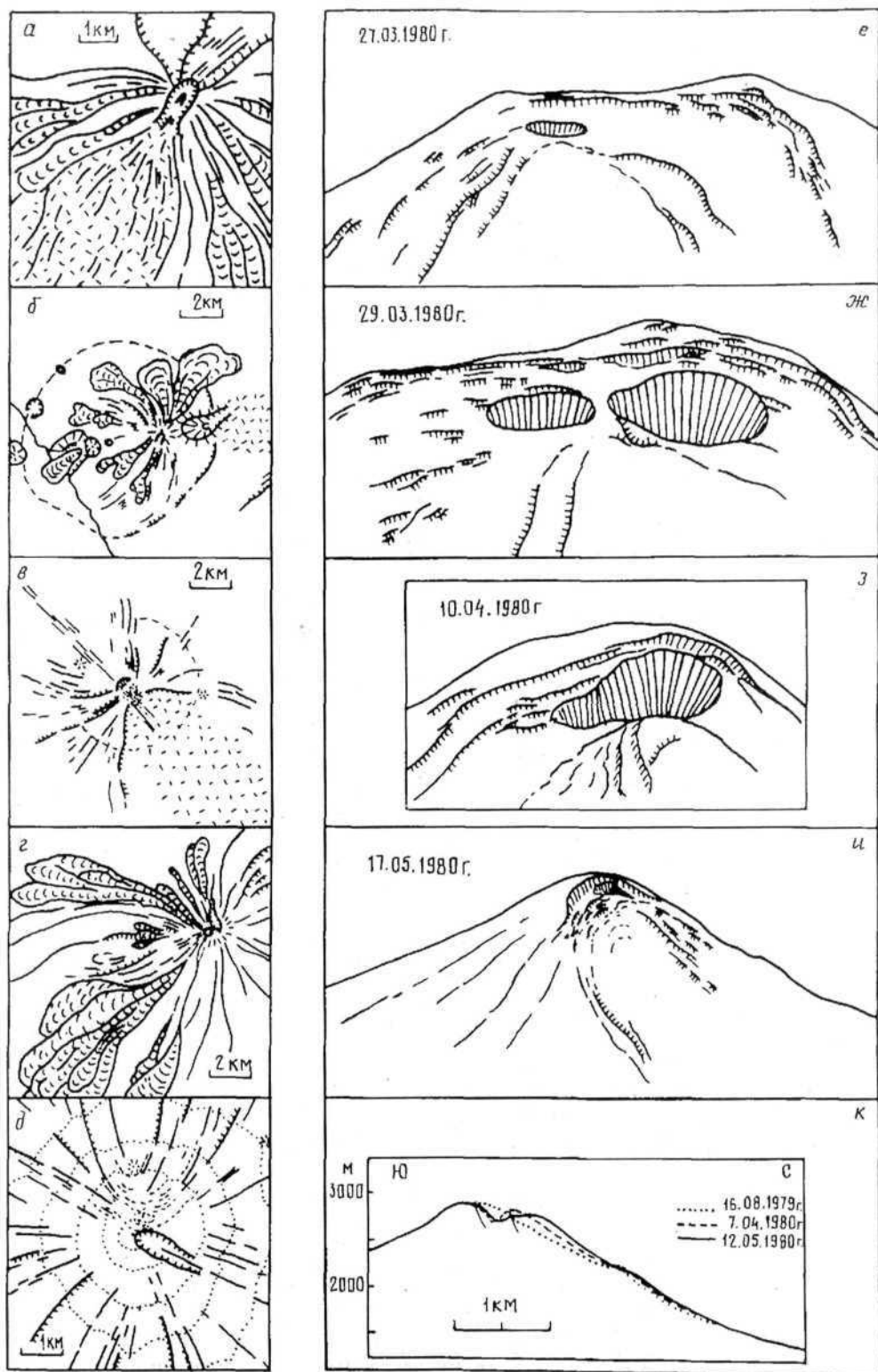


Рис. 6

по вулканологии (Р. Ван Беммелен, Г. Вильямс, И. В. Лучицкий и др.). Приведенные примеры подтверждают это.

Рассмотренные структурные факторы (разломы, контролирующие расположение вулканов, и наклон поверхности основания) позволяют в некоторых случаях достаточно точно определить вероятное место разрушения вулканической постройки и направление, в котором может произойти обвал или направленный взрыв. Существенную помощь при этом оказывает также анализ трещиноватости, развитой на склонах вулканических построек.

Для Ключевского вулкана, как показано выше, основным структурным элементом, определяющим многие особенности строения его постройки, является широкая зона сгущения линеаментов северо-западного простирания. Она трассирует, по-видимому, крупный разлом в недрах вулкана. В пределах крутосклонного конуса направление этого разлома ясно просматривается в виде осевой линии «паукообразного» структурного рисунка, сформированного системой дуговых трещин и сбросов. Подобный рисунок восстанавливается на многих вулканах Камчатки: Камбальном, Ильинском, Желтовском, Корякском и т. д. (рис. 6). Есть свидетельства существования подобных структурных рисунков и на других вулканах мира [22, 23], в том числе на вулкане Сент-Хеленс [24]. В период подготовки обвала и катастрофического направленного взрыва, происшедших на этом вулкане в 1980 г., многие трещины, образующие «паукообразный» рисунок, были обновлены заметными вертикальными смещениями (рис. 6). Во всех случаях осевая линия (или плоскость симметрии) подобных паукообразных структур совпадала с осью направленных взрывов. Таким образом, «паукообразный» рисунок может указывать не только на направление глубинной ослабленной зоны в недрах вулкана и служить прогностическим признаком, но и свидетельствовать о начавшихся (происходящих) процессах разрушения его постройки. Это определяет важность своевременного выявления и изучения «паукообразных» структурных рисунков на вулканах.

Оценка устойчивости склонов Ключевского вулкана (по структурным данным). Рассмотрим, какие поверхностные и глубинные структуры выделяются на вулкане Ключевском и какие из них могут определить процессы разрушения его постройки. Среди поверхностных структур наиболее ярко выражены вулканотектонические желоба: Крестовский, Козыревский и Апахончичский. Предполагается, что в их происхождении большую роль играли гравитационные обвалы, подобные произошедшему 2 декабря 1985 г. (при этом обвале в Крестовском желобе обрушилось 6 млн. м³ породы) [6]. Ряд исследователей считают, что именно северо-западный сектор вулкана, где расположены поблизости два желоба (Крестовский и Козыревский), наиболее опасен в отношении крупных обвалов или секторных обрушений [12, 16]. Но так ли это? Хотя на вулкане Сент-Хеленс перед крупным обвалом, повлекшим за собой катастрофический взрыв в 1980 г., существовала глубокая расселина северо-западного простирания, обвал и взрыв произошли под углом 45° к ней [24]. На вулкане Безымянном перед катастрофическим извержением 1956 г. была глубокая, вытянутая в широтном направлении впадина, а направленный взрыв произошел в юго-восточном направлении под углом 20° к широтному направлению [2, 3]. Оба эти примера

Рис. 6. Примеры (а — 9) проявления паукообразного структурного рисунка на некоторых вулканах Камчатки: а — в. Камбальный, б — в. Ильинский, в — в. Желтовский, г — в. Корякский; Э — то же на вулкане Сент-Хеленс (США); / — взрывные воронки, кратеры, лавовые куполы; 2 — лавовые потоки; 3 — пирокластические отложения направленных взрывов; 4 — разломы и трещины, е — к — элементы топографии, существовавшей перед извержением вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. [24]. Пунктирными линиями показана система разломов и трещин, возникших в период с 27 марта (начало извержения) по 18 мая (день катастрофического взрыва). Зарисовки сделаны с фотографий [24], на которых видно, как развивалась и усложнялась система трещин и дуговых сбросов на северном склоне вулкана Сент-Хеленс в период перед обвалом и катастрофическим взрывом, к — На меридиональном разрезе показано изменение рельефа северного склона в этот же период

свидетельствуют, что рассекающие вулканы трещины расселины и желоба, которые часто имеют значительные размеры, отражают лишь поверхностную трещиноватость. С ними могут быть связаны небольшие срывы и обрушения, но не крупные, катастрофические обвалы и направленные взрывы. Местоположение и направленность последних определяются глубинными магмоподводящими зонами, ориентировка которых может существенно отличаться от поверхностных структур.

В районе Ключевского вулкана такая глубинная зона, как показано выше, имеет северо-западное простираие. Следует отметить, что крупные разломы северо-западного простираия в данном районе выделяли многие исследователи. В частности, автор работы [21], рассмотрев особенности геофизических полей и строение земной коры на Камчатке, выделил здесь серию древних глубинных разломов так называемого алеутского (северо-западного) простираия и среди них Тигильско-Ключевской разлом. В работах [4, 5], анализируя космические снимки Камчатки, авторы также пришли к выводу о большой роли разломов северо-западного простираия, которые особенно ярко проявлены на хребтах, расположенных к юго-востоку и к северо-западу от Ключевской группы вулканов; отмечено, что эти разломы имеют «сквозной» характер автор работы [19] выделял широкую Кроноцко-Тигильскую зону разломов северо-западного простираия. Разломы, входящие в нее, он считал реликтами более древних (мезозойских) структур, которые испытывали периодическую активизацию вплоть до четвертичного времени. Разлом северо-западного простираия, проходящий через Ключевской вулкан, отмечен также в работе [1]. Он рассматривался как сброс с опущенным северо-восточным крылом.

Изучение сети линеаментов, проведенное автором настоящей работы, показало, что разлом северо-западного простираия, к которому приурочен Ключевской вулкан, отчетливо проявлен в виде зоны сгущения линеаментов. В верхних этажах земной коры он представляет собой широкую зону растяжения и, судя по приуроченности к нему эпицентров землетрясений, предваивших побочные прорывы последних лет, движения по разлому продолжаются и он выступает в настоящее время как наиболее активная тектоническая структура данного района.

Определив направление этой основной для Ключевского вулкана структурной линии, отметим также, что вулкан расположен на юго-восточном склоне крупного щитового вулкана Ушковского (или Плоского) [17, 20]. Эти факторы делают предпочтительным разрушение его юго-восточного склона. Иметьшо на нем могут произойти крупная просадка, провал или обрушение, подобные имеющимся на вулканах Этна, Питон-де-ля-Фурнез или на соседнем вулкане Камень, причем формирование просадки, по-видимому, может быть как катастрофическим, так и постепенным. Начало ее формирования может проявиться в активизации движений по системе дуговых трещин и сбросов, как это было перед обвалом на вулкане Сент-Хеленс [24]. Есть ли в настоящее время признаки активизации подобной системы трещин на Ключевском вулкане? Все последние побочные прорывы (Предсказанный, Предвиденный, XXV-летия ИВ, Скуридина) формировались на трещинах, которые рассматривались, как радиальные. В то же время в целом они объединяются в дугообразную зону, расположенную (симметрично относительно северо-западного направления). Это позволяет высказать предположение, что побочные прорывы 1980-х гг. на Ключевском вулкане фиксируют собой начавшую формироваться дугообразную зону отрыва, вдоль которой в дальнейшем могут произойти просадка или обрушение юго-восточной части конуса. Примером такой возможной просадки может служить депрессия Балле дель Бове на вулкане Этна [25]. Исследования последних лет показали, что локализация и ориентировка исторических эруптивных трещин и питающих даек на Этне контролируются гравитационными напряжениями [27]. Дайки внедряются по трещинам вдоль края депрессии Балле дель Бове и свидетельствуют о продолжающемся ее расширении [28].

Возможность возникновения крупных обвалов на северо-западных склонах Ключевского вулкана, как это предполагалось в работах [12, 16], с точки зрения

автора настоящей работы мала (речь идет именно о крупных обвалах, ведущих к разрушению постройки). Во-первых, как уже отмечено, вулкан расположен на наклонном основании, что делает предпочтительным разрушение его юго-восточного склона. Во-вторых, проведенный анализ распространения обвалов на вулканах Камчатки показал, что не было ни одного крупного обвала, происшедшего на северных, северо-западных или западных склонах указанных вулканов. В-третьих, как показано выше, поверхностные структуры (а описанные желоба относятся именно к таким структурам) обычно не оказывают существенного влияния на разрушение вулканических построек. Это может быть только в том случае, когда поверхностные и глубинные структуры совпадают по простиранию. Такое совпадение есть лишь для Апахончичского желоба.

Выводы. 1. По распространению линеаментов в изученном районе уверенно выделяются линейные и дуговые зоны. Линейные зоны рассматриваются как зоны тектонической трещиноватости, отражающие существование региональных линейных структур (крупных разломов, зон растяжения, погребенных грабенов), дуговые зоны — как участки, где преобладает влияние вулканических построек. Последние накладываются на линейные структуры, затушевывая их влияние. По срезанию одних линейных структур другими можно определить возраст их последней активизации. По этому признаку широтные и меридиональные структуры определяются как наиболее древние. Они срезаются структурами северо-восточного простирания, а последние в свою очередь срезаются структурами северо-западного простирания, которые являются наиболее молодыми.

2. Линеаменты в дуговой зоне, охватывающей восточные подножия Ключевского вулкана, отражают в основном радиальные направления, связанные с растрескиванием самой постройки вулкана. Региональные линейные структуры отражены в сети линеаментов в этой зоне лишь в той мере, в какой они совпадают с радиальными направлениями. Непосредственные замеры тектонической трещиноватости, проведенные в указанной зоне, позволили выявить зону трещин северо-восточного простирания, которая не проявлена в сети линеаментов. В то же время, трассируясь за пределы дуговой зоны, вне ее, тектоническая трещиноватость совпадает с сетью линеаментов.

3. Распространение вулканических линеаментов у подножия и на склонах Ключевского вулкана в общих чертах согласуется с особенностями распространения невулканических линеаментов: в зоне дальних подножий их простирание в основном соответствует простиранию региональных структур, а в зоне ближних подножий — радиальным трещинам. Особо выделяется зона крутосклонного конуса (выше 2500 м), где вулканические линеаменты и вулcano-тектонические желоба создают структурный рисунок, симметричный относительно осевой плоскости северо-западного простирания (310° СЗ). Дешифрирование аэрофотоснимков позволило выявить в этой зоне систему дуговых трещин и сбросов, образующую характерный «паукообразный» рисунок, свидетельствующий о гравитационном оседании и растяжении конуса, ориентированном поперек к северо-западному направлению.

4. Анализ роев землетрясений, предварявших побочные прорывы 1980, 1987, 1988 и 1989 годов, позволяет сделать вывод, что во всех случаях эпицентральной области были вытянуты в северо-западном направлении. Отмечена также миграция очагов землетрясений вдоль этого направления. Эти данные дополняют заключение, сделанное на основе анализа сети линеаментов, о большом значении зоны северо-западного простирания, пересекающей Ключевской вулкан, и свидетельствуют о ее современной активности.

5. Анализ структурной позиции известных обвальных и взрывных цирков на вулканах Камчатки показал, что последние ориентированы в основном в восточных румбах. Нет ни одного обвала, сошедшего на запад и северо-запад. Основные факторы, которые могут влиять на ориентировку крупных обвалов и направленных взрывов — региональные разломы и несимметричность вулканических построек. Последняя связана с расположением вулканов на наклонном основании.

6. Для более точных прогнозов возможных процессов разрушения вулканических построек необходимо различать поверхностные и глубинные структуры. Первые часто ярко выражены, но они не определяют возникновение и характер катастрофических явлений на вулканах (крупных обвалов и направленных взрывов). Эти явления контролируются глубинными структурами, которые могут быть проявлены на склонах вулкана в виде характерной системы дуговых трещин и сбросов «паукообразного» рисунка.

7. Возможное разрушение Ключевского вулкана определяется его приуроченностью к юго-восточному склону крупного древнего вулкана Ушковского (Плоского) и к региональному активному в последние годы разлому северо-западного простирания. Оно будет связано скорее всего с оседанием или обвалом юго-восточного сектора, вулкана, где в последние годы, по-видимому, уже началось формирование системы духовых трещин и сбросов, которые фиксируются побочными прорывами последнего десятилетия.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 93-05-8222) и Администрации Камчатской области (договор 15).

Автор признателен С. А. Федотову за внимание и постоянный интерес к работе, а также С. А. Хубуная и Н. А. Жаринову за помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балеста С. Т., Иванов Б. В., Утнасин В. К., Аносов Г. И. Строение земной коры района Ключевой группы вулканов, особенности тектоники и вулканизма//Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевой группы вулканов. Владивосток, 1976. С.7—16.
2. Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и его экструзивные образования//Бюл. вулканол. станций. 1957. № 26.
3. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955—1963 гг.). М.: Наука, 1965. 172 с.
4. Гусев П. А. Вулкано-тектоническая схема Восточной Камчатки//Святловский Л. Е. Региональная вулканология. М.: Недра, 1975. 20 с.
5. Гусев Н. А., Двигало В. П., Разина А. А. Дистанционные методы при изучении Толбачинского извержения//Вулканология и сейсмология. 1979. № 2. С. 27—442.
6. Двигало В. П. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана в 1968—1988 гг.//Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 3—18.
7. Жаринов Н. А., Горельчик В. И., Жданова Е. Ю. и др. Извержения северной группы вулканов в 1988—1989 гг., сейсмологические и геодезические данные//Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 3—33.
8. Зобин В. М. Динамика роя вулканических землетрясений, предвещающих латеральные извержения вулканов//Геодинамика и вулканизм островных дуг северо-западного сектора Тихоокеанского кольца. М.: Сов. радио, 1978. С. 24—32.
9. Изучение тектонических структур//Методическое пособие по геологической съемке 1 : 50 000. Вып. 16. Л.: Недра, 1984. 287 с.
10. Леонов В. Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.
11. Лоншаков Е. А. Ряды вулкано-тектонических структур и структурно-вещественные парагенезисы Южно-Камчатского района//Бюл. вулканол. станций. 1979. № 57. С. 79—91.
12. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А. Гигантские обвалы на вулканах//Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 14—23.
13. Пийп Б. И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом//Тр. Лаб. вулканологии. Вып. 11. 1956. 312 с.
14. Токарев П. И. Извержение вулкана Сент-Хеленс в марте — августе 1980 г.//Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 104—106.
15. Токарев П. И. Динамика и большие деформации вулканов//Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 53—64.
16. Федотов С. А., Хренов А. П., Жаринов П. А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932—1986 гг. и возможное развитие//Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3—16.
17. Хренов А. П., Двигало В. П., Кирсанов И. Т. и др. Вулкан Ключевской//Действующие вулканы Камчатки. Т. I. М.: Наука, 1991. С. 106—145.
18. Хубуная С. А., Богоявленский С. О., Повгородцева Т. Ю., Округина А. М. Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана//Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46—68.

19. *Шанцер А. Е.* Некоторые особенности эволюции тектоно-магматических структур Камчатки в зависимости от ее блокового строения и движения блоков в позднем кайнозое//Бюл. вулканол. станций. М.: Наука, 1979. № 57. С. 53—65.
20. *Шеймович В. С.* Результаты сравнения вулканов северной части Ключевской группы по петрохимическим данным//Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 109—112.
21. *Яроцкий Г. П.* Некоторые особенности геофизических полей и строения земной коры Корякско-Камчатского региона//Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 45—46.
22. *ChevaUier L., Verwoerd W. J.* A numerical model for the mechanical behavior of intraplate volcanoes//J. Geophys. Res. 1988. V. 93. B5. P. 4182—4198.
23. *Duffield W. A., Siitljes L., Varet J. Varet J.* Huge landslide blocks in the growth of Piton de la Fournaise, La Reunion and Kilauea volcano, Hawaii//J. Volcanol. Geotherm. Res. 1982. V. 12. P. 147—160.
24. *Foxworthy B. L., Hill M.* Volcanic eruptions of 1980 at Mount St. Helens. The first 100 days//Geol. Survey Prof. Paper 1249. Washington, 1982. 125 p.
25. *Guest J. E., Chester D. K., Duncan A. M.* The Valle del Bove, Mount Etna: its origin and relation to the stratigraphy and structure of the volcano//J. Volcanol. Geotherm. Res. 1984. V. 21. P. 1—23.
26. *Lo Giudice E., Patane G., Rasa R., Romano R.* The structural framework of Mount Etna//Mem. Soc. Geol. It. 1982. V. 23. P. 125—158.
27. *McGuire W. J., Pullen A. D.* Location and orientation of eruptive fissures and feeder-dykes at Mount Etna: influence of gravitational and regional tectonic stress regimes//J. Volcanol. Geotherm. Res. 1989. V. 38. P. 325—344.
28. *McGuire W. J., Pullen A. D., Sanders S. J.* Recent dyke-induced large-scale block movement at Mount Etna and potential slope failure//Nature. 1990. V. 343. P. 357—359.
29. *Rasa R., Romano R., la Giudice E.* A structural survey of Mt. Etna on a morphologic basis//Mem. Soc. Geol. It. 1982. V. 23. P. 117—124.
30. *Siebert L.* Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits and associated eruptions//J. Volcanol. Geotherm. Res. 1984. V. 22. P. 163—197.
31. *Ui T., Yamato H., Susuki-Kamata K.* Characterization of debris avalanche deposits in Japan//J. Volcanol. Geotherm. Res. 1986. V. 29. P. 231—243.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
01.12.1993