

П. И. ТОКАРЕВ

**О СВЯЗИ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ
И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
В КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЕ**

**РАСПОЛОЖЕНИЕ ВУЛКАНОВ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ
И ИХ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.
ОСТРОВНЫЕ ДУГИ ТИХОГО ОКЕАНА**

Побережье Тихого океана является главной областью вулканической деятельности на земном шаре. Из 522 действующих вулканов 322 (около 62%) приходится на область Тихого океана, причем только небольшая их часть находится в центре океана, на островах, а остальные приурочены к узкой полосе побережья, образуя Тихоокеанский вулканический пояс, охватывающий кольцо весь Тихий океан.

По строению восточная и западная части Тихоокеанского вулканического пояса резко различны. Американский берег образует сравнительно ровную линию, вдоль которой воздымаются непрерывные горные цепи, азиатский же материк окаймляется гирляндами островов, расположенных дугообразно, к которым и приурочена современная вулканическая деятельность.

Островные дуги обладают рядом общих для них особенностей. Они непрерывной цепью охватывают Азиатский материк с востока и юго-востока, причем все обращены вогнутой стороной к материку. По их внешнему краю расположены глубоководные узкие впадины. Они сопровождаются поясами крупных нарушений изостатического равновесия. В непосредственной близости от них лежат зоны самой сильной и активной сейсмической деятельности. Глубокофокусные землетрясения также связаны с островными дугами.

Почти вся современная вулканическая деятельность восточной и юго-восточной Азии сосредоточена на этих островных дугах (Заварицкий, 1952).

Островные вулканические дуги являются зонами наиболее интенсивных современных тектонических движений, поэтому, как указывал А. Н. Заварицкий (1952), их изучение имеет первостепенное значение для понимания как прошлых, так и современных тектонических движений, горообразовательных процессов и вулканизма. Курило-Камчатская дуга в этом отношении представляет наибольший интерес, так как она наиболее проста по строению в сравнении с другими островными дугами и потому она наиболее удобна для изучения.

Строение Курило-Камчатской геоструктурной дуги

Большую часть рассматриваемой нами зоны занимает Курило-Камчатская геосинклинальная область, расположенная между дном северо-западной части Тихого океана и дном Охотского моря, а также областью третичной складчатости средней части Камчатки и Сахалина. Пояс поднятия этой геосинклинальной области, проходящий по Большой Курильской гряде и Восточно-Камчатскому хребту, с обеих сторон ограничен прогибами: с юго-востока — Курило-Камчатской глубоководной впадиной, а с северо-запада — глубоководным бассейном Охотского моря и депрессией долины р. Камчатка.

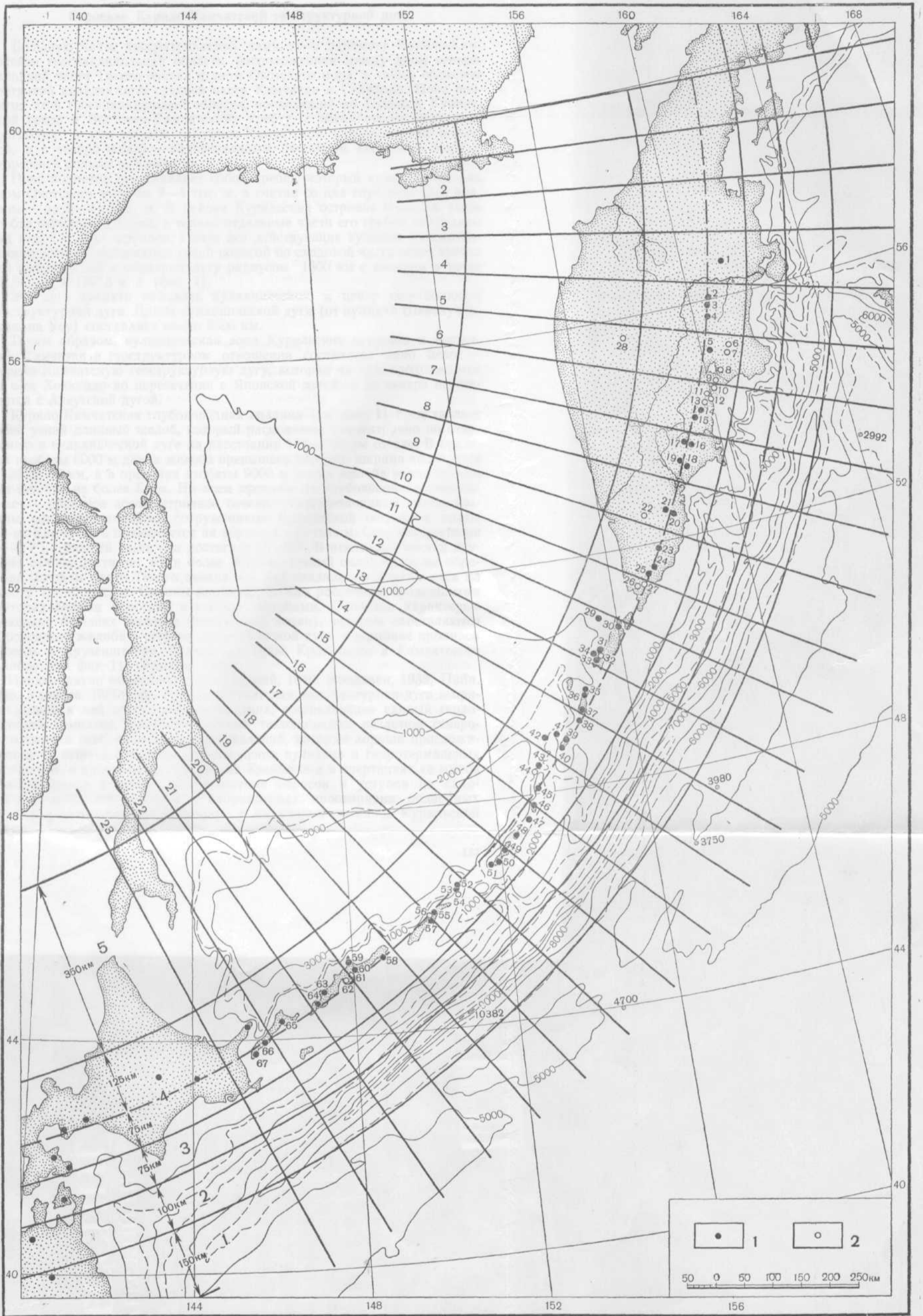
Пояс поднятия представляет собой хребет, который возвышается над дном Охотского моря на 2—4 тыс. м, а считая со дна глубоководной впадины — на 8—11 тыс. м. В районе Курильских островов большая часть хребта скрыта под водой, и только отдельные части его гребня выступают над водой в виде островов. Почти все действующие вулканы рассматриваемой зоны располагаются узкой полосой по сводовой части этого хребта или близко к ней и образуют дугу радиусом 1800 км с центром в точке $56^{\circ},5$ с. ш. и $130^{\circ},5$ в. д. (фиг. 1).

Эту дугу принято называть вулканической, а центр ее — полюсом геоструктурной дуги. Длина вулканической дуги (от вулкана Шевелуч до вулкана Усу) составляет около 2300 км.

Таким образом, вулканическая зона Курильских островов и восточной Камчатки в геоструктурном отношении составляет одно целое — Курило-Камчатскую геоструктурную дугу, которая на юге продолжается на о-ве Хоккайдо до пересечения с Японской дугой, а на севере пересекается с Алеутской дугой.

Курило-Камчатская глубоководная впадина (см. фиг. 1) представляет собой узкий длинный желоб, который расположен концентрично по отношению к вулканической дуге на расстоянии 170—200 км от нее. В пределах изобаты 6000 м длина желоба превышает 2000 км, ширина колеблется от 20 до 60 км, а в пределах изобаты 9000 м длина желоба равна 550 км при ширине не более 5 км. На всем протяжении глубоководная впадина имеет V-образное ассимметричное сечение. Северо-западный склон впадины образован горными сооружениями Курильской островной гряды и п-ва Камчатка и поднимается на высоту 8—11 тыс. м. Средняя крутизна его — 7° , в нижней части она достигает $15\text{--}20^{\circ}$. В некоторых местах крутизна склона достигает 40° и более. Юго-восточный склон впадины образован склоном плато Тихого океана. Со дна впадины он поднимается на высоту 2,5—5 тыс. м. Склоны впадины сложно расчленены продолжными крутопадающими сбросами и узкими желобами. Особенно характерны несколько больших желобов (подводных долин), которые ответвляются от основного желоба в сторону вулканической дуги — в районе проливов Буссоль и Крузенштерна, Авачинской губы, Кроноцкого и Камчатского заливов (см. фиг. 1), (Удинцев, 1955).

Неоднократно отмечалось (Заварицкий, 1940; Влодавец, 1939; Пийп, 1946; Удинцев, 1955), что Курило-Камчатская геоструктурная дуга и примыкающая к ней глубоководная впадина, составляющие единый геологический комплекс, разбиты системой тектонических разломов северо-восточного и северо-западного направлений, которые хорошо прослеживаются на суше в линейном расположении вулканов и гидротермальных источников, в направлении сбросов на Камчатке и в очертаниях ее мысов и полуостровов, а под водой — в системе сбросов и уступов на склонах глубоководной впадины, в направлениях простираения подводных долин и в расположении подводных и надводных вулканов Курильской гряды.



Фиг. 1. Карта вулканов Курило-Камчатской дуги и схема разделения вулканической зоны на пояса и секторы.

1—вулканы, действовавшие с 1700 по 1954 г., 2 — вулканы, находящиеся в состоянии сольфаторной деятельности.
 Вулканы: 1— Шивелуч; 2 — Ключевской; 3 — Безымянный; 4 — Плоский Толбачик; 5 — Кизимен; 6 — Комарова; 7 — Гамчен; 8 — Кроноцкий; 9 — Крашенинникова; 10 — Кихпиньч; 11 — Узон; 12 — Бурлящий; 13 — Центральный Семьячик; 14 — Малый Семьячик; 15 — Карымский; 16 — Жупановский; 17 — Дзензурский; 18 — Авачинский; 19 — Корякский; 20 — Мутновский; 21 — Горелый хребет; 22 — Опала; 23 — Ксудач; 24 — Желтовский; 25 — Ильинский; 26 — Кошелева; 27 — Камбалный; 28 — Ичинский; 29 — Ала-

ид; 30 — Эбеко; 31 — Чикурачки; 32 — Татаринова; 33 — Карпинского; 34 — Фусса; 35 — Асырминтар; 36 — Немо; 37 — Креницына; 38 — Севергина; 39 — Синарка; 40 — Кунтоминтар; 41 — Экарма; 42 — Чиринотан; 43 — Райкоке; 44 — Сарычева; 45 — подводные вулканы 1924 года; 46 — Расшуа; 47 — Ушишир; 48 — Палласа; 49 — Прево; 60 — Заварицкого; 51 — Горящая сопка; 52 — Черного; 53 — Сноу; 64 — Брат Чирпоев; 55 — Трезубец; 56 — Берга; 57 — Колокол; 58 — Кудрявый; 59 — Чирип; 60 — Баранского; 61 — Тебенькова; 62 — Иван Грозный; 63 — Атсонупури; 64 — Берутарубе; 65 — Тятя-66 — Менделеева; 67 — Головнина.

Распределение силы тяжести

Изолинии аномалий Фая силы тяжести в Курило-Камчатской зоне, как отмечает А. Г. Гайнанов (1955), располагаются концентрично вулканической дуге, повторяя расположение аномалий в других островных дугах (Заварицкий, 1952). Вдоль всей Курило-Камчатской дуги тянется узкая полоса больших положительных аномалий, местами достигающих + 200 мгл. На севере она отделяется от зоны положительных аномалий Алеутской дуги (у о-ва Беринга + 120 мгл) зоной отрицательных аномалий (— 240 мгл). Над глубоководной впадиной лежит полоса отрицательных аномалий, в некоторых местах достигающих 300 мгл. На севере, у Командорских островов, эта зона сливается с зоной отрицательных аномалий Алеутской глубоководной впадины. За впадиной, над дном Тихого океана аномалии силы тяжести близки к нормальным (0; + 40 мгл).

Аномалии Буге также распределяются концентрично вулканической дуге. Они достигают +120 мгл над Курильскими островами и уменьшаются на юге дуги (о-ва Хоккайдо) до + 40 мгл. Над северо-западным склоном впадины аномалии Буге имеют небольшой минимум, а далее на юго-восток быстро возрастают, достигая максимума (+ 400 мгл) над юго-восточным склоном впадины. Далее к юго-востоку, над дном океана, они несколько уменьшаются (до + 280 и + 320 мгл).

Расположение вулканов

Большая Курильская гряда и восточная Камчатка — области очень активной современной вулканической деятельности. Очевидно, совсем недавно прекратилась вулканическая деятельность в Срединном хребте Камчатки, где еще и сейчас один вулкан (Ичинский) проявляет следы сольфатарной деятельности. Но мы не будем в своей работе принимать его во внимание, так как в Срединном хребте активная вулканическая деятельность уже прекратилась и сейчас сосредоточена только в восточной части Камчатки.

По последним данным (Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, 1957), в восточной Камчатке и на Большой Курильской гряде имеется 66 действующих вулканов (вулканы о-ва Хоккайдо мы не рассматриваем). Кроме того, по данным В. И. Влодавца (1949) и Г. С. Горшкова (1954), в восточной Камчатке (южнее вулкана Швелуч) находится 83, а на Курильских островах 43 потухших вулкана.

Все действующие вулканы располагаются неширокой дугообразной полосой, образуя Курило-Камчатскую вулканическую дугу. Некоторые вулканы Курильской гряды приурочены к внутренней части дуги и поднимаются прямо со дна Охотского моря на высоту 2—3 тыс. м. Остальные вулканы лежат на гребне подводного хребта. На Камчатке цепь вулканов тянется вдоль восточного берега полуострова — от мыса Лопатка до Кроноцкого озера, образуя своеобразный хребет, который в средней части (от Авачинской бухты до Кроноцкого озера) расположен к востоку от Восточно-Камчатского хребта. Далее эта цепь идет прямо на север, пересекая хр. Тумрок, а затем опять поворачивает на северо-восток, но уже западнее гр. Кумроч. Все эти отклонения в расположении вулканов от дуги невелики, если рассматривать всю вулканическую дугу в целом, и носят частный характер. В общем же вся цепь действующих вулканов Камчатки, Курильских островов и о-ва Хоккайдо образует правильную дугу.

Это подтверждается данными табл. 1, в которой дается распределение вулканов в зависимости от их отклонения от вулканической дуги (без о-ва Хоккайдо).

Из табл. 1 следует, что преобладающее большинство вулканов (82%) лежит в полосе шириной 50 км (0 ± 25). Среднее отклонение вулканов от проведенной нами дуги равно 15,6 км. Максимальное отклонение имеют вулканы Чиринкотан (-47 км) и Алаид (-55 км).

Таблица 1

Отклонение в расположении вулканов от вулканической дуги

Интервал отклонения, км	Число вулканов в интервале	%
0 ± 5	— 29	44
6—15	+ 8 } — 5 }	13
16—25	+ 6 } — 6 }	12
26—35	+ 3 } — 1 }	4
36—45	+ 5 } — 1 }	6
46—55	+ 0 } — 2 }	2
Всего	66	100

Неоднократно отмечалось (Заварицкий, 1940; Влодавец, 1949; Горшков, 1954), что вулканы Камчатки располагаются рядами, в двух направлениях: главное из них — северо-восточное, вдоль простираения дуги; второе — северо-западное, поперечное первому. Линейность расположения вулканов объясняется существованием системы тектонических разломов двух указанных направлений.

Так как вулканы обычно располагаются узкими полосами, мерой активности вулканических дуг принято считать линейную плотность вулканов, которая определяется как отношение числа действующих вулканов дуги к ее протяженности, выраженной в километрах. В табл. 2 приведена линейная плотность вулканов Курило-Камчатской дуги в целом (без о-ва Хоккайдо) и отдельных ее частей.

Таблица 2

Линейная плотность вулканов Курило-Камчатской дуги

Район вулканической дуги	Длина интервала, км	Число вулканов		Линейная плотность вулканов	
		всех	действующих	всех	действующих
Камчатка: от вулкана Шевелуч до мыса Лопатка (только восточная зона)	700	110	27	0,157	0,039
Курильские острова: от мыса Лопатка до пролива Измена . .	1200	82	39	0,068	0,032
Курило-Камчатская дуга: от вулкана Шевелуч до пролива Измена (включая только восточную зону Камчатки)	1900	192	66	0,101	0,035

По данным А. Н. Заварицкого (1940), линейная плотность вулканов для всего Тихоокеанского вулканического пояса равна 0,007. Отсюда видно, что Курило-Камчатская дуга является одной из наиболее активных частей Тихоокеанского вулканического пояса.

Деятельность вулканов за период с 1900 по 1955 год

Все сведения о деятельности вулканов рассматриваемой зоны взяты из различных источников (Влодавец, 1946; 1949; Кулаков, 1936; Горшков, 1954; Пийп, 1956) и уточнены по изданному «Каталогу действующих вулканов СССР» (Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, 1954), который является последней, притом наиболее полной и достоверной сводкой о деятельности вулканов СССР в историческое время.

Из 66 действующих вулканов Курило-Камчатской зоны относительно 50 (16 на Камчатке и 34 на Курилах) известны извержения за период с 1700 г. по 1956 г., из них только 33 (14 на Камчатке и 19 на Курилах) проявляли активность (включая и слабые выбросы пепла) в период с 1900 по 1955 г.

Остальные 17 вулканов (12 на Камчатке и 5 на Курилах) находятся в состоянии сольфатарной деятельности.

В отношении дат извержений Курило-Камчатских вулканов за последние 55 лет сводку можно считать достаточно полной. Если и имеются пропуски извержений некоторых вулканов, то они незначительны. Но в смысле характеристики извержений имеющиеся сведения неполны, и по ним нельзя дать количественную оценку энергии извержений. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка хотя бы ориентировочно разделить их на несколько групп по интенсивности. При этом основным источником сведений являлись имеющиеся в сводках описания характера извержений. Здесь, конечно, возможны большие ошибки, так как различные наблюдатели по-разному воспринимали и оценивали силу извержения. Но исходя из того, какие продукты извергались, на какой площади они распространялись, каков характер извержения, их все же грубо можно разделить на четыре группы.

В табл. 3 дается сводка извержений вулканов Курило-Камчатской дуги. После названия вулкана в скобках стоит цифра, соответствующая номеру в «Каталоге действующих вулканов СССР» (Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, 1957). После даты извержения стоят буквы, первая из которых обозначает группу извержения, а вторая — характер извержения (Л — излияние лавы; К — образование купола). Если происходило только эксплозивное извержение, то вторая буква не ставится.

Большие извержения (в табл. 3 обозначены буквой Б): выброс большого количества рыхлого материала, который выпадает на большой площади; выбросы множества раскаленных бомб; излияние значительного количества лавы или образование лавового купола; прорыв паразитных кратеров и излияние из них лавы; грохот и ощутимые землетрясения при извержении в районе вулкана.

Малые извержения (М): не очень значительные выбросы рыхлых продуктов, которые не распространяются на большие расстояния; выброс раскаленных бомб в незначительном количестве; небольшие излияния лавы.

Очень слабые извержения (Д): очень слабые кратковременные выбросы пепла без вулканических бомб и свечения над кратером; усиление fumarальной деятельности.

Извержения, о которых ничего не известно, кроме указания на то, что они происходили в таком-то году (А).

Хронология извержений вулканов Курило-Камчатской дуги за 1900—1955 гг.

Вулканы	№ по каталогу	Год извержения и активность
Шевелуч	(1)	1925Д, 1928А, 1930А, 1944Д, 1945—1950МК
Ключевской	(2)	1904БЛ, 1907АЛ, 1909М, 1910М, 1911М, 1913А, 1915БЛ, 1922М, 1923БЛ, 1925М, 1926М, 1929БЛ, 1931М, 1932БЛ, 1933М, 1935М, 1936М, 1937БЛ, 1938БЛ, 1939М, 1944М, 1945БЛ, 1946БЛ, 1951БЛ, 1953БЛ, 1954Д.
Безымянный	(3)	1955Б.
Плоский Толбачик	(4)	1904БЛ, 1931А, 1939М, 1940М, 1941БЛ, 1947Д, 1949Д, 1954Д.
Кизимен	(5)	1925Д, 1927М, 1928Д.
Малый Семячик	(14)	1944Д, 1945М, 1946Д, 1952М.
Карымский	(15)	1908А, 1911А, 1912Д, 1915А, 1921А, 1923А, 1925А, 1929А, 1932А, 1933А, 1934М, 1935БЛ, 1938А, 1940А, 1943А, 1945БЛ, 1946Б, 1947М, 1952Б, 1955А.
Жупановский	(17)	1925М, 1929А, 1940Б.
Авача	(19)	1901БЛ, 1909БЛ, 1926БЛ, 1938БЛ, 1945Б.
Горелый хребет	(21)	1929Б, 1930М, 1931М, 1947Д,
Мутновский	(22)	1904БЛ, 1916М, 1917М, 1927Б, 1928М, 1929Д, 1938Д, 1939М, 1945М, 1952А
Ксудач	(23)	1907Б.
Желтовский	(24)	1923Б.
Ильинский	(25)	1901Б.
Алаид	(29)	1933Б, 1934БЛ.
Эбеко	(30)	1934Б, 1935М.
Кальдера Карпинского	(33)	1952Д.
Асырмнтар	(35)	1938М.
Немо	(36)	1906А.
Креницына	(37)	1952БЛ.
Севергина	(38)	1931М, 1933БК.
Кунтоминтар	(40)	1953Д, 1954Д.
Райкоке	(43)	1924Б.
Подводный	(44)	1924Б.
Сарычева	(45)	1928М, 1930Б, 1946Б, 1954МК.
Расшуа	(46)	1946Д.
Палласа	(47)	1924А.
Кальдера Заварицкого	(50)	между 1916 и 1931 годом образовались лавовые куполы, БЛ.
Горячая сопка	(51)	1914Б, 1944А.
Берга	(56)	1946А, 1951М, 1952Д.
Кудрявый	(58)	1946М.
Баранского	(60)	1951Д.
Атсонупури	(63)	1932А.

При разделении на группы совсем не учитывается продолжительность извержения (происходит она весь год или только несколько дней), но для тех извержений, которые продолжаются несколько лет подряд, такая характеристика дается для каждого года. В тех случаях, когда непродолжительное извержение происходит на границе двух годов, например в декабре и январе, оно относится к году его начала, а во второй год относится к третьей группе (Д).

Таблица 4

Распределение извержений по группам

Район	Число извержений группы				
	Б	М	Д	А	Всего
Камчатка	30	32	14	20	96
Курилы	11	7	6	5	29
Вся дуга	41	39	20	25	125

Из табл. 4 следует, что около трех четвертей всех извержений произошло на Камчатке. Это соотношение извержений вулканов Камчатки и Курил сохраняется во всех группах извержений. Для 80% всех извержений определена группа их интенсивности, остальные 20% извержений (группа А) могут быть отнесены к любой из первых трех групп, но более вероятно, что они относятся ко второй (М) или третьей группе, так как о более сильных извержениях всегда бывают подробные сведения.

Данные табл. 3 характеризуют активность вулканов в течение каждого календарного года. Так как энергетическую оценку извержений мы дать не можем, то такая характеристика активности вулкана является единственно возможной, т. е. мы будем судить об активности вулкана по числу годов, в которые он находился в состоянии активной деятельности, вне зависимости от продолжительности извержений, ибо на основании имеющихся у нас данных мы не можем ее учитывать.

Так как в большинстве случаев извержения длятся не более года, число извержений вулкана почти совпадает с числом годов, в которые происходили извержения. Поэтому, чтобы не употреблять длинного названия, мы будем пользоваться термином «извержение», понимая под ним активное состояние вулкана в течение календарного года. Если вулкан в течение данного года проявлял активность, будем считать, что в этом году произошло одно извержение, независимо от того, продолжалось ли оно одну неделю (и даже несколько дней) или несколько месяцев. Если вулкан проявлял активность в течение нескольких лет подряд, будем считать, что в каждый из этих годов произошло по одному извержению.

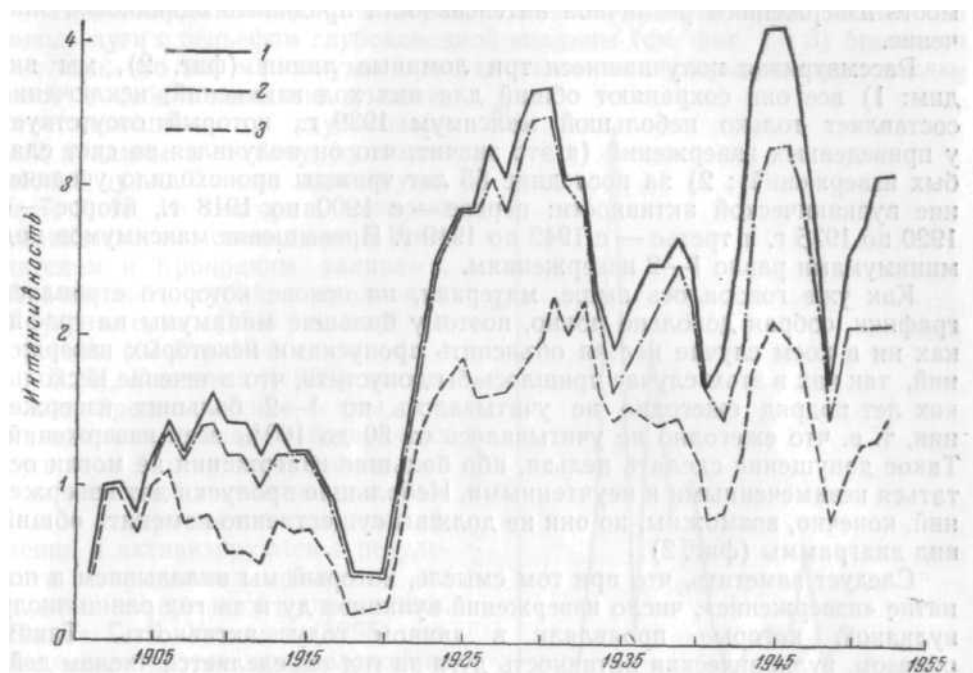
Активность вулкана определяется частотой извержений или средним периодом извержений [временем (годы) между началами двух смежных извержений]. Самыми активными вулканами на Камчатке являются Ключевской (2,1), Карымский (2,7), Мутновский (7,0), Авача (11), а на Курилах — пик Сарычева (14)¹.

Периодичность вулканической активности

Чтобы проследить за тем, как изменялась во времени вулканическая активность дуги, нами были составлены графики распределения по годам извержений вулканов всей дуги. Они получились сильно изломанными,

¹ В скобках после названия вулкана дается средний период извержения за последние 55 лет [1901—1955 гг.]

так как бывает, что в один год происходит несколько извержений, а в другой их нет совсем. Для того чтобы сгладить эти кривые, нами был применен метод скользящего среднего. Осреднение производилось по пятилетиям (для каждого года бралось среднее за пять лет: за данный год, два предыдущих и два последующих года).



Фиг. 2. Распределение во времени извержений вулканов Курило-Камчатской дуги.

1 — все извержения; 2 — за вычетом сомнительных и очень слабых; 3 — приведенные извержения

Сглаживание методом скользящего пятигодичного среднего оправдывается тем, что в этом случае четко выступают изменения вулканической активности, длительность которых составляет не менее пяти лет. Рассматривать меньшие периоды изменения вулканической активности не имеет смысла, потому что самые короткие периоды между извержениями для большинства вулканов исчисляются не менее чем в 3—5 лет.

В дальнейшем при рассмотрении изменения вулканической активности во времени будет приводиться не число извержений в год, а пятигодичное — среднее. Для краткости изложения это не всегда будет оговорено.

Распределение во времени вулканической активности Курило-Камчатской дуги отражено на фиг. 2.

Для учета, хотя бы грубого, интенсивности извержений каждой группе приписывается определенный вес, и таким путем все извержения приводятся к одному уровню. Такие взвешенные извержения мы называем приведенными. Группам Б, М и Д приписывается вес (в условных единицах), равный соответственно 1,0; 0,3 и 0,1; для извержений группы А принимается вес 0,5.

Интенсивность извержения группы Д, оцениваемая 0,1, в действительности значительно меньше интенсивности извержений группы Б, но мы считаем, что самый факт начала слабого извержения тоже как-то должен учитываться, поэтому ему и приписывается такой относительно большой вес. Если бы для этих извержений мы принимали вес ни много меньше

единицы, такие извержения были бы исчезающе малыми по сравнению с извержениями группы Б и их влияние не могло бы быть отражено на графике.

Приписывая определенный вес извержениям различных групп, мы разграничиваем их по интенсивности и тем самым устраняем необходимость извержениям различной интенсивности придавать одинаковое значение.

Рассматривая получившиеся три ломаные линии (фиг. 2), мы видим: 1) все они сохраняют общий для них ход изменений; исключение составляет только небольшой максимум 1939 г., который отсутствует у приведенных извержений (а это значит, что он получился за счет слабых извержений); 2) за последние 55 лет трижды происходило увеличение вулканической активности: первое — с 1900 по 1918 г., второе — с 1920 по 1935 г. и третье — с 1942 по 1949 г. Превышение максимумов над минимумами равно 1—2 извержениям.

Как уже говорилось выше, материал, на основе которого строились графики, собран довольно полно, поэтому большие минимумы на графиках ни в коем случае нельзя объяснить пропусками некоторых извержений, так как в этом случае пришлось бы допустить, что в течение нескольких лет подряд ежегодно не учитывалось по 1—2 больших извержения, т. е. что ежегодно не учитывалось от 50 до 100% всех извержений. Такое допущение сделать нельзя, ибо большие извержения не могли остаться незамеченными и неучтенными. Небольшие пропуски дат извержений, конечно, возможны, но они не должны существенно изменить общий вид диаграммы (фиг. 2).

Следует заметить, что при том смысле, который мы вкладываем в понятие «извержение», число извержений вулканов дуги за год равно числу вулканов, которые проявляли в данном году активность. Таким образом, вулканическая активность дуги за год определяется числом действовавших в том или ином году вулканов.

Распределение вулканов и вулканической активности вдоль дуги

Вулканы вдоль дуги располагаются неширокой полосой (фиг. 1); вдоль дуги они распределяются почти равномерно (табл. 2).

При рассмотрении распределения вулканической активности вдоль дуги был использован тот же метод разделения зоны на секторы, что и в нашей предыдущей статье (Токарев, 1957). Вся зона была разбита на 23 сектора с тем, что каждый сектор заключал в себе отрезок вулканической дуги длиной 100 км (разделение на секторы показано на фиг. 1). При разделении дуги на секторы учитывались строение береговой линии и расположение групп вулканов.

Распределение извержений вдоль Курило-Камчатской дуги (по секторам) представлено на фиг. 3, где по оси абсцисс отложены номера секторов (согласно нумерации на фиг. 1), а по оси ординат — число извержений групп Б, М и А всех вулканов данного сектора за 1901—1955 гг. Графики приведенных извержений, а также всех групп не приводятся, так как они в точности повторяют ход кривой на фиг. 3. Так как все секторы равны и длина дуги, заключенная в каждом из них, составляет 100 км, диаграмма (фиг. 3) показывает распределение линейной плотности вулканической активности вдоль дуги, выраженной числом извержений на 100 км дуги.

Общая закономерность изменения активности такова: по мере продвижения вдоль дуги на юго-запад линейная плотность вулканической активности неравномерно убывает. На фиг. 3 резко выделяется несколь-

ко больших максимумов, характеризующих ее. Высота последующих максимумов становится все меньше и меньше. Исключение составляет только небольшой максимум 13-го сектора, который меньше максимума 15-го сектора. На долю Камчатки приходится около 3/4 всех извержений, которые произошли в районе Курило-Камчатской дуги за последние 55 лет.

При сопоставлении кривой распределения вулканической активности вдоль дуги с рельефом глубоководной впадины (см. фиг. 1 и 3) бросается в глаза, что все максимумы приходится на те сектора, которые заключают в себе подводные долины, ответвляющиеся от глубоководной впадины в сторону вулканической дуги. Таковы максимумы 5, 7, 9, 15, 18 секторов, которые соответственно совпадают с Камчатским и Кроноцким заливами, Авачинской губой, проливами Круzensштерна (15-й сектор) и Буссоль (17-й и 18-й секторы).

В. И. Влодавец (1939) высказывал предположение о том, что магматические очаги действующих вулканов Камчатки образовались при развитии тектонических разломов северо-восточного направления и активизируются в результате современных движений по линиям поперечного направления. Позже Г. Б. Удинцев (1955) высказывает другое предположение. Так как возрастание вулканической активности по мере продвижения вдоль дуги на север обусловлено развитием впадины (прогибанием) с юга на север и в настоящее время в южной и средней частях Курило-Камчатской дуги оно почти прекратилось, а на севере, где впадина выклинивается, продолжается с максимальной интенсивностью, то возникают поперечные разломы и активизируется (вулканическая деятельность).

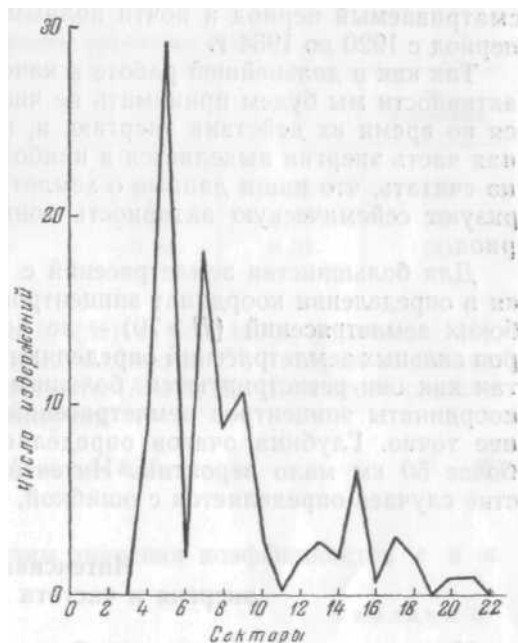
Наши данные не противоречат этим предположениям и даже, возможно, подтверждают их.

Таким образом, существование на одних и тех же участках геоструктурной дуги подводных долин и наиболее активных вулканов связано, очевидно, с большими поперечными тектоническими разломами, которые и являются причиной образования подводных долин на северо-западном склоне глубоководной впадины и в настоящее время активизируют вулканическую деятельность. Отметим, что Камчатский и Кроноцкий заливы и Авачинская губа являются непосредственным продолжением подводных долин на суше.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ

Использованный материал и метод

Для настоящей работы были использованы данные о 155 землетрясениях, взятые без изменения из табл. 17 и 18 (и дополнения к ним) книги Б. Гутенберга и К. Рихтера «Сейсмичность земли» (Gutenberg, Richter,



Фиг. 3. Распределение вулканической активности вдоль Курило-Камчатской дуги

1954). Кроме того, были обработаны данные о 241 землетрясении из приложения к нашей предыдущей статье (Токарев, 1957). Таким образом, всего были обработаны данные о 396 землетрясениях Курило-Камчатской зоны с интенсивностью $M \geq 6$ за 1904—1954 гг., в том числе 70 землетрясений с промежуточной глубиной очага ($70 < H < 300$ км) и 31 глубокофокусное землетрясение ($H > 300$ км). Карта эпицентров этих землетрясений приведена нами в предыдущей статье (Токарев, 1957). Эти данные мы считаем достаточно полными для землетрясений с $M \geq 7$ за весь рассматриваемый период и почти полными для землетрясений с $M \geq 6,5$ за период с 1920 по 1954 г.

Так как в дальнейшей работе в качестве характеристики сейсмической активности мы будем принимать не число землетрясений, а выделившуюся во время их действия энергию, и, принимая во внимание, что основная часть энергии выделяется в наиболее сильных землетрясениях, можно считать, что наши данные о землетрясениях довольно полно характеризуют сейсмическую активность зоны за весь рассматриваемый период.

Для большинства землетрясений с нормальной глубиной очага ошибки в определении координат эпицентров не превышают $\pm 1^{\circ}, 0$, а для глубоких землетрясений ($H \geq 70$) — не более $\pm 2^{\circ}, 0$. Координаты эпицентров сильных землетрясений определяются, очевидно, с большей точностью, так как они регистрируются большим числом станций. Возможно, что координаты эпицентров землетрясений раннего периода определены менее точно. Глубина очагов определяется довольно хорошо, и ошибки более 50 км мало вероятны. Интенсивность землетрясений в большинстве случаев определяется с ошибкой, не превышающей $\pm 0,25$.

Интенсивность, энергия и частота землетрясений

Интенсивность землетрясений дана в таблицах Б. Гутенберга и К. Рихтера и в приложении к нашей предыдущей статье (Токарев, 1957).

Энергия землетрясений определялась нами по формуле Б. Гутенберга (1949 г.)

$$\lg E = 12 + 1,8M. \quad (1)$$

В нашем распоряжении имеется достаточно материала (396 землетрясений) для статистического рассмотрения связи между частотой и энергией землетрясений изучаемой зоны. Для этой цели были использованы данные о землетрясениях с $M \geq 6,6$ за весь рассматриваемый период, данные нормальных землетрясений с интенсивностью $6,0 \leq M \leq 6,5$ взяты за период с 1922 по 1954 г.; для землетрясений с промежуточной глубиной очага — за 1930—1954 гг., а для глубоких — за 1927—1954 гг. Мы считаем наши данные о землетрясениях за указанное время достаточно полными.

Зависимость частоты повторяемости землетрясений от их интенсивности $N(M)$ вычислялась для всех интенсивности от 6,0 до 8,3 через интервал, равный 0,1 ($M \pm 0,05$). Но так как интенсивность часто определялась с точностью до 0,25, данные группируются около интенсивностей, кратных 0,25. Поэтому все землетрясения были разбиты на более крупные интервалы, равные 0,3 ($M \pm 0,15$) и для каждого такого интервала бралась 1/3 энергии, выделившейся в землетрясениях с интенсивностью $M \pm 0,15$ и 1/3 числа землетрясений. Таким образом мы получали среднюю энергию, выделившуюся в землетрясениях с интенсивностью $M \pm 0,05$, и среднее число землетрясений.

Зависимость среднего годового числа землетрясений от их интенсивности определялась по формуле

$$\lg N = a + bM. \quad (2)$$

Методом наименьших квадратов по осредненным значениям E и N находились коэффициенты уравнения (2). Результат сведен в табл. 5, где указаны и средние квадратичные ошибки σ .

Таблица 5

Значение коэффициентов уравнения (2)

Землетрясения	a	b	σ	№ уравнения
С нормальной глубиной очага	5,57	-0,90	0,21	(3)
С промежуточной глубиной очага	4,87	-0,88	0,13	(4)
С глубоким очагом	4,17	-0,84	0,21	(5)

Зная среднегодовую зависимость $N(M)$ и используя уравнение (1), можно вычислить среднегодовое значение энергии E' , которая выделяется в землетрясениях данной интенсивности ($M+0,05$). Для этого сложим уравнение (2) с уравнением (1) и получим

$$\lg E' = \lg NE = c + kM, \quad (6)$$

где $C = 12 + a$ и $k = 1,8 - b$

Используя данные табл. 5, получим значения коэффициентов c и k .

Таблица 6

Значения коэффициентов уравнения (6)

Землетрясения	c	k	№ уравнения
С нормальной глубиной очага	17,57	0,90	(7)
С промежуточной глубиной очага	16,87	0,92	(8)
С глубоким очагом	16,17	0,96	(9)

Таким образом мы получили формулу, по которой можно вычислить энергию, выделенную за год землетрясениями Курило-Камчатской зоны, интенсивность которых равна $M \pm 0,05$.

В табл. 7 приведена вычисленная по формулам (7) — (9) годовая энергия (E'_T) землетрясений и среднегодовая энергия (E'_g), которая выделится в землетрясениях зоны за период 1904—1954 гг. Здесь, как и раньше, энергия землетрясений (E'_g) с интенсивностью M берется как среднее для трех интервалов интенсивностей, т. е. берется $1/3$ энергии землетрясений, интенсивность которых равна $M - 0,1$; M ; $M + 0,1$.

Как видим, теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Если проинтегрировать уравнение (6) по M от 0 до M , то получим формулу

$$\lg E^* = c + 0,64 - \lg k + kM_1, \quad (10)$$

Таблица 7

M	Землетрясения					
	нормальные		промежуточные		глубокие	
	$\lg E'_{T_1}$	$\lg E'_g$	$\lg E'_{T_1}$	$\lg E'_g$	$\lg E'_{T_1}$	$\lg E'_g$
6,1	23,0	22,9	22,5	22,0	22,0	22,0
6,4	23,3	23,4	22,8	22,6	22,3	22,6
6,7	23,6	23,5	23,0	23,1	22,6	22,5
7,0	23,8	23,9	23,3	23,6	22,9	22,9
7,3	24,1	24,2	23,6	23,8	23,2	23,2
7,6	24,3	23,9	23,9	23,9	23,5	—
7,9	24,6	24,8	—	—	23,7	23,9
8,2	24,9	25,2	—	—	—	—

которая дает энергию (E^*), выделившуюся за год во время всех землетрясений зоны с $O M M_1$.

Подставляя значения c и k из табл. 7 в формулу (10), получим формулы, по которым можно вычислить суммарную энергию за год землетрясений зоны, интенсивность которых меньше и равна M .

Землетрясения с нормальной глубиной очага . . . $\lg E^* = 18,26 + 0,90 M$

(11) Промежуточные $\lg E^* = 17,55 + 0,92 M$

(12) Глубокие $\lg E^* = 16,83 + 0,96 M$

(13)

Для сравнения в табл. 8 приводится годовая энергия ($E^*_{T_1}$), вычисленная по формулам (11) — (13) для землетрясений интенсивностью до 7 и до 8 баллов, и выделившаяся в действительности среднегодовая энергия (E^*_g), для этих же интенсивностей.

Таблица 8

Интенсивность	Землетрясения					
	нормальные		промежуточные		глубокие	
	$\lg E^*_{T_1}$	$\lg E^*_g$	$\lg E^*_{T_1}$	$\lg E^*_g$	$\lg E^*_{T_1}$	$\lg E^*_g$
$M \leq 7$	24,56	24,48	23,99	24,16	23,55	23,66
$M \leq 8$	25,46	25,42	24,81	24,76	24,50	24,48

Как видим, теоретические и экспериментальные значения очень хорошо совпадают. Из той же табл. 8 видно, что большая часть энергии выделяется в землетрясениях при $M 7$.

Таким образом, мы получили формулы среднегодовой зависимости (M) и $N(M)$ для Курило-Камчатской зоны, которые довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако применять эти формулы можно только в пределах следующих интенсивностей: 1) для нормальных землетрясений от 6,0 до 8,3; 2) для промежуточных и глубоких — в пределах 6,0—7,8; за этими пределами нам не известен закон зависимости $N(M)$ и $E'(M)$.

Самые сильные землетрясения рассматриваемой зоны достигали интенсивности 8,3, причем такую интенсивность имели только землетрясения с нормальной глубиной очага. Максимальное значение интенсивности для промежуточных землетрясений равно 7,7, а для глубоких — 7,8.

Распределение энергии землетрясений по глубине

Закономерности распределения очагов землетрясений по глубине в Курило-Камчатской зоне нами были изложены ранее (Токарев, 1957), здесь же мы рассмотрим распределение по глубине всех землетрясений зоны и их энергии.

В табл. 9 для различных интервалов глубин приводится число землетрясений (N), которые произошли в рассматриваемой зоне за 1904—1954 гг., их суммарная энергия (E) и отношение энергии к числу землетрясений ($E:N$), т. е. средняя энергия одного землетрясения или удельная энергия. Энергия дается в единицах 10^{25} эрг.

Таблица 9

Определяемые величины	Глубина очагов, км							
	0-69	70-100	101-200	201-300	301-400	401-500	501-600	601-650
N	300	34	28	6	8	9	11	3
E	445	5,9	16,6	5,6	12,1	0,52	2,62	0,078
$E:N$	1,485	0,175	0,592	0,934	1,501	0,058	0,238	0,026

Число землетрясений, минимальное на глубине 200—300 км, на глубинах 400—600 км несколько возрастает.

По нашему мнению, очень важной характеристикой является удельная энергия землетрясений ($E : N$), которая, по-видимому, до некоторой степени характеризует твердость пород на различных глубинах. Если допустить, что скорость нарастания напряжений на различных глубинах одинакова, то в тех местах, где твердость вещества больше, землетрясения будут происходить реже, но с большей силой, а там, где твердость меньше, они будут происходить чаще, но меньшей силы. Таким образом, очевидно, твердость вещества больше в тех местах, где больше удельная энергия землетрясений.

Следует заметить, что данные табл. 9 получены на основе небольшого материала, поэтому и вытекающие из них выводы следует считать предварительными, требующими проверки на более полном материале. Возможно, что минимум удельной энергии на глубине 70—100 км обусловлен ошибками определения (занижением) интенсивности землетрясений, очаги которых лежат в слое пониженных скоростей.

Распределение энергии землетрясений по поясам и вдоль дуги

Принятое нами разделение Курило-Камчатской зоны на пояса и сектора позволяет рассмотреть вопрос о распределении энергии землетрясений вдоль дуги и по поясам, которые приурочены к определенным структурам дуги.

При выбранной нами ширине поясов и сравнительно небольшой точности определения координат многие эпицентры попадают не в тот

пояс (и сектор), в котором они лежат в действительности. Но так как в нашем распоряжении имеется обширный материал и ошибки определения координат эпицентров подчинены закону нормального распределения, можно статистически рассмотреть влияние этих ошибок на получаемые результаты.

Выше уже отмечалось, что для преобладающего большинства землетрясений (особенно для наиболее сильных) координаты эпицентров определялись с точностью не менее $1^{\circ},0$. Исходя из этого можно допустить, что среднее значение дисперсии ошибок определения координат за весь рассматриваемый период равно $1^{\circ},0$. Кроме того, чтобы упростить расчеты, будем считать, что все эпицентры землетрясений определены с одинаковой точностью и что для всех них дисперсия ошибок равна $1^{\circ},0$. Делая такое допущение, мы умышленно занижаем точность определения координат эпицентров для преобладающего большинства землетрясений, и дисперсия в $1^{\circ},0$ является верхней границей оценки ошибок в определении координат эпицентров.

Зная дисперсию ошибок, можно для каждого эпицентра вычислить вероятность, с которой он лежит в том или ином секторе. Эта вероятность будет равна

$$P = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \iint e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} dx dy. \quad (14)$$

Если оси координат выбрать с таким расчетом, чтобы ось абсцисс шла по радиусу дуги, то выражение упростится, так как в этом случае границы пояса можно считать параллельными оси ординат, а сам пояс бесконечно длинным.

Такое упрощение возможно потому, что за пределами интервала $\pm 3^{\circ},0$ $P \approx 0$, т. е. при вычислении P можно брать только интервал $\pm 3^{\circ},0$, в пределах которого границу между поясами можно считать прямолинейной, а сам пояс бесконечно длинным для всех секторов, кроме крайних.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-3^{\circ}}^{+3^{\circ}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy \approx 1. \quad (15)$$

В этом случае и вероятность того, что эпицентр лежит в поясе шириной a , будет равна

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_l^{l+a} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (16)$$

где l — расстояние эпицентра от ближайшей границы пояса.

Таблица 10

j-ный пояс	Вероятность, с которой эпицентры j-го пояса могут находиться в k-ных поясах					
	1	2	3	4	5	за пределами зоны
1	0,54	0,21	0,03	0,02	—	0,20
2	0,26	0,38	0,22	0,11	—	0,03
3	0,08	0,25	0,30	0,34	0,01	0,02
4	0,01	0,07	0,15	0,64	0,11	0,02
5	—	—	—	0,05	0,80	0,15

Вычислив вероятность, с которой каждый эпицентр может находиться в том или ином поясе, мы вычислили вероятность, с которой эпицентры данного пояса могут находиться в различных поясах. Результаты этих расчетов приведены в табл. 10.

Из табл. 10 видно, что искажения в каждый данный пояс вносятся в основном за счет эпицентров смежных поясов, которые могут туда попасть в результате ошибок определения их координат.

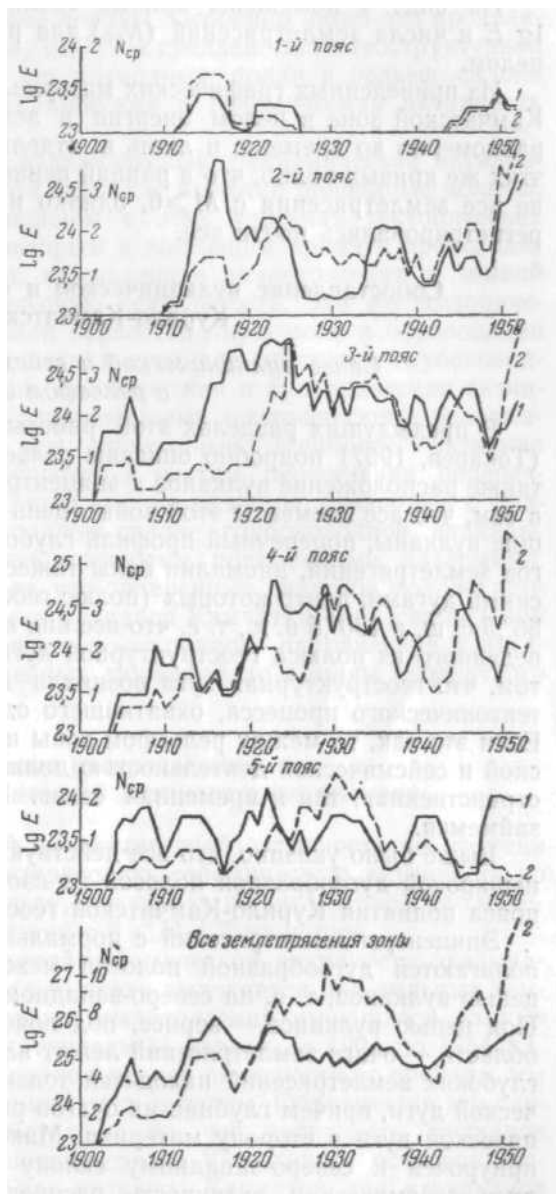
Влияние эпицентров несмежных поясов незначительно. На четвертый пояс влияют в основном эпицентры третьего пояса и частично второго. Вероятность попадания эпицентров из четвертого пояса в пятый невелика, а из пятого в четвертый она еще меньше. На третий пояс сильное влияние оказывают эпицентры соседних поясов, поэтому ко всем результатам, полученным для этого пояса, нужно относиться осторожно.

Распределение суммарной энергии землетрясений по поясам и вдоль дуги приведено в нашей предыдущей статье (Токарев, 1957), где отмечено, что максимум сейсмической активности зоны приурочен к северо-западному склону глубоководной впадины. Там же нами показано, что во втором и третьем поясах максимумы энергии, выделенной в землетрясениях за 1904—1954 гг., приурочены к тем участкам геоструктурной дуги, где от глубоководной впадины в сторону вулканической дуги отходят подводные долины.

Распределение энергии землетрясений во времени

Изменение сейсмической активности Курило-Камчатской зоны во времени представлено на фиг. 4.

Диаграммы с кривыми распределения энергии (и числа) землетрясений по годам оказались сильно изломанными, поэтому они сглажены путем осреднения по пятилетиям, т. е. к ним применен тот же метод сглаживания, что и используемый при сглаживании кривых распределения извержений во времени (см.



Фиг. 4. Распределение во времени энергии землетрясений и их числа в Курило-Камчатской зоне.

1 — энергия землетрясений ($\lg E$); 2 — число землетрясений (N_{cp}).

стр. 163). Осреднение производилось не значений самой энергии, а его логарифма, т. е. мы произвели сглаживание кривой распределения во времени $\lg E$.

На фиг. 4 помещены кривые скользящего пятигодичного среднего $\lg E$ и числа землетрясений (N_{cp}) для различных поясов и всей зоны в целом.

Из приведенных графических материалов следует, что во всей Курило-Камчатской зоне в целом энергия в землетрясениях выделяется почти равномерно во времени, и лишь в отдельных поясах неравномерно. Из этих же кривых видно, что в ранний период (до 1925 г.) регистрировались не все землетрясения с $M \geq 6$, однако наиболее сильные землетрясения регистрировались почти все.

Сопоставление вулканической и сейсмической активности Курило-Камчатской зоны

Связь вулканической и сейсмической активности с рельефом зоны

В предыдущих разделах этой работы и в нашей предыдущей статье (Токарев, 1957) подробно описаны рельеф Курило-Камчатской зоны, а также расположение вулканов и эпицентров землетрясений. Мы убедились в том, что все элементы этой зоны (цепь Курильских островов, действующие вулканы, поперечный профиль глубоководной впадины, глубина очагов землетрясений, аномалии силы тяжести) располагаются концентрическими дугами, центр которых (полюс геоструктурной дуги) лежит в точке $56^{\circ},5$ с. ш. и $130^{\circ},5$ в. д., т. е. что все они являются функцией радиуса, проведенного из полюса геоструктурной дуги. Все это наводит на мысль о том, что геоструктурная дуга возникла в результате какого-то единого тектонического процесса, охватившего одновременно всю дугу в целом. Если это так, то между рельефом зоны и происходящей в ней вулканической и сейсмической деятельностью должна наблюдаться тесная как пространственная, так и временная связь. Выявлением такой связи мы и займемся.

Выше было указано, что все действующие вулканы зоны расположены неширокой дугообразной полосой на сводовой части (или близко к ней) пояса поднятия Курило-Камчатской геосинклинальной зоны.

Эпицентры землетрясений с нормальной глубиной очага также располагаются дугообразной полосой между глубоководной впадиной и цепью вулканов, т. е. на северо-западном склоне глубоководной впадины. Под цепью вулканов, — вернее, под поясом поднятия геосинклинальной области, — очаги землетрясений лежат на глубине 70—150 км. Эпицентры глубоких землетрясений находятся только во внутренней части вулканической дуги, причем глубина их очагов растет по мере удаления от вулканической дуги в сторону материка. Максимум сейсмической активности приурочен к северо-западному склону глубоководной впадины. Вдоль дуги сейсмическая активность распределяется в среднем равномерно (Токарев, 1957), а это значит, что в настоящее время вся дуга одновременно охвачена интенсивными тектоническими движениями и что процесс формирования геоструктурной дуги еще не окончен.

Распределение аномалий силы тяжести в Курило-Камчатской зоне, очевидно, указывает на то, что и глубинное строение земной коры (распределение вещества) подчинено общей закономерности строения геоструктурной зоны — дугообразному расположению, концентричному по отношению к основным структурам.

При рассмотрении распределения вулканической активности вдоль геоструктурной дуги (стр. 165) мы отметили, что ее максимумы лежат в

тех секторах, которые охватывают подводные долины, ответвляющиеся от глубоководной впадины в сторону вулканической дуги. Максимумы сейсмической активности на северо-западном склоне глубоководной впадины (второй и третий пояса) также приурочены к тем секторам зоны, которые охватывают эти подводные долины. Особенно четко это проявляется в районе Камчатки (Токарев, 1957). В средней части геоструктурной дуги (10-й—14-й секторы), где нет подводных долин и рельеф склона впадины довольно спокоен, вулканическая и сейсмическая активность ниже.

Приуроченность максимумов вулканической и сейсмической активности к тем участкам геоструктурной дуги, где имеются подводные долины, объясняется, очевидно, существованием в этих участках тектонических разломов, поперечных дуге, по которым в настоящее время и происходят наиболее интенсивные движения, вызывающие землетрясения в земной коре и активизирующие вулканическую деятельность. Эти же тектонические разломы, по-видимому, играли первостепенную роль в образовании самих подводных долин. В тех участках дуги, где на склоне глубоководной впадины нет подводных долин, сейсмическая и вулканическая активность ниже и связана, вероятно, с продольными тектоническими разломами, которые менее активны, чем поперечные. Наиболее активная вулканическая деятельность приурочена к местам пересечения поперечных разломов с продольными. Тектонические разломы, связанные с подводными долинами на северо-западном склоне глубоководной впадины, являются, по-видимому, наиболее крупными поперечными разломами.

В. И. Влодавц (1939) считает, что поперечные разломы моложе продольных и что магматические очаги вулканов Камчатки образовались при развитии тектонических разломов северо-восточного направления и активизируются в результате современных движений по линиям поперечного направления.

Сопоставление распределения вулканической и сейсмической активности во времени

Распределение вулканической и сейсмической активности во времени периодически изменяется. Характеризовать сейсмическую активность по числу землетрясений с $M \geq 6$ нельзя, так как за первый период наблюдений наши данные для землетрясений с $M \geq 7$ не полны.

Более надежной характеристикой сейсмической активности оказывается энергия, потому что основная ее часть выделяется при сильных землетрясениях (с $M \geq 7$), а для таких землетрясений имеющиеся данные достаточно полны за весь рассматриваемый период (с 1904 по 1954 г.).

Рассматривая распределение вулканической активности во времени, мы учитываем извержения вулканов всей дуги в целом. Объясняется это следующими соображениями. Несмотря на то, что активность вулканов Камчатки выше вулканической активности на Курильских островах, изменения активности во времени как вулканов Камчатки, так и вулканов Курильских островов имеют одинаковый ход, хотя их абсолютные величины различны. Сейсмическая активность вдоль дуги распределена в среднем равномерно, особенно в четвертом поясе, а это значит, что вся дуга одновременно охвачена интенсивными тектоническими движениями; поэтому рассматривать изменения сейсмической активности можно также для всей дуги в целом.

Так как изучаемая нами зона имеет протяженность около 2000 км, ширину около 800 км и землетрясения отмечаются по всей зоне, а вулканы протягиваются очень узкой полосой вдоль дуги, естественно предположить, что связь между вулканической деятельностью и сейсмической

активностью отдельных поясов будет различна, тем более, что сами тектонические движения в рассматриваемой зоне являются функцией радиуса, проведенного из полюса геоструктурной дуги, и что в одно и то же время их интенсивность в различных поясах различна (см. фиг. 4).

Сопоставление графиков распределения во времени вулканической (см. фиг. 2) и сейсмической (см. фиг. 4) активности показывает, что наибольшее совпадение наблюдается для кривых приведенных извержений и энергии землетрясений четвертого пояса. Но такое сопоставление не дает количественной характеристики этого совпадения, поэтому для выявления степени связи между вулканической и сейсмической деятельностью используем метод корреляции.

При стохастической или корреляционной связи между двумя переменными величинами x и y одному значению независимой величины x соответствует не одно значение переменной y , а несколько значений, варьирующих около некоторой средней величины. При прямолинейной (или просто линейной) корреляции равным изменениям одной величины соответствуют в среднем равные изменения другой. Числовой величиной, выражающей прямолинейную зависимость между переменными величинами, является коэффициент корреляции, обозначаемый буквой r , который определяется формулой

$$r = \sqrt{1 - \left(\frac{S_y}{\sigma_y}\right)^2}, \quad \text{где} \quad (17)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_c)^2}{n}} \quad (18)$$

есть стандартное отклонение наблюдаемых значений y_i от прямой

$$Y_c = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} (x_i - \bar{x}) = b(x_i - \bar{x}), \quad (19)$$

построенной по способу наименьших квадратов, в предположении, что ошибкам измерений подвержена только одна величина y , а

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (20)$$

есть стандартное отклонение величины y от среднего арифметического.

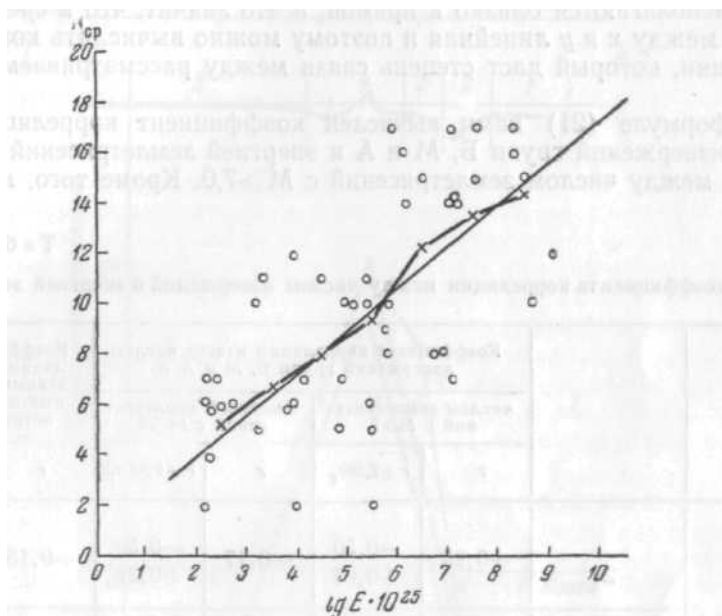
Заменив в формуле (17) значения S_y и σ_y из формул (18) и (20), получим наиболее удобную форму для вычисления коэффициента корреляции через наблюдаемые величины x_i и y_i и их средние арифметические значения \bar{x} и \bar{y} .

$$r = \frac{\sum_1^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_1^n x_i^2 - n\bar{x}^2\right) \left(\sum_1^n y_i^2 - n\bar{y}^2\right)}}. \quad (21)$$

Здесь n — число пар одновременно наблюдаемых величин x и y . Из формулы (21) видно, что коэффициент корреляции — величина безразмерная, поэтому коррелировать можно любые две величины независимо от их

размерности, причем обе эти величины можно брать в любых единицах и масштабах, потому что в формулу (21) входят только их отклонения от среднего арифметического (Романовский, 1928; Уорсинг, Геффнер, 1953)

Основным достаточным критерием применимости коэффициента корреляции для выявления связи между двумя варьирующими величинами x и y является линейность средней зависимости между ними. При этом не имеет значения, по какому закону распределены отдельные значения величин x и y (Слуцкий, 1912).



Фиг. 5. Корреляционное поле извержений (iV_{cp}) и энергии землетрясений 4-го пояса ($\lg E$) Курило-Камчатской зоны.

Коэффициент корреляции может выражать или степень зависимости величины y от x , когда на величину y действуют и другие факторы, кроме x , или же меру влияния общих причин на величины x и y . В последнем случае, если x есть линейная функция $i + k$ независимых переменных, которые оказывают одинаковое влияние на значение этой функции, а y — точно такая же линейная функция $j + k$ независимых переменных, где k — число переменных, общих для x и y , коэффициент корреляции выражается формулой, эквивалентной формуле (21).

$$r = \frac{k}{\sqrt{(i+k)(j+k)}} \quad (22)$$

При выявлении связи между вулканической и сейсмической активностью мы имеем случай зависимости двух величин от одной общей — тектонического движения. Но на вулканическую и сейсмическую деятельность оказывают влияние и другие факторы (например, вязкость извергаемых лав, жесткость пород, слагающих земную кору, и т. п.), которые точно не известны. Однако в нашем распоряжении имеются данные о вулканической и сейсмической активности для каждого года, и по ним мы можем вычислить коэффициент корреляции. Для этого необходимо и достаточно, чтобы между этими двумя величинами существовала в среднем линейная зависимость.

Выяснить характер зависимости между величинами x и y можно путем нанесения точек на график, выражающий зависимость $x - y$ для всех пар значений x и y с последующим построением линий регрессии (Уорсинг, Геффнер, 1953). Если линии регрессии, построенные по экспериментальным данным, близки к прямым, то между величинами x и y существует в среднем линейная зависимость. Такой график (фиг. 5) нами построен для извержений групп Б, М и А (x) и для энергии землетрясений четвертого пояса (y). Мы видим, что взвешенные точки всех x -интервалов располагаются близко к прямой, а это значит, что в среднем зависимость между x и y линейная и поэтому можно вычислить коэффициент корреляции, который даст степень связи между рассматриваемыми явлениями.

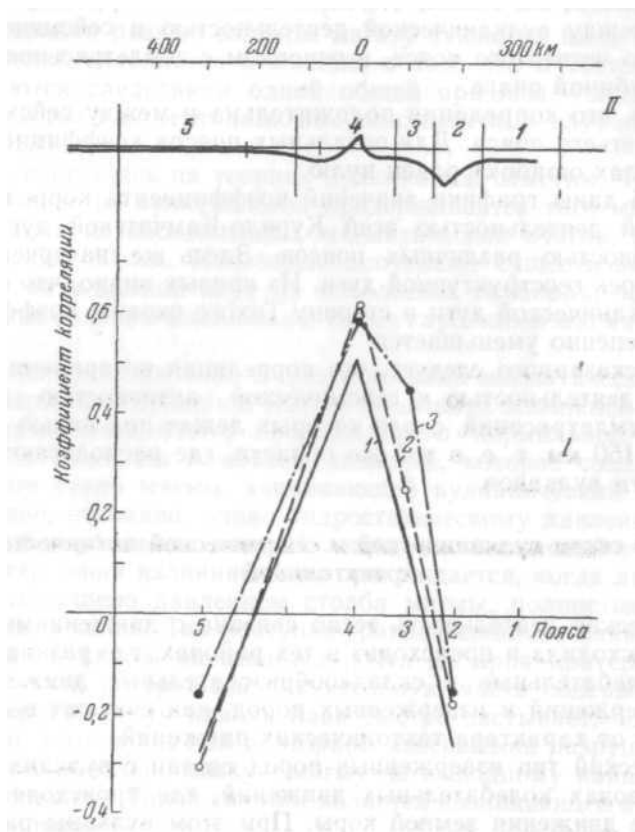
По формуле (21) нами вычислен коэффициент корреляции между числом извержений групп Б, М и А и энергией землетрясений за 50 лет, а также между числом землетрясений с $M \geq 7,0$. Кроме того, вычислен и

Таблица 11

Значение коэффициента корреляции между числом извержений и энергией землетрясений

		Коэффициент корреляции между числом извержений групп Б, М и А и				Коэффициент корреляции между приведенными извержениями и энергией землетрясений с $M \geq 6$	
		числом землетрясений с $M \geq 7$		энергией землетрясений с $M \geq 6$		r	$r \pm 2,58 \sigma_r$
		r	$r \pm 2,58 \sigma_r$	r	$r \pm 2,58 \sigma_r$		
Все землетрясения поясов	2	-0,25	-0,56 +0,07	-0,17	-0,50 +0,21	-0,15	-0,48 +0,23
	3	0,17	-0,21 +0,50	0,25	+0,12 -0,56	0,45	+0,10 +0,70
	4	0,51	+0,18 +0,74	0,62	+0,34 +0,80	0,59	+0,30 +0,79
	5	-0,28	-0,58 +0,09	-0,31	-0,61 +0,06	-0,16	-0,49 +0,22
Землетрясения всей зоны	Нормальные	0,10	-0,27 +0,44	-0,02	-0,38 +0,34	-0,00	-0,37 +0,37
	Промежуточные	0,37	+0,01 +0,65	0,55	+0,24 +0,76	0,56	+0,25 +0,77
	Глубокие	0,04	-0,33 +0,39	0,24	-0,13 +0,55	—	—
	Все	0,17	-0,21 +0,50	0,01	-0,35 +0,37	—	—

коэффициент корреляции между приведенными извержениями и энергией землетрясений. Полученные данные сведены в табл. 11. В ней, кроме значений коэффициента корреляции для различных поясов и глубин очагов, даются и пределы (в графе $r \pm 2,58 \sigma$), в которых он лежит с вероятностью 0,99. Стандартное отклонение коэффициента корреляции σ вычислялось с помощью Z-функции Фишера (Романовский, 1928).



Фиг. 6. Изменение коэффициента корреляции во времени между вулканической деятельностью и сейсмической активностью различных поясов Курило-Камчатской зоны (I).

Профиль морского дна по линии 15-го сектора; по вертикали увеличен в 10 раз (II).

1 — коэффициент корреляции между извержениями групп Б, М и А и землетрясениями с интенсивностью М 7; 2 — коэффициент корреляции между извержениями групп Б, М и А и энергией землетрясений с интенсивностью М 6; 3 — коэффициент корреляции между приведенными извержениями и энергией землетрясений с М 6

Как видно из табл. 11, корреляция во времени максимальна между извержениями вулканов всей дуги и сейсмической активностью четвертого пояса.

Во всех трех случаях с вероятностью 0,99 коэффициент корреляции положителен, и более того, когда мы рассматриваем не число землетрясений, а их энергию, он с той же вероятностью становится выше 0,3.

Для землетрясений третьего пояса коэффициент корреляции положителен во всех трех случаях только с вероятностью 0,5. Для землетрясений второго и пятого поясов он отрицателен и с вероятностью 0,5 во всех трех случаях меньше нуля.

Между вулканической активностью, с одной стороны, и землетрясениями с нормальной глубиной очага, глубокими землетрясениями всей зоны — с другой, корреляции во времени нет. Положительная корреляция во времени наблюдается между вулканической активностью и землетрясениями только с промежуточной глубиной очага. С вероятностью 0,99 для этих землетрясений коэффициент корреляции более 0,25.

Таким образом, мы видим, что положительная корреляция во времени существует между вулканической деятельностью и сейсмической активностью только четвертого пояса, в основном с землетрясениями с промежуточной глубиной очага.

Возможно, что корреляция положительна и между сейсмической активностью третьего пояса. Для остальных поясов коэффициент корреляции (в пределах ошибок) равен нулю.

На фиг. 6 даны графики значений коэффициента корреляции между вулканической деятельностью всей Курило-Камчатской дуги и сейсмической активностью различных поясов. Здесь же начерчен и профиль рельефа поперек геоструктурной дуги. Из кривых видно, что по мере удаления от вулканической дуги в сторону Тихого океана коэффициент корреляции постепенно уменьшается.

Из всего сказанного следует, что корреляция во времени между вулканической деятельностью и сейсмической активностью наблюдается только для землетрясений, очаги которых лежат под цепью вулканов на глубине 70—150 км, т. е. в той же области, где располагаются и магматические очаги вулканов.

О связи вулканической и сейсмической активности с тектоникой

Вулканическая деятельность тесно связана с движениями земной коры. Она происходила и происходит в тех районах, где развивались и развиваются колебательные и складкообразовательные движения, причем характер извержений и изверженных пород, как считают некоторые геологи, зависит от характера тектонических движений.

Атлантический тип изверженных пород связан с вулканами, расположенными в зонах колебательных движений, где происходят медленные вертикальные движения земной коры. При этом вулканы располагаются линейно на трещинах тектонических разломов или чаще на пересечениях таких трещин.

Тихоокеанский тип изверженных пород связан с вулканами, расположенными в зонах складкообразовательных движений, где происходят сравнительно быстро и кратковременно боковые движения, вызывающие складчатость и взбросы, причем эти движения действуют на длинные узкие полосы земной коры.

В том, что существует связь между вулканизмом и тектоническими движениями земли, нет никакого сомнения. Это подтверждается и геологией, и геофизикой.

Как известно, хорошо выяснена связь расположения вулканов с тектоническими трещинами в ряде вулканических районов. (Приведем ряд примеров. Потухшие вулканы Оверни — цепи Пюи, а также Этна и другие вулканы в Италии приурочены к системе трещин, располагающихся эшелонами; в Венгрии базальтовые куполы и конусы расположены на трещинах и особенно на их пересечении; вулканы Камчатки располагаются на системе трещин двух пересекающихся направлений. В специальной литературе можно найти множество подобных примеров).

Данные геофизики также целиком подтверждают эту точку зрения. Все современные действующие вулканы находятся в зонах наиболее

активной сейсмической деятельности и наибольших нарушений изостатического равновесия, т. е. в тех районах, где имеются большие нарушения целостности земной коры и где в настоящее время происходят наиболее интенсивные тектонические движения.

Таким образом, связь вулканизма с движениями земной коры несомненна, но ее природа, ее закономерности пока еще изучены очень слабо.

Существовали разные взгляды на эту связь, но ныне большая часть исследователей склоняется к мнению о том, что и тектоника, и вулканизм являются следствием одной общей причины — движения подкоркового вещества или тектоники высокопластичных глубинных масс (Заварицкий, 1952).

Не останавливаясь на теориях вулканизма, отметим, что в настоящее время большинство вуканологов придерживается того мнения, что вулканы питаются из обособленных магматических очагов, расположенных на глубине 50—80 км. Некоторые допускают существование периферических очагов в земной коре на небольших глубинах, причем считают, что эти очаги связаны каналами с более глубокими магматическими очагами.

Исходя из представления о существовании магматических очагов, повторные извержения вулканов можно объяснить возникновением дополнительного давления в очаге, превышающего нормальное. (Нормальным давлением в очаге мы называем давление, которое создает в магматическом очаге столб магмы, заполняющей вулканический канал доверху. Это давление, очевидно, равно гидростатическому давлению, существующему на той глубине, на которой лежит магматический очаг).

При извержении излияние лавы прекращается, когда давление в очаге будет уравновешено давлением столба магмы, полностью заполняющей вулканический канал. Так наступает равновесное состояние вулкана. При этом выводной канал оказывается почти до края кратера заполненным жидкой магмой, потерявшей значительную часть содержащихся в ней газов. В верхней части канала лава быстро застывает, образуя лавовую пробку. Для того чтобы при повторном извержении разрушить эту пробку и продвинуть довольно вязкую магму по выводному каналу, необходима значительная сила. Такой силой и является возникающее в очаге дополнительное давление.

Это давление, очевидно, нарастает постепенно и, когда оно достигнет предела прочности лавовой пробки, закупоривающей выводной канал, произойдет извержение.

Наращение давления перед извержением подтверждается наблюдениями над вулканами на Гавайских островах и в Японии, где было точно установлено, что перед извержением вулканы вспучиваются, приподнимаются, причем вспучиваются больше те вулканы, у которых лава более вязкая, так как требуется большее давление для ее выжимания. После извержения вулканы снова оседают до прежнего уровня (Jaggar, Finch. 1926; Minakami, 1950).

Мы считаем, что дополнительное давление в магматических очагах создается движением подкоркового вещества или, по А. Н. Заварицкому, — первичной тектоникой. Подкорковые движения, охватывающие одновременно большие районы, в твердых частях земной коры и оболочки вызывают напряжения, а в жидких магматических очагах создают дополнительное давление. Но здесь могут иметь место два случая.

В первом случае тектонические движения, охватывающие большие районы, происходят равномерно, с постоянной интенсивностью. Они будут вызывать напряжения в твердых частях земной коры и оболочки, а в магматических очагах будут создавать дополнительное давление. Напряжения

будут разрешаться частично за счет текучести вещества и частично в виде сдвигов, а дополнительное давление в магматических очагах — при извержениях. Несмотря на то, что тектонические движения будут охватывать всю дугу (или большую ее часть), извержения отдельных вулканов этой дуги будут происходить без всякой связи между ними, потому что давление в каждом очаге будет нарастать равномерно и начало извержения будет определяться только индивидуальными особенностями каждого очага и вулкана. Землетрясения тоже будут происходить случайно, равномерно во времени.

В этом случае возможна связь между деятельностью только близко расположенных вулканов или между деятельностью вулкана и тектоническими землетрясениями, очаги которых лежат вблизи магматического очага.

Вполне возможно, что уменьшение давления в очаге при извержении будет способствовать разрешению напряжения в близлежащих частях коры и оболочки, и наоборот, разрешение напряжений вблизи очага может увеличить давление в очаге и таким образом способствовать началу извержения.

Во втором случае тектонические движения происходят неравномерно, с изменяющейся со временем интенсивностью. В этом случае напряжения в земной коре и в твердых частях оболочки и дополнительное давление в магматических очагах в моменты усиления тектонических движений будут нарастать быстрее, а в другие моменты медленнее, и соответственно землетрясения и извержения вулканов будут происходить то чаще, то реже, т. е. они будут отражать интенсивность тектонических движений. В этом случае в вулканической и сейсмической деятельности должна наблюдаться какая-то синхронность.

Если тектонические движения охватывают всю геоструктурную дугу, то большинство вулканов этой дуги должно одновременно то усиливать, то ослаблять свою деятельность. Здесь, конечно, значительную роль будут играть индивидуальные особенности каждого вулкана (размеры очага и выводного канала, вязкость магмы и содержание в ней газов и воды, ее температура и др.), поэтому их извержения не будут начинаться одновременно: одни начнут извергаться раньше, другие позже. Но если мы рассматриваем дугу в целом и если периоды ослабления и усиления тектонических движений больше периода эруптивного цикла для большинства вулканов, тогда должно четко проявляться периодическое изменение вулканической активности дуги. Аналогичные изменения должны наблюдаться и в сейсмической деятельности в той области, которая охвачена тектоническими движениями, причем в периоды более интенсивных движений землетрясения будут происходить чаще и их суммарная энергия будет больше.

По нашему мнению, физико-химические процессы в магме, а также содержащиеся в ней газы начинают играть существенную роль только тогда, когда магма поднимается по каналу уже на значительную высоту и внешнее давление сильно понижается.

Целью настоящей работы является выявление связи между вулканической и сейсмической активностью Курило-Камчатской геоструктурной дуги, причем имеется в виду связь между извержениями вулканов и тектоническими землетрясениями, а не вулканическими, связанными с магматическим очагом и деятельностью вулкана. Для этого необходимо было сопоставить распределение во времени энергии извержений и энергии землетрясений, но, к сожалению, по имеющимся данным мы не смогли дать количественную оценку энергии извержений, а ограничились учетом тех годов, в которые происходили извержения. Однако если считать, что извержение вызывается дополнительным давлением в очаге, такая оцен-

ка вполне достаточна, потому что важен сам факт начала извержения, который указывает на то, что в очаге давление повысилось до предельного. Интенсивность извержения зависит скорее от особенностей того или иного вулкана.

В распределении энергии во времени по отдельным поясам (см. фиг. 4) обращает на себя внимание постепенный сдвиг максимума энергии на более позднее время от второго пояса к четвертому. Сдвиг максимума энергии от пояса к поясу приблизительно равен четырем годам. Можно проследить три таких максимума. Первый лежит в третьем поясе около 1905 г. и в четвертом около 1909 г.; второй максимум лежит во втором поясе около 1915 г., в третьем — около 1918 г. и в четвертом — около 1923 г.; третий максимум во втором поясе лежит около 1936 г., а в четвертом — около 1944 г. (в третьем поясе он отсутствует). Если сдвиг максимума энергии от пояса к поясу имеет реальный смысл, то его можно объяснить следующим образом. Тектоническим движением (допустим, что это пододвигание дна океана под материк) охвачена вся зона. Напряжения достигают предела прочности пород в наиболее нарушенной части геоструктурной дуги — во втором поясе — на самой границе материкового и океанического вещества земной коры. После того как в этой части земной коры произойдут подвижки и напряжения разрешатся, максимальные напряжения возникнут в третьем поясе, так как теперь уже земная кора второго пояса не будет оказывать такого сопротивления движению океанического вещества под материк. Аналогичное явление произойдет и в четвертом поясе, после того как произойдут подвижки в третьем.

Таким образом, нарастание максимальных напряжений и их разрешение идут волнообразно по поверхности скалывания от глубоководной впадины в сторону материка. Когда волна максимальных напряжений достигает четвертого пояса, усиливается вулканическая деятельность. Очевидно, в периоды более интенсивных движений в жестких частях земной коры и оболочки наиболее быстро нарастают напряжения, а в магматических очагах наиболее быстро нарастает дополнительное давление. Все это ведет к одновременному усилению сейсмической и вулканической активности геоструктурной дуги.

ЛИТЕРАТУРА

- Влодавец В. И. О связи вулканов Камчатки с сейсмической активностью. Бюлл. Вулк. станции на Камчатке, № 6, 1939.
- Влодавец В. И. Исторический обзор эруптивной деятельности Ключевского вулкана. Тр. Лаб. вулканологии АН СССР, 1949, вып. 6.
- Влодавец В. И. Вулканы Советского Союза. Географгиз, 1949.
- Влодавец В. И., Пийп Б. И Каталог действующих вулканов Камчатки Бюлл. Вулк. станции АН СССР, № 25, 1957.
- Гайнанов А. Г. Маятниковые определения силы тяжести в Охотском море и в северо-западной части Тихого океана. Тр. Ин-та океанологии, 12, 1955.
- Горшков Г. С. Вулканы о-ва Парамушир и их состоянии летом 1953 г. Бюлл. Вулк. станции АН СССР, № 22, 1954.
- Горшков Г. С. Хронология извержений вулканов Курильской гряды (1713—1952 гг.). Тр. Лаб. вулканологии АН СССР, вып. 8, 1954.
- Горшков Г. С. Каталог действующих вулканов Курильских островов. Бюлл. Вулк. станции АН СССР, № 25, 1957.
- Заварицкий А. Н. О вулканах Камчатки. В кн. «Камчатский сборник», т. I, М.-Л., 1940.
- Заварицкий А. Н. Вулканическая зона Курильских островов. Вестн. АН СССР, 1946, № 1.
- Заварицкий А. Н. Одна из важнейших задач науки о Земле. (Проблема возникновения Тихого океана). Вестник АН СССР, 1952, № 6.
- Кулаков В. С. О деятельности Камчатских вулканов. «Природа», 1936, № 8.
- Островные дуги (сб. статей). Изд-во иностр. лит-ры, 1952.

- П и й п Б. И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки. Тр. Камч. вулк. станции АН СССР, вып. 3, 1946.
- Пийп Б. И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом. Тр. Лаб. вулканологии АН СССР, вып. 11, 1956.
- Романовский В. И. Элементы теории корреляции. Изд. 2-е. ОНТИ, 1928.
- Слуцкий Е. Е. Теория корреляции. Киев, 1912.
- Токарев П. И. О глубинной фокальной поверхности и связи землетрясений с рельефом в Курило-Камчатской зоне. Бюлл. Вулк. станции АН СССР, 1957, № 27.
- Уорсинг А., Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. Изд. 2-е. М., 1953.
- Удинцев Г. Б. Рельеф Курило-Камчатской впадины. Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 12, 1955.
- Gutenberg B. a. Richler C. F. Seismicity of the Earth. Princeton, New Jersey, 1954.
- Jaggat T. a. Finch R. H. Tilting and level changes at pasific volcanoes. Pan-Pasific Science Congress, 3d. Tokyo, 1926.
- Minakami T. On explosive activities of andesitic volcanoes and forerunning phenomena. Bull. Volcanologie, ser. 2, 10, 1950.