

УДК 550.34

ФЕДОТОВ С. А., ФЕОФИЛАКТОВ В. Д., ГОРДЕЕВ Е. И.,
ГАВРИЛОВ В. А., ЧЕБРОВ В. Н.РАЗВИТИЕ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ
НА КАМЧАТКЕ

THE DEVELOPMENT OF SEISMIC STUDIES IN KAMCHATKA, by Fedotov S. A., Feofilaktov V. D., Gordeev E. I., Gavrilov V. A., and Chebrov V. N. Detailed seismic studies in Kamchatka were initiated in November 1961. In the preceding period, observations of earthquakes in the region of Kamchatka and Commander Islands were carried out at some remote seismic stations and in 1947—1960 at a few individual seismic stations in Kamchatka. The Kamchatka regional network of seismic stations set up in 1961 made it possible to conduct reliable registration of earthquakes with energy class $K_{S1.2}^{F_{68}} \geq 10$ ($M \geq 3.6$) in the entire region and with $K_{S1.2}^{F_{68}} \geq 9$ ($M > 2.2$) in East Kamchatka. During the 25 years of observations (by 1987) a total of 40 000 earthquakes were included in the uniform catalogue. Along with the development of regional seismic stations in Kamchatka a network of stations to record large earthquakes was set up. At present there are 27 stations equipped with instruments to register events with $M=3$ and higher. Since 1971 recent methods of observations include radio-telemetry systems as well as autonomous seismic stations both portable terrestrial and ocean bottom stations. Automatic devices and computers are used for information processing. A number of important results have been obtained based on seismic data collected during 25 years. Among these results are: spatial position of the seismofocal zone, seismic zoning of Kamchatka and microzoning of Petropavlovsk-Kamchatskii, identification of regularities of the seismic cycle of large earthquakes and, on this basis, the development of methods of long term seismic prediction. Foreshock-aftershock sequences of all the large earthquakes ($M \leq 7$) that occurred in 1961—1986 were studied in detail. In recent years comprehensive investigations have exhibited a significant rise in volume and quality of seismic studies.

(Received January 28, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Сейсмометрические наблюдения на Камчатке до 1961 г.

Начало сейсмометрических наблюдений на Камчатке относится к 1915 г., когда Постоянной центральной сейсмической комиссией была организована сейсмостанция в г. Петропавловске. Эта станция, входящая в единую сеть сейсмических станций России, работала с перерывами до января 1927 г. К сожалению, материалы наблюдений сейсмостанции Петропавловск за это время утеряны. Более подробно о начале сейсмологических наблюдений на Камчатке можно найти в статьях [1, 15].

В 1951 г. была вновь организована сейсмическая станция Петропавловск, оснащенная сейсмографами Кирноса. Станция вошла в Единую систему сейсмических наблюдений (ЕССН) Советского Союза. До этого, в конце 1946 г., Лабораторией вулканологии АН СССР была организована сейсмостанция Ключи, которая в 1952 г. была оснащена сейсмографами Кирноса и Харина [9, 11]. До конца 50-х годов уровень представительной регистрации камчатских землетрясений ограничивался магниту-

дой 5,5. В 1958 г. Вулканологической станцией АН СССР была открыта третья сейсмостанция на Камчатке — в пос. Козыревск, а в 1960 г. начала работу полевая сейсмостанция Апахончич, к востоку от Ключевского вулкана [10, 11]. Уровень представительной регистрации землетрясений на Камчатке был снижен после этого до магнитуды 5. Все сейсмические станции в это время были оснащены либо сейсмографами Кирноса с собственным периодом маятников 12 с и увеличением около 1 тыс., либо сейсмографами Харина с собственным периодом маятников 1,5 с и увеличением около 5 тыс. и сейсмографами ВЭГИК с периодом маятников 0,9 с и увеличением около 7 тыс.

Создание и развитие Камчатской региональной сети сейсмических станций

1961—1971 гг. В 1961 г. Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) Института физики Земли АН СССР совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией СО АН СССР была начата организация региональной сейсмической сети на Камчатке. С 1 ноября 1961 г. начали работать региональные сейсмостанции Тополово, Паужетка, Усть-Большерецк, Петропавловск и Семячик. В 1962—1963 гг. были организованы сейсмостанции Беринг, Шипунский и Авача (рис. 1). Таким образом, к

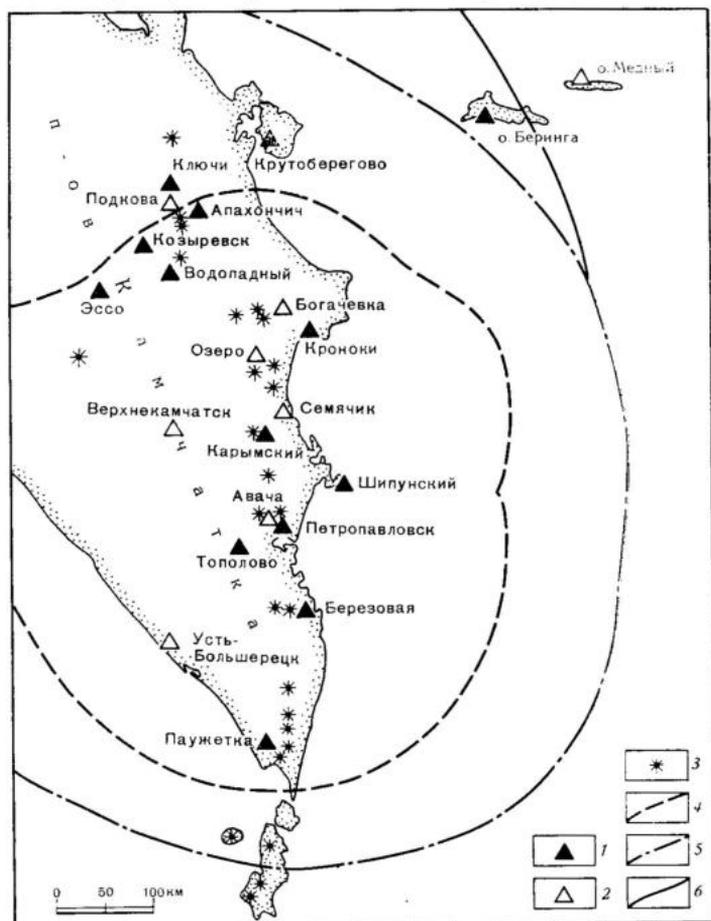


Рис. 1. Схема размещения сейсмических станций Камчатской региональной сети. 1 — действующие сейсмостанции; 2 — сейсмостанции, закрытые до 1986 г. (табл. 1); 3 — действующие вулканы; контуры надежной регистрации землетрясений с $K \geq 10$: 4 — на 1964 г.; 5 — на 1971 г.; 6 — на 1978 г.

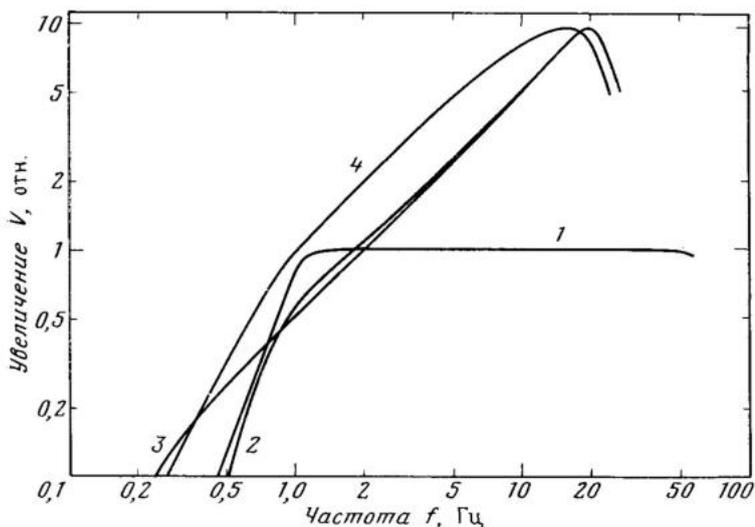


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики. 1 — сейсмографа камчатской региональной сети; 2 — сейсмометрического канала радиотелеметрической системы с сейсмометром СМЗ; 3 — то же с сейсмометром С5С; 4 — сейсмометрического канала автономной сейсмической станции

началу 1964 г. на Камчатке работало уже 11 региональных сейсмических станций. Регистрировались почти все землетрясения с энергетического класса $K_{SI,2}^{Фв8} \geq 10$ в районе Камчатки [14]. Контур надежной регистрации для землетрясений с $K \geq 10$ показан на рис. 1 [16]. В последующие годы на основании полученных результатов по сейсмичности Камчатки и Командорских островов сеть региональных станций модернизировалась, дополнялась и расширялась, но основные принципы ее организации были заложены в начале 60-х годов. Сейсмические наблюдения на Камчатке Тихоокеанская сейсмическая экспедиция начала, имея богатый опыт наблюдений сейсмичности на Южных Курильских островах, поэтому первоначально использовались методики обработки землетрясений, принятые для Южно-Курильской зоны. В частности, использовалась номограмма для энергетической классификации, полученная по наблюдениям южно-курильских землетрясений. Существенным отличием наблюдений на Камчатке было использование сейсмографа с амплитудно-частотной характеристикой, расширенной в область низких частот (сейсмограф ВЭГИК-ГБ-IV с параметрами $T_{сейсм} = 1,2$ с, $D_{сейсм} = 0,4$; $T_{гальв} = 0,075$ с, $D_{гальв} = 5,8$, коэффициент связи $\sigma \leq 0,15$; для южно-курильской сети $T_{сейсм} = 0,7$ с). Стандартная амплитудно-частотная характеристика сейсмографа Камчатской региональной сети приведена на рис. 2.

Это позволило без искажений регистрировать более удаленные землетрясения. Номограмма для энергетической классификации была перестроена для камчатских землетрясений. Создание в 1968 г. номограммы для энергетической классификации камчатских землетрясений по величине A_{max}/T в поперечных волнах было существенным событием первого десятилетия детального изучения сейсмичности Камчатки и Командорских островов [12]. Номограмма явилась основой для получения однородного каталога землетрясений. Определение эпицентров и глубин землетрясений проводилось по стандартной методике палеток изохрон, предложенной Ю. В. Ризниченко [8].

К концу первого десятилетия наблюдений сейсмичности на Камчатке, в 1971 г., региональная сеть насчитывала 15 сейсмических станций и

¹ Далее — просто К.

Параметры сейсмических станций на Камчатке

Сейсмостанция	Код	Координаты		Высота над ур. мо- ря, м	Увеличение <i>T</i> , тыс.	Год открытия	Год закрытия
		φ с. ш.	λ в. д.				
<i>Камчатская региональная сеть</i>							
Петропавловск	PET	53,0	158,6	68	5,0	1961	—
Тополово	TOP	53,2	158,0	200	10,0	1961	—
Паужетка	PAU	51,5	156,8	110	5,0	1961	—
Усть-Большерецк	UBL	52,8	156,3	15	3,0	1961	1964
Семячик	SML	54,1	160,0	10	3,0	1961	1973
Карымский	KPI	54,0	159,5	790	5,0	1974	—
Ключи	KLY	56,3	160,9	40	5,0	1961	—
Козыревск	KOZ	56,1	159,9	45	5,0	1961	—
Апахончич	APH	56,0	160,8	700	5,0	1961	—
Авача	AVH	53,3	158,7	900	5,0	1962	1976
Беринг	BKI	55,2	166,0	15	5,0	1962	—
Шилунский	SPN	53,1	160,0	170	5,0	1962	—
Богачевка	BGC	54,8	160,9	240	5,0	1964	1965
Кроноки	KRI	54,6	161,2	50	5,0	1966	—
Озеро	OZR	54,7	160,4	380	5,0	1967	1971
Эссо	ESO	55,9	158,7	490	40,0	1965	—
Верхнекамчатск	VKM	54,6	158,5	160	8,0	1966	1971
Крутоберегово	KBG	56,3	162,7	30	5,0	1968	—
Оссора	OSS	59,1	163,1	5	10,0	1973	—
Медный	MED	54,8	167,6	20	7,0	1973	1975
Водопадный	VDP	55,7	160,2	1060	10,0	1977	—
Подкова	PDK	56,1	160,8	800	5,0	1978	1984
Березовая	BER	52,3	158,5	20	5,0	1981	—
<i>Радиотелеметрические станции</i>							
Авача	AVH	53,2	158,7	900	6,0	1977	—
Корякская	KRK	53,3	156,6	1050	6,0	1977	—
Булочка	BLC	53,2	158,8	800	6,0	1977	1984
Козельский	KZL	53,3	158,8	950	6,0	1977	—
Горелый	GRL	52,6	158,1	1600	6,0	1980	—
Шивелуч	SVL	56,6	161,2	900	6,0	1980	—
Налычево	NLC	53,3	159,2	20	6,0	1985	—
Подкова	PDK	56,1	160,8	750	6,0	1985	—

Примечание. Камчатская региональная сеть включает 23 станции, радиотелеметрических станций — 5. Увеличение для периода *T* для станции Авача равно 1 с для амплитудно-частотной характеристики 2 (рис. 2).

общее число землетрясений, регистрируемых и обрабатываемых ежегодно, составляло около 1700. В каталог входили землетрясения энергетических классов $K \geq 7,5$. Состояние региональной сети и контур надежной регистрации для землетрясений с $K \geq 10$ на 1971 г. показаны на рис. 1. В табл. 1 представлены основные параметры сейсмических станций на Камчатке и Командорских островах.

До 1972 г. на основании сейсмических наблюдений на Камчатке и Командорских островах было получено детальное пространственное распределение гипоцентров землетрясений, проведено микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского и уточнено сейсмическое районирование п-ова Камчатка. Определены закономерности цикличности сильных землетрясений, и на основании этого разработана методика долгосрочного сейсмического прогноза [13]. В 1969 и 1971 гг. детально изучены форшок-афтершоковые последовательности для трех сильнейших землетрясений десятилетия (23.XI.1969 г., $M=7,7$; 25.XI.1971 г., $M=7,2$; 15.XII.1971 г., $M=7,8$) и заложены основы для развития работ по краткосрочному прогнозу сильных землетрясений [4, 5, 12—14, 17].

В этот период детальными сейсмическими исследованиями руководили начальник ТСЭ ИФЗ АН СССР С. А. Федотов и зав. Лабораторией сети геофизических станций Института вулканологии СО АН СССР П. И. Токарев.

1972—1978 гг. В 1972 г. региональные сейсмические станции ТСЭ ИФЗ АН СССР были переданы в Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, где были образованы Лаборатории сейсмометрии и сейсмологии. В Лаборатории сейсмометрии велись работы по совершенствованию, техническому переоснащению и оптимизации сейсмической сети, а в Лаборатории сейсмологии — обработка сейсмограммного материала и составление окончательного каталога. Сеть сейсмических станций за это время существенных изменений не претерпела (см. табл. 1, рис. 1). Важным результатом этого периода было переоснащение сейсмических станций типовой аппаратурой, стандартизация амплитудно-частотных характеристик сейсмических каналов и оптимизация увеличения на сейсмических станциях по результатам районирования территории Камчатки по уровню сейсмических помех [19—21]. Максимально возможное увеличение для стандартной региональной амплитудно-частотной характеристики на Камчатке составило 40 тыс. Такое увеличение было установлено на сейсмостанции Эссо в 1974 г.

К этому времени относится начало внедрения методов контрольно-калибровочных работ с применением ЭВМ. В результате этого амплитудно-частотные характеристики регионального сейсмометрического канала соответствовали стандарту с точностью не хуже 5%.

Важным условием стандартизации сейсмометрических наблюдений было создание хороших условий для установки сейсмической аппаратуры. Были построены новые здания сейсмостанций Эссо, Кроноки и Тополово. В 1977 г. в опытный порядок на сейсмостанции Эссо был установлен и ряд лет функционировал сейсмограф СКД.

Расчет координат землетрясений с 1977 г. был полностью переведен на ЭВМ по программе ГИ-77, разработанной и внедренной А. А. Гусевым [3].

Были продолжены пробные работы по краткосрочному прогнозу землетрясений, в основном на сейсмологическом материале наблюдений. С целью большей детальности наблюдений за счет освоения труднодоступных районов в 1976 г. начала работать радиотелеметрическая система сбора сейсмометрической информации. Это положило начало освоению новых автоматизированных методов наблюдений. В эти годы Лабораторией сейсмометрии заведовал В. Д. Феофилактов, Лабораторией сейсмологии — И. Г. Симбирева, научным руководителем исследований был С. А. Федотов.

1979—1986 гг. Начиная с 1979 г., в связи с правительственными постановлениями были усилены сейсмологические исследования в стране и в том числе на Камчатке. В Институте вулканологии была организована Опытно-методическая сейсмологическая партия (ОМСП), в которой были сконцентрированы все сейсмологические наблюдения, текущая обработка, развитие новых методов наблюдений и методик обработки, создание и эксплуатация радиотелеметрических систем, автоматизация сбора, обработки и хранения сейсмологической информации.

Конфигурация региональной сети сейсмических станций осталась почти неизменной (см. табл. 1 и рис. 1), и в 1986 г. насчитывала 15 региональных сейсмических станций. Кроме этого, работали две радиотелеметрические сети станций: одна в районе г. Петропавловска-Камчатского, другая в районе г. Ключи с общим числом передающих пунктов — десять. Практически неизменное строение сети региональных станций позволило за 25 лет детальных наблюдений составить однородный каталог землетрясений, включающий более 40 тыс. событий.

За 1979—1986 гг. произошло два значительных сейсмических события, оба в районе стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Землетрясения 17.VIII.1983 г. с магнитудой 6,9 и 28.XII.1984 г. с магнитудой 7,5 были детально изучены не только с помощью региональной сети, но и специально организованными локальными сетями автономных сейсмических станций [6, 7]. На ближайших пунктах наблюдений были получены записи на аппаратуре, регистрирующей сильные землетрясения.

Существующая региональная сеть сейсмических станций обеспечивает надежную регистрацию землетрясений с $K \geq 9,5$ во всей фокальной зоне в районе Камчатки и Командорских островов. Дальнейшее развитие сейсмометрических наблюдений связано как с открытием новых станций для более равномерного размещения их в исследуемой области, с созданием нескольких комплексных станций для регистрации сейсмических сигналов в длиннопериодном диапазоне, так и с развитием радиотелеметрических систем сбора сейсмологической информации путем развертывания более плотных сетей наблюдения в необитаемых районах.

Детальные сейсмологические наблюдения 1976—1986 гг. возглавлял начальник ОМСП Е. И. Гордеев, обработку данных наблюдений — В. М. Зобин, развитие радиотелеметрических систем — В. А. Гаврилов, научным руководителем исследований был С. А. Федотов.

Сеть станций для регистрации сильных землетрясений

Организация сети станций для записи сильных движений началась одновременно с формированием региональной сети. Первые комплекты аппаратуры были установлены на некоторых региональных сеймостанциях и в черте г. Петропавловска-Камчатского в 1961 г. (табл. 2, рис. 3). К сожалению, невысокая надежность используемой аппаратуры не позволила в то время организовать полноценную сеть для гарантированной регистрации движения от сильных землетрясений.

Плановое создание сети станций началось в 1974 г. В конце 70-х — начале 80-х годов сеть станций развивалась по двум направлениям: равномерное заполнение пунктами наблюдений девятибалльной зоны восточного побережья Камчатки и создание в районе г. Петропавловска-Камчатского комплексной системы наблюдений с широким частотным динамическим диапазоном регистрируемых сигналов. В 1986 г. сеть станций, регистрирующих сильные движения, состояла из 18 пунктов на восточном побережье Камчатки и девяти — в районе г. Петропавловска-Камчатского (см. табл. 2 и рис. 3). Станции сильных движений оснащены акселерографами ССРЗ и S MAC=Q, а также велосиграфами С5С-ИСО. Все станции находятся в восьми-девятибалльной зоне по карте сейсмического районирования Камчатки СР-78 [14]. Конфигурация сети и чувствительность аппаратуры позволяют в районе восточного побережья Камчатки регистрировать без пропусков землетрясения с проявлением силой от 3 баллов по шкале MSK-64.

К 1986 г. каталог землетрясений, зарегистрированных сетью станций сильных движений, составил около 100 событий, в основном выше одиннадцатого энергетического класса. Зарегистрирован ряд сильнейших землетрясений последнего десятилетия, в том числе получена запись землетрясения 28 декабря 1984 г. с $M=7,5$ на расстоянии 10 км от эпицентра. Регистрацию сильных движений в 1980—1986 гг. вел В. П. Митякин под руководством Е. И. Гордеева.

Развитие сети станций сильных движений на Камчатке и год их регистрации

Станция	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1981	1985	1986	
Беринга																											
Шипунский																											
Кроноки																											
Кругоберегово																											
Паужетка																											
м. Петропавловский																											
Паратунка																											
28-й километр																											
Жуланово																											
м. Африка																											
Ключи																											
м. Кроноцкий																											
Березовая																											
м. Круглый																											
Ходутка																											
Нальчево																											
м. Шуберга																											
14-й километр																											
Петропавловск																											
Дачная																											
Горького																											
Институт																											
Цунами																											
Ключевская																											
Дом быта																											
Телецентр																											
Мишенная																											

Примечание. К настоящему времени на Камчатке работает 27 станций сильных движений. X — станции на восточном побережье Камчатки; + — станции в г. Петропавловске-Камчатском.

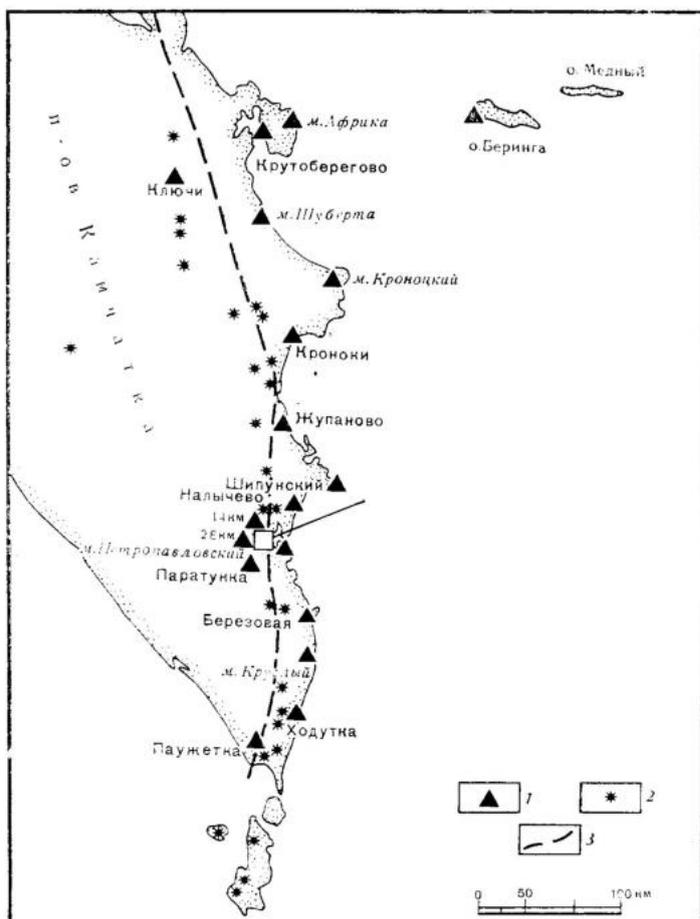


Рис. 3. Сеть станций по наблюдению за сильными землетрясениями. 1 — пункты наблюдений; 2 — действующие вулканы; 3 — граница девятибалльной зоны сотрясаемости

Локальные радиотелеметрические сети

Создание радиотелеметрических сетей в значительной степени было связано с необходимостью расширения сейсмометрических сетей в труднодоступных районах действующих вулканов, и в первую очередь в районах Авачинской и Северной групп вулканов Камчатки.

Отсутствие подходящей серийной отечественной радиотелеметрической аппаратуры потребовало при этом от Института вулканологии проведения собственных разработок, которые и были начаты в 1974 г. При этом с самого начала ставилась задача разработки и внедрения в эксплуатацию не только собственно радиотелеметрической аппаратуры, но также аппаратных и программных средств автоматизации обработки сейсмометрических данных, поступающих по каналам телеметрии, т. е. создания в итоге единой системы сбора и обработки сейсмометрической информации.

Разработанный к 1976 г. первый вариант радиотелеметрической системы — РТС ТЕСИ (Телеметрическая система), обеспечивал на каждом передающем пункте измерение вертикальной и одной горизонтальной составляющих сейсмического сигнала [2]. Передача сейсмометрических данных в Центр сбора информации осуществлялась в непрерывном режиме, регистрация данных производилась магнитографами и аппарату-

Технические характеристики радиотелеметрических систем

Техническая характеристика	ТЕСИ	ТЕСИ-2
<i>Сейсмометрические каналы</i>		
Количество каналов (для одного передающего пункта)	2	4
Полоса пропускания без сейсмометров (уровень —3 дБ)	0,5—20 Гц	0,01—40 Гц
Тип сейсмометров	СМЗ	СМЗ, С5С
Динамический диапазон на канал	54 дБ	54 дБ
Тип калибровки	Ручная МГПА	Автоматическая импульсивная МГПА
Мощность, потребляемая аппаратурой передающего пункта	0,5 Вт	0,15 Вт
<i>Каналы измерений геофизических величин</i>		
Количество каналов		До 16
Погрешность измерений		<1%
Режим измерений	Дискретный с интервалом от 15 мин до 24 ч	
Вид регистрации	Перфоратор, самописец	
<i>Радиоканал</i>		
Мощность передатчика		0,3 Вт
Потребляемая мощность передатчика		1 Вт
Ширина полосы излучения		19 кГц
Диапазон рабочих температур передатчика		-35 ÷ +40° С
Потребляемая мощность приемника	25 Вт	0,15 Вт
Дальность связи		До 100 км

рой видимой записи. Основные технические характеристики РТС ТЕСИ представлены в табл. 3. Типовые амплитудно-частотные характеристики сейсмометрических каналов РТС приведены на рис. 2. Общая для всех передающих пунктов аппаратура службы времени обеспечивала точность временной привязки не хуже 0,1 с. Калибровка сейсмометрических каналов осуществлялась во время посещения передающих пунктов с помощью магнитоэлектрического генератора МГПА.

Многолетний опыт работы РТС ТЕСИ показал достаточно высокую надежность разработанной аппаратуры: коэффициент готовности РТС можно оценить величиной 95—98%, среднее время наработки на отказ радиопередающей аппаратуры РТС составляло около 20 мес.

Разработанная к 1976 г. РТС ТЕСИ была рассчитана на эксплуатацию в течение 6—8 лет. За это время на основе опыта эксплуатации необходимо было оценить правильность выбора основных решений, разработать и подготовить к вводу в эксплуатацию новый вариант РТС. Указанная задача в основном была решена к середине 1985 г. К этому времени была разработана новая модификация системы — РТС ТЕСИ-2. Из представленных в табл. 3 основных технических характеристик обеих систем видно, что РТС ТЕСИ-2 в целом отличается от ТЕСИ существенно более высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками: четыре сейсмометрических канала вместо двух при сохранении прежнего динамического диапазона по каждому каналу; более широкая полоса пропускания каналов, регулируемая с помощью фильтров и характеристик применяемых сейсмометров; наличие встроенной аппарату-

ры автоматической импульсной калибровки; уменьшенная мощность, потребляемая аппаратурой передающего пункта, и др.

Необходимо также подчеркнуть, что при создании РТС ТЕСИ-2 была решена не только задача разработки макетных и экспериментальных образцов новой аппаратуры, но и проблема изготовления малой серии телеметрической аппаратуры в целях полного оснащения сетей Камчатки.

Одним из наиболее «узких» мест в оснащении телеметрических сетей является аппаратура регистрации сейсмометрических данных. Для регистрации данных, получаемых по каналам РТС ТЕСИ, использовалась аппаратура с прямой магнитной записью, также разработанная группой телеметрии ОМСП. Недостатки, свойственные указанному виду записи (узкий динамический диапазон, низкая точность записи, ограничение частотного диапазона снизу), не позволяли в полной мере реализовать возможность РТС и ухудшали характеристики всей системы в целом. Для решения этого вопроса работы велись одновременно по двум направлениям: создание прецизионной аппаратуры аналоговой магнитной записи с непрерывным режимом регистрации и создание аппаратуры для цифровой выборочной регистрации землетрясений в ждущем режиме. Результаты работы первого направления выразились в создании к апрелю 1986 г. комплекса аппаратуры с ЧМ-записью сейсмических данных, характеристики которого представлены ниже.

Основные характеристики комплекса:

Количество каналов	16
Частотный диапазон (уровень 0,5), Гц	0—25
Динамический диапазон, дБ	46
Уровень нелинейных искажений	<1%
Время непрерывной записи, ч	26
Мощность, потребляемая аппаратурой записи, Вт	4

В настоящее время указанная аппаратура является основным средством регистрации сейсмометрических данных, поступающих по каналам РТС.

Аппаратура для цифровой регистрации сейсмотелеметрических данных была введена в опытную эксплуатацию в составе Петропавловского центра сбора информации в декабре 1984 г. Аппаратура работает в ждущем режиме, обеспечивая выборочную регистрацию землетрясений без потери первых вступлений на ленточных накопителях типа ИЗОТ-5003. Конструктивно аппаратура выполнена в стандарте КАМАК, управление осуществляется микроЭВМ «Электроника-60».

Основные технические характеристики аппаратуры:

Число подключаемых аналоговых каналов	32
Частота аналого-цифрового преобразования на канал, Гц	64
Разрядность аналого-цифрового преобразования, бит	10+знак
Глубина буфера задержки, не менее, с	5
Емкость накопительных устройств (2 НМЛ ИЗОТ-5003), бит	2·10 ⁸ (40 землетрясений)

Магнитные ленты с записями землетрясений, получаемые аппаратурой цифровой регистрации, обрабатываются на ЭВМ СМ-4.

Работы по созданию комплекса аппаратных и программных средств машинной обработки сейсмотелеметрических данных ведутся в Институте вулканологии с 1982 г. Результаты этих работ способны в значительной степени повлиять на эффективность сейсмометрических наблюдений на базе РТС.

В настоящее время на Камчатке эксплуатируются две локальные радиотелеметрические сети: Петропавловская и Ключевская. Петропавловская радиотелеметрическая сеть состоит из семи передающих пунк-

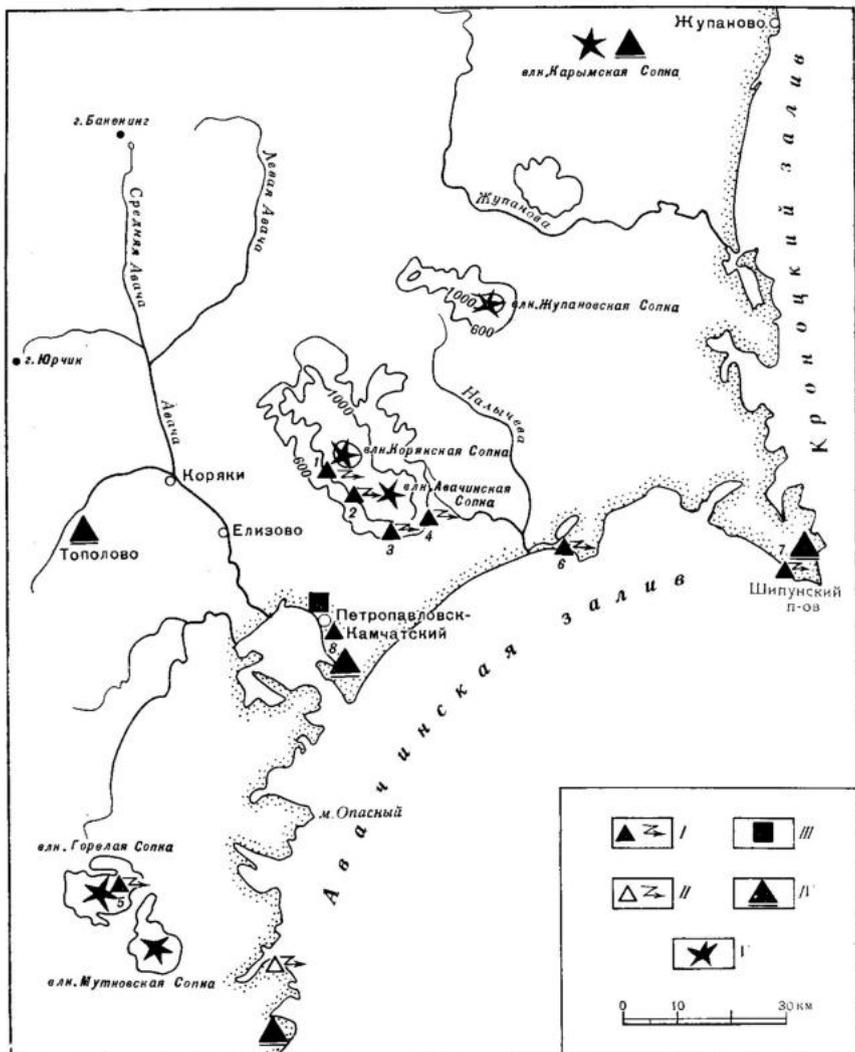


Рис. 4. Схема размещения передающих пунктов радиотелеметрической системы в районе г. Петропавловска-Камчатского. I — Корякская; 2 — Авача; 3 — Булочка; 4 — Козельский; 5 — Горелый; 6 — Налычево; 7 — Шипунский; 8 — Институт I — передающий пункт РТС (действующий); II — передающий пункт РТС (планируемый); III — центр сбора информации; IV — сеймостанции Камчатской региональной сети; V — действующие вулканы

тов, информация с которых поступает на приемный центр в Институт вулканологии, регистрируется и обрабатывается в аналоговом виде по стандартной методике и выборочно регистрируется в цифровой форме на системе накопления данных. Цифровые записи используются в опытным порядке для отладки и организации системы обработки и хранения автоматизированной системы сбора и обработки сейсмологической информации. Основная задача системы — оперативное получение цифровой информации и возможность ее широкой обработки с целью выявления и контроля предвестниковых признаков для прогноза землетрясений. Формирование Петропавловской радиотелеметрической системы сбора и обработки сейсмологической информации находится на стадии завершения, и окончательно система будет состоять из 10—12 передающих пунктов, системы аналоговой регистрации, системы накопления цифровой информации и системы обработки (рис. 4; см. табл. 1).

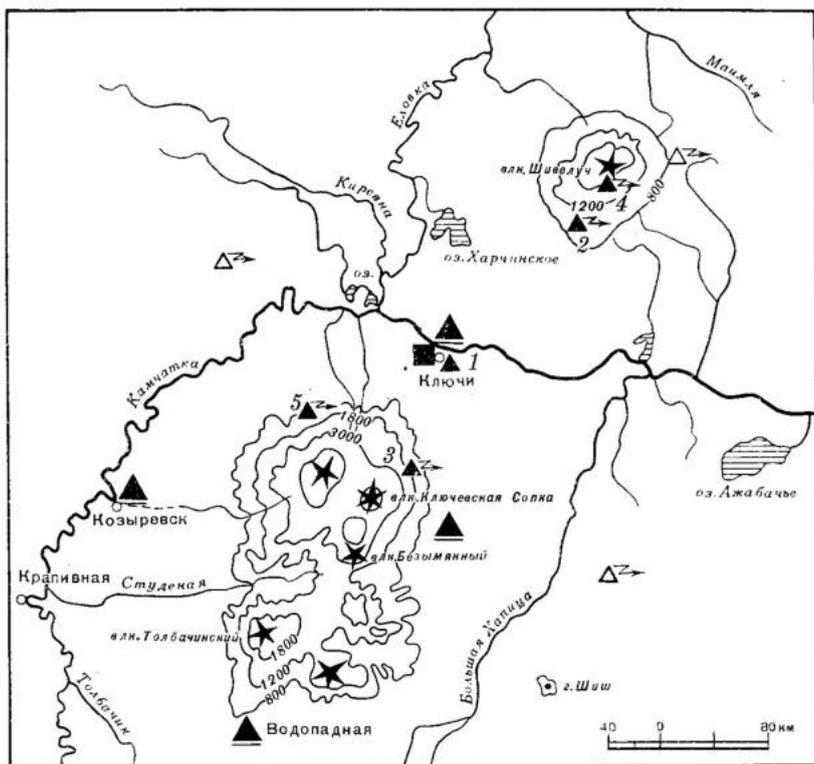


Рис. 5. Схема размещения передающих пунктов радиотелетрической системы в районе г. Ключи. 1 — Ключи; 2 — Шивелуч; 3 — Подкова; 4 — Купол; 5 — Крестовский. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

Подобная система создается в г. Ключи для оперативного слежения за сейсмической активностью Ключевской группы вулканов (вулканы Ключевской, Шивелуч, Безымянный и Толбачик). В настоящее время там работают четыре радиотелетрических пункта, в перспективе намечается иметь 10—14 пунктов (рис. 5; см. табл. 1). С помощью существующих радиотелетрических систем ведется оперативный контроль за сейсмической обстановкой в районе г. Петропавловска-Камчатского и Ключевской группы вулканов, а также развиваются работы по поиску и контролю предвестников сильных землетрясений и извержений вулканов.

Работы по развитию радиотелетрических систем сбора и обработки сейсмологической информации с 1971 по 1986 г. вел В. А. Гаврилов, научным руководителем был С. А. Федотов.

Локальные сети на базе автономных сейсмических станций

Во многих случаях единственно возможный способ организации сейсмических наблюдений — применение автономных сейсмических станций (АСС). Это, например, срочная расстановка сети наблюдений в эпицентральной зоне сильных землетрясений, организация временных локальных сетей для изучения микросейсмичности или для регистрации сейсмических сигналов при извержении вулканов и др.

Серийные образцы аппаратуры такого назначения (станция АСС 6/12 производства Казгеофизприбор) по ряду показателей не удовлетворяют требованиям эксплуатации в труднодоступных районах Камчатки.

В 1982—1983 гг. для проведения наблюдений временными локальными сетями в ОМСП Института вулканологии совместно с кафедрой фи-

зика Земли физического факультета МГУ была разработана автономная сейсмическая станция (АСС) [22]. АСС имеет простую конструкцию, абсолютную калибровку сейсмометрических каналов, полный контроль параметров и малую потребляемую мощность.

По функциональному назначению весь комплекс делится на две части: запись и воспроизведение. Устройство записи вместе с дополнительными приборами и составляет автономную сейсмическую станцию. Устройство воспроизведения располагается в стационарных условиях и позволяет получать видимые записи АСС, вводить записи в ЭВМ и обрабатывать с помощью других вспомогательных приборов.

Основные технические характеристики:

Носитель информации, мм	магнитная лента 12,7
Скорость записи, мм/с	0,5
Скорость воспроизведения, см/с	4,7; 9,5; 19; 38
Число каналов	6 сейсмических, 2 служебных
Динамический диапазон сейсмического канала на двух уровнях, дБ	66
Диапазон регистрируемых частот, Гц	0,2—25
Точность хранения времени не хуже, с	0,1
Срок автономной работы по ленте, сут	12
Потребляемая мощность, Вт	0,3
Масса станции записи без источника питания, кг	25

На рис. 2 представлен стандартный вид АЧХ сейсмических каналов АСС. Величина чувствительности каналов по скорости находится в пределах 4000—9000 с. Тип характеристики (скорость, смещение и ускорение) выбирается при воспроизведении путем включения соответствующих фильтров.

В 1983—1985 гг. была изготовлена малая серия этой аппаратуры. Начиная с 1983 г., с помощью АСС проводились работы по изучению сейсмичности зоны стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, организовывались наблюдательные сети для регистрации вулканического дрожания, землетрясений и взрывов на вулкане Ключевской.

Число землетрясений, регистрируемых АСС, благодаря их высокой чувствительности в несколько десятков раз больше, чем на региональных сейсмостанциях. По опыту постановок локальных сетей на Камчатском полуострове в 1985 г., при обычной сейсмической активности на каждой станции за сутки регистрируется 40—50 землетрясений.

При создании системы обработки в первую очередь внимание было уделено получению результатов стандартной обработки и их хранению. Под стандартной обработкой мы понимаем получение бюллетеней станций и каталогов землетрясений.

На рис. 6 представлена схема организации обработки записей АСС, где отражены все этапы работ: подготовки, регистрации, возможные варианты обработки от визуализации до построения карт эпицентров и создания архива результатов.

Базовой машинной для системы обработки является мини-ЭВМ СМ-4. Работу технических средств поддерживает операционная система RSX-11M. Базы данных организованы при управлении системы управления базами данных (СУБД) Квант-М. Программное обеспечение (ПО) системы обработки разделяется на две части: системное и проблемное.

Системное ПО поддерживает ввод данных в ЭВМ и их преобразование, организует хранение в базе данных и выполняет разнообразные сервисные операции.

Проблемное ПО обеспечивает на основании данных архива получение результата, пригодного для интерпретации сейсмологом. При этом в проблемном ПО выделяется часть, которая должна выполняться в каждом случае для любой локальной сети. Это, например, определение гипоцентров землетрясений и их энергетическая классификация.

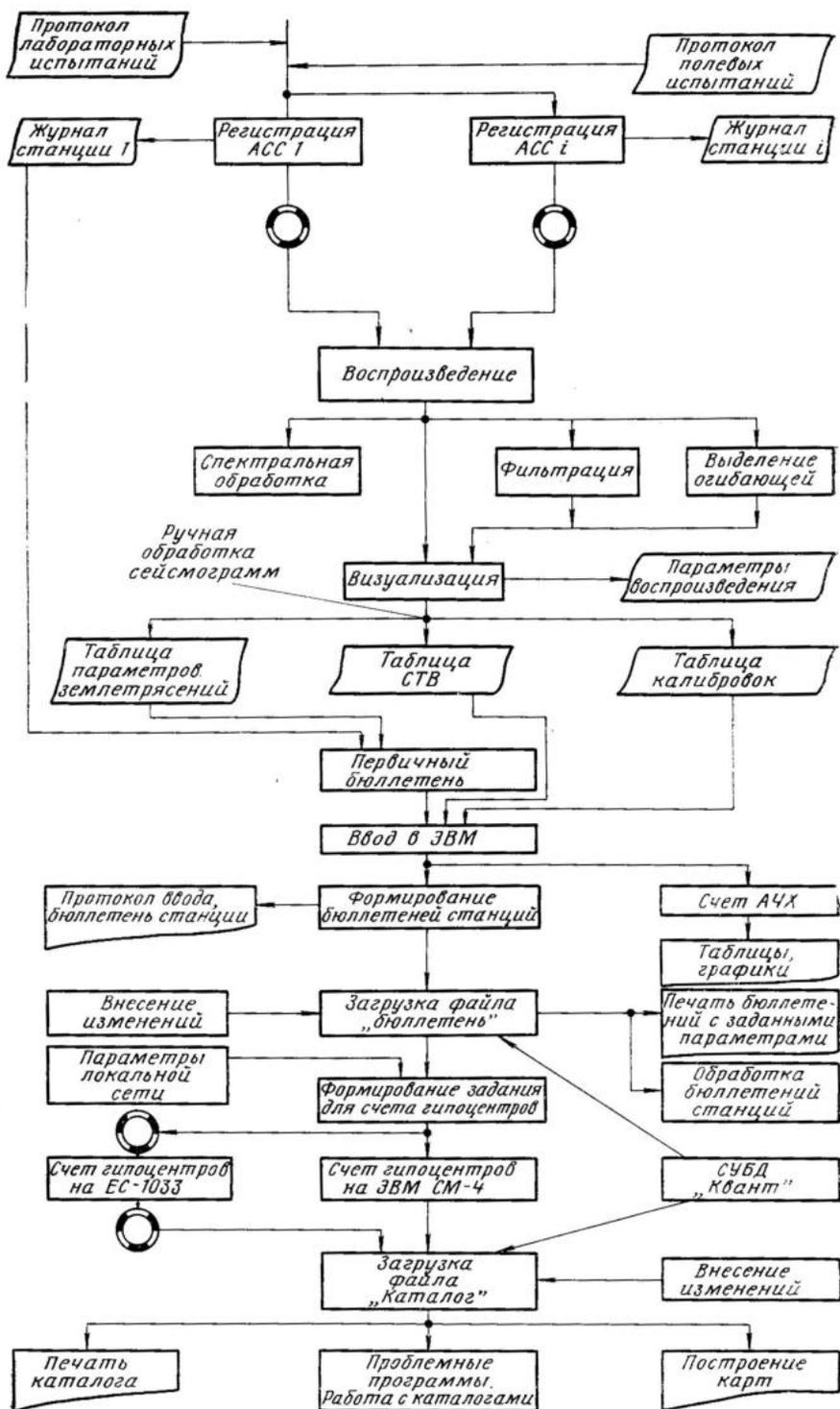


Рис. 6. Схема организации обработки информации, получаемой на автономных сейсмических станциях. Принятые сокращения: СТВ — сигналы точного времени, АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

Окончательно система обработки информации, получаемой на локальных сетях, будет автоматизирована в плане выбора информации, представления ее в цифровом виде и дальнейшей стандартной обработки и хранения.

Работы по созданию автономных сейсмических станций и проведению наблюдений в полевых условиях в 1979—1986 гг. вел В. Н. Чебров под руководством Е. И. Гордеева.

Морские сейсмологические исследования с донными автономными сейсмографами (АДС) в прикамчатских акваториях впервые были начаты Институтом вулканологии в содружестве с кафедрой физики Земли МГУ в 1979—1981 гг. В институте эти работы вел В. Д. Феофилактов, сначала в составе Лаборатории подводного вулканизма, затем в отделе сейсмологии, а в 1984 г. под его руководством была создана специализированная Лаборатория сейсмики морского дна.

Первоначально исследования носили методический характер; результаты постановки буйковых донных сейсмографов в заливах и на континентальном склоне Восточной Камчатки осуществлялись с большими трудностями из-за мощного Курило-Камчатского течения. Первые записи на дне получены в 1981 г. одиночными приборами в более спокойном районе на подводной возвышенности Обручева южнее о-ва Беринга. При этом использовался донный сейсмограф разработки физического факультета МГУ с аналоговой низкоскоростной магнитной записью и высокочастотным (5 Гц) сейсмоприемником.

К 1984—1985 гг. Институт вулканологии благодаря сотрудничеству с институтом СОКТИ АН АрмССР получил партию донных сейсмографов С-016, ставших аппаратурной основой дальнейших исследований. К этому же времени в основном были подготовлены техника и методика морских работ в районе континентального склона. Все это позволило провести в 1984 и 1986 гг. успешные морские экспедиции на НИС «Вулканолог» и получить записи многочисленных подводных землетрясений. Первые же подводные сейсмограммы позволили уточнить режимы чувствительности приборов и оценить донный шум. Тщательность методических работ позволила полностью избежать потерь донных станций в 1984 и 1986 гг. В 26-м рейсе НИС «Вулканолог» (1986 г.) в районе о-ва Беринга и в Авачинском заливе осуществлено 14 успешных постановок донных сейсмографов с длительностью регистрации от 3 до 8 сут; группой из трех приборов с базой около 25 км впервые получены одновременные записи. Первые результаты обработки донных сейсмограмм позволили оценить отклонение времен пробега сейсмических волн от среднего камчатского годографа, а также амплитудные поправки, необходимые для осуществления энергетической классификации землетрясений, записанных донными сейсмографами.

Для района Командорских островов как по наблюдениям с донными сейсмографами, так и по материалам временной станции на о-ве Медный в первом приближении подтвердился океанический годограф И. П. Кузина, имеющий существенное отличие от среднего камчатского годографа из-за повышенной скорости сейсмических волн в верхней мантии под океаном.

Одновременно с освоением методики морских работ, испытанием новой аппаратуры и получением первых наблюдательных материалов осуществлено несколько методических разработок в области калибровки донных сейсмографов [18], техники буйковых постановок и обработки отдельных узлов регистрирующего тракта.

Дальнейшие работы будут направлены на уточнение морских годографов и скоростных разрезов с тем, чтобы донные наблюдения позволили существенно улучшить определение гипоцентров землетрясений в сейсмофокальной зоне.

Заключение

Сейсмичность Камчатки имеет существенные отличия по сравнению с другими сейсмоактивными регионами нашей страны. Во-первых, это самая высокая сейсмическая активность и возможность возникновения землетрясений максимальной энергии (как, например, землетрясение 4 ноября 1952 г. с $M=8,5$), во-вторых, существование объектов, весьма различных по проявлению сейсмичности, таких, как активные вулканы и зона Бенъоффа — Заварицкого, и в-третьих, одностороннее расположение главной эпицентральной зоны по отношению к наблюдательной сети. Все эти особенности создают специфические требования к развитию и организации наблюдательных сейсмометрических сетей. Для повышения точности определения координат землетрясений под дном океана сеть наблюдений расширяется в сторону океана с использованием донных сейсмических станций.

Большой энергетический диапазон землетрясений требует применения аппаратуры с широким динамическим диапазоном, что реализовано в результате применения в Камчатской региональной сети сейсмостанций аппаратуры для регистрации сильных землетрясений. Специальные сейсмологические наблюдения на действующих вулканах проводятся с помощью систем наблюдения, организованных либо радиотелеметрически, либо автономными сейсмическими станциями.

К настоящему времени сформировались четыре аппаратурно различные системы сбора сейсмометрической информации:

1. *Региональная сеть сейсмических станций*, позволяющая надежно регистрировать землетрясения в фокальной зоне Камчатки и Командорских островов (см. рис. 1) в диапазоне энергетических классов от 9,5 до 14 ($3,0 \leq M \leq 6,4$). Стандартная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) регионального сейсмографа (см. рис. 2) является оптимальной (по соотношению сигнал/шум) для аналоговой регистрации. Значительный спад АЧХ в области низких частот вызван интенсивными штормовыми микросейсмами. Расширение полосы пропускания аналогового сейсмографа в сторону низких частот без потери увеличения в высокочастотной части возможно с применением нескольких комплектов различной аппаратуры. Более эффективным средством создания универсальной системы наблюдений в широкой полосе частот и с большим динамическим диапазоном является применение цифровой регистрирующей аппаратуры.

В Камчатской региональной сети сейсмических станций планируется оснащение нескольких станций различными типами аналоговой аппаратуры, а также ведутся работы по применению цифровых методов регистрации.

2. *Сеть станций для регистрации сильных землетрясений* установлена в 8—9-балльной зоне и надежно регистрирует события с проявлением от 3 баллов и выше в пункте регистрации. Применяемая аппаратура позволяет регистрировать либо скорости смещения земной поверхности (ИСОП-С50), либо ускорения (ССРЗ-М) в диапазоне частот от 0,15 до 20 Гц.

3. *Радиотелеметрические системы* создаются для получения оперативной сейсмометрической информации в районах основной концентрации населения (район г. Петропавловска-Камчатского) и на наиболее активных вулканах (на Ключевской группе вулканов). Возможность установки автономных передающих пунктов в труднодоступных районах позволяет увеличить плотность размещения наблюдательных пунктов и проводить детальные исследования за сейсмическим режимом на более низком энергетическом уровне. В настоящее время в радиотелеметрических сетях используется два типа АЧХ (см. рис. 2). Система обработки с использованием вычислительной техники позволяет применять современ-

ные методы и проводить изучение разнообразных свойств сейсмических волн и процессов, происходящих в очаге землетрясений (поляризация, спектральные особенности и др.), а также вести оперативный контроль за сейсмическим режимом действующих вулканов.

В ближайшее время намечено завершение создания системы сбора и обработки сейсмометрической информации радиотелеметрической сети в районе г. Петропавловска-Камчатского и расширение числа передающих пунктов (до 10) для радиотелеметрической сети в г. Ключи.

4. Системы сбора на базе автономных сейсмических станций с магнитной записью применяются для организации локальных сейсмометрических сетей наблюдения в труднодоступных районах с возможностью создания гибкой конфигурации сети. В каждом случае сеть планируется под конкретную сейсмологическую задачу, а использование средств автоматизации и вычислительной техники в системе обработки позволяет получать качественную информацию и обрабатывать большие массивы исходных данных.

Сочетание сейсмометрических сетей различных типов дает возможность достаточно эффективно изучать региональную и локальную сейсмичность, ставить целый ряд актуальных сейсмологических задач. Вместе с тем повышение эффективности действующих сейсмометрических сетей, а тем более их дальнейшее расширение практически нереально без широкого внедрения автоматизированных методов сбора и обработки информации. Поэтому перспективные планы развития Камчатской региональной сети станций предусматривают частичную замену обслуживаемых станций на телеметрические пункты с радио- и проводными каналами связи с централизованной регистрацией в г. Петропавловске-Камчатском или в г. Ключи. При этом станции, замена которых на телеметрические пункты по тем или иным причинам будет нецелесообразна, предполагается оснастить аппаратурой выборочного цифрового накопления сейсмометрических данных и системами, обеспечивающими 1—2 раза в сутки автоматизированную передачу данных в Петропавловский центр. В результате указанная модернизация региональной сети позволяет относиться ко всем имеющимся средствам сбора и обработки сейсмометрической информации как к единой информационно-измерительной сети с унифицированным форматом представления данных.

В области морских сейсмологических наблюдений, в первую очередь для изучения региональной сейсмичности, следует отметить следующие ближайшие задачи. 1. Освоение в акваториях прикамчатских заливов, вплоть до оси глубоководного желоба, наблюдений группами из четырех-пяти донных сейсмографов с базой до 50 км и общей длительностью регистрации 1,5—2 месяца ежегодно. Такая группа может достаточно эффективно обеспечить регистрацию и определение гипоцентров землетрясений, начиная с пятого — шестого энергетического класса.

2. Одновременное изучение локальных особенностей годографов и скоростей сейсмических волн позволит повысить точность определения параметров гипоцентров как автономной морской группой, так и на основе ее данных береговой сетью региональных станций.

Авторы считают своим долгом с благодарностью отметить большой и успешный труд тех начальников отрядов, инженеров, техников и сотрудников сейсмических станций, которые участвовали в детальных сейсмологических наблюдениях на Камчатке и Командорских островах в 1961—1986 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к 70-летию сейсмостанции Петропавловск)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102—106.
2. Гаврилов В. А., Малкин А. П., Чебров В. Н., Сорокин В. В. Радиотелеметрическая

- система сбора сейсмической информации на Авачинско-Корякском полигоне//Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 22—26.
3. Гусев А. А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ// Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 74—81.
 4. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Петропавловское землетрясение 24(25)XI//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 163—171.
 5. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 172—184.
 6. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Иванова Е. И., Митякин В. П. Камчатское землетрясение 28 декабря 1984 г.//Землетрясения в СССР в 1984 г. М.: Наука, 1987. С. 133—143.
 7. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Козырева Н. П., Митякин В. П., Чиркова В. Н. Камчатское землетрясение 17 августа//Землетрясения в СССР в 1983 г. М.: Наука, 1986. С. 102—116.
 8. Ризниченко Ю. В. Методы массового определения координат очагов землетрясений//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 4. С. 425—437.
 9. Соколов Н. Е. Начало работы на сейсмической станции в с. Ключи на Камчатке//Бюл. вулканол. станций. 1949. № 16. С. 20—21.
 10. Токарев П. И. Козыревская сейсмическая станция//Бюл. вулканол. станций. 1960. № 29. С. 54—55.
 11. Токарев П. И. Сейсмические наблюдения на Камчатской вулканологической станции в 1958 г.//Бюл. вулканол. станций. 1962. № 33. С. 20—43.
 12. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
 13. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
 14. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 9. С. 3—5.
 15. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке//Проблемы современной сейсмологии. Голицынский чтения, 1981. М.: Наука, 1985. С. 71—86.
 16. Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 9. С. 1360—1375.
 17. Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г.//Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195—208.
 18. Феофилактов В. Д. Регистрация землетрясений донными станциями. Некоторые вопросы методики//Сейсмологические исследования Мирового океана. М.: Изд-во Междувед. геофизич. комитета при Президиуме АН СССР, 1983. С. 57—64.
 19. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. О стандартизации характеристик региональной сейсмической сети станций и повышении точности наблюдений//Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Изд. ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 234—240.
 20. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. О стандартизации низкочастотной части частотной характеристики регионального сейсмографа//Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1977. С. 37—44.
 21. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. Сейсмические помехи и оптимальное увеличение в Камчатской сети//Сейсмические приборы. М.: Наука, 1979. Вып. 12. С. 152—161.
 22. Чебров В. Н., Сеницын В. И., Попов Е. В., Мельников Ю. Ю., Сергеев В. В., Федоров Е. С. Аппаратура для временных локальных сетей сейсмометрических станций// Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 91—97.