

УДК 550.34

СИСТЕМА ДЕТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ В 2011 г.

© 2013 г. В. Н. Чебров, Д. В. Дрознин, Ю. А. Кугаенко, В. И. Левина,
С. Л. Сеньюков, В. А. Сергеев, Ю. В. Шевченко, В. В. Яшук

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: chebr@emsd.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2012 г.

Приведены основные результаты развития системы сейсмологических наблюдений на Камчатке, данные о системе по состоянию на 2011 год. Дано описание сетей сейсмических станций, системы сбора, хранения и обработки данных сейсмологических наблюдений и их технического, методического и программного обеспечения. Рассмотрены основные характеристики сейсмометрических каналов и системы в целом. Представлены информационные ресурсы банка сейсмологических данных Камчатки, обеспечивающие фундаментальные исследования в области наук о Земле. В 2011 г. система сейсмологических наблюдений на Камчатке представляет собой специализированную сеть сбора (регистрации), хранения, передачи и обработки сейсмической и геофизической информации, которая обеспечивает эффективный мониторинг сейсмической и вулканической активности, а также задачи предупреждения о цунами.

DOI: 10.7868/S0203030613010021

ВВЕДЕНИЕ

1 ноября 2011 г. исполнилось 50 лет с начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Региональная сеть сейсмических станций на Камчатке создавалась Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) ИФЗ АН СССР совместно с Комплексной геолого-геофизической обсерваторией СО АН СССР под руководством начальника ТСЭ С.А. Федотова [Федотов, 1987, 2002, 2003; Федотов, Шумилина, 1981; Федотов и др., 1964; Федотов и др., 1987].

С 1979 г. до настоящего времени сейсмологические наблюдения на Камчатке ведутся [Чебров, 2009]: 1979–1997 гг. – Опытной-методической сейсмологической партией (ОМСП) ИВ ДВНЦ; 1997–2004 гг. – Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) Геофизической службы РАН; с 2005 г. – Камчатским филиалом Геофизической службы (КФ ГС) РАН.

В начале XXI века развитие системы сейсмологических наблюдений на Камчатке определялось задачами, связанными с созданием системы комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений для целей оперативного мониторинга сейсмической и вулканической опасности, с модернизацией службы предупреждения о цунами [Гордеев и др., 2006; Комплексные ..., 2004; Чебров, 2007; 2009]. Работы по модернизации службы предупреждения о цунами (СПЦ) выполня-

лись в рамках федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года”. В 2011 г. на всех стационарных станциях установлены GPS приемники. Данные GPS наблюдений и результаты их обработки дают возможность прямых измерений деформаций земной коры, связанных как с тектоническими движениями, так и с процессами подготовки и реализации сильных землетрясений. В 2010 г. на базе стационарных станций начаты работы по созданию сети наклономеров. С 2010 г. на радиотелеметрических станциях проводятся работы по внедрению видео- и акустических наблюдений на действующих вулканах.

Таким образом, система сейсмологических наблюдений представляет собой в 2011 г. специализированную систему сбора (регистрации), хранения, передачи и обработки сейсмической и геофизической информации [Чебров, 2009; Чебров и др., 2011].

Этапы развития системы сейсмологических наблюдений ранее подробно описывались в [Гордеев и др., 1998; Гордеев и др., 2006; Комплексные ..., 2004; Кроноцкое землетрясение..., 1998; Федотов, 1987, 2002, 2003; Федотов и др., 1964, Федотов и др., 1987; Федотов, Шумилина, 1981; Чебров, 2009; Чебров и др. 2011]. Настоящая статья дает

сведения о состоянии системы сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г., через 50 лет после ее создания.

Система сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. включает в себя:

- сети сейсмических станций;
- систему сбора, обработки, хранения и представления данных наблюдений и результатов их обработки.

СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Сейсмологические наблюдения на Камчатке проводятся как сетями постоянно действующих сейсмических станций, так и путем создания сетей временных локальных станций. Сети постоянно действующих сейсмических станций по состоянию на 2011 г. включают в себя: сеть стационарных цифровых сейсмических станций; сеть радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС); сеть станций регистрации сильных движений (ССД). Деление на сети обусловлено принципами организации и эксплуатации пунктов наблюдений, способами регистрации и передачи сейсмических данных, целевым назначением сетей. В таблице 1 приведены основные сведения по всем сейсмическим станциям Камчатки на 2011 г. Число действующих сейсмических станций, как пунктов регистрации сейсмических сигналов, в 2011 г. составляет 68, на которых установлено 38 короткопериодных велосиметров ($T_c = 1.2$ с), 19 велосиметров ($T_c = 25-360$ с), 30 акселерометров ($a_{max} = 1-2$ г). На рис. 1 показана схема размещения сейсмических станций, оснащенных велосиметрами, на рис. 2 — оснащенных акселерометрами. Динамика развития сетей сейсмических станций на Камчатке с 1961 по 2011 гг. показана на рис. 3. Внедрение цифровых технологий в сети сейсмических станций на Камчатке было начато в 1993 г. с установки оборудования IRIS. Следующим значительным шагом в 1990-х годах было внедрение цифровой регистрации на приемных центрах радиотелеметрической системы. В 2004–2007 гг. цифровое оборудование было внедрено на всех стационарных сейсмических станциях и пунктах регистрации сильных движений. Быстрый рост числа цифровых сейсмических станций в 2007–2011 гг. связан с выполнением НИОКР в рамках федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года”.

Технические средства сетей сейсмических станций. В качестве датчиков сейсмических сигналов используются велосиметры: Guralp (Англия) CMG-3 ($T_c = 120$ с), CMG-6 ($T_c = 30$ с) и CMG-6TD с встроенным регистратором

(<http://www.guralp.com/products>) [Мишаткин и др., 2011]; Streckeisen (Швейцария) STS-1 ($T_c = 360$ с), STS-2 ($T_c = 120$ с); Geotech (США) KS-2000 ($T_c = 100$ с); ОКБ ИФЗ (Россия) СМЗ-КВ ($T_c = 2$ с), СМЗ ($T_c = 1.2$ с) [Аппаратура ..., 1974]; НПП “Геотех” (Россия) СМЗ-ОС ($T_c = 50$ с). Для регистрации сильных движений используются акселерометры Guralp (Англия) CMG-5 (0–100 Гц) и CMG-5TD с встроенным регистратором [Мишаткин и др., 2011]. Компоновка в одном приборе с датчиком сейсмических сигналов высокоэффективных аналого-цифровых преобразователей с регистраторами данных и контроллерами интерфейсов, позволяющими включать такие приборы в телекоммуникационные системы без дополнительных устройств, соответствует современным тенденциям развития оборудования для сейсмологических исследований. Такие подходы нашли широкое применение в первую очередь в сетях акселерографов, при организации временных наблюдений в эпицентральных зонах сильных землетрясений и при проведении инженерно-изыскательских работ (<http://www.guralp.com/products>).

Оборудование для РТСС было разработано еще в 1974–1982 гг. в Институте вулканологии и его Опытно-методической сейсмологической партии под руководством В.А. Гаврилова [Гаврилов и др., 1978, Гаврилов и др., 1987]. Основная цель разработки состояла в необходимости расширения сейсмологических наблюдений с целью контроля активности действующих вулканов. В 1977 г. на Авачинской группе вулканов были открыты первые 4 станции РТСС [Гаврилов и др., 1978]. В 2011 г. в сети РТСС работает 39 пунктов с передачей аналоговых сигналов по радиоканалу в УКВ диапазоне. Для передачи сейсмических сигналов по радиоканалу используется ЧМ-ЧМ модуляция. На всех станциях установлен трехкомпонентный комплект короткопериодных каналов на базе сейсмометров СМ-3 ($T_c = 1.2$ с) для регистрации скорости смещения грунта в полосе 0.8–20 Гц. Сейсмические сигналы всех радиотелеметрических станций на приемных центрах РТСС подаются на входы системы цифровой регистрации на базе ПЭВМ с АЦП производства L-card (<http://www.lcard.ru>). В 2010–2011 гг. в КФ ГС РАН разработаны и опробованы технические и программные средства для демодуляции ЧМ сигналов на приемных центрах РТСС методами цифровой обработки сигналов (<http://www.dsplib.ru/content/fmdemod/fmde-mod.html>) [Сергиенко, 2003].

Разработанный программно-технический комплекс предназначен для полной замены аналоговой части приемных центров РТСС, повышает мобильность сетей РТСС. Комплекс обеспечивает возможность работы с полевыми станциями аналоговой радиотелеметрии любого типа и осуществля-

Таблица 1. Сейсмические станции Камчатской сети

№	Название станции	Код региональный/международный	Дата открытия станции, дд.мм.гггг	Координаты, высота ф°, с.ш./λ°, в.д./ h, м	Каналы регистрации сейсмических сигналов (компоненты)	Дата ввода канала в работу дд.мм.гггг
1	2	3	4	5	6	7
1	Авача	AVH/AVH	16.01.1963	53.264/158.74/960	SH(E,N,Z), EH(Z) BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	01.01.1996 11.09.2011 11.09.2011
2	Автодор	UK4/	25.10.2010	56.234/162.52/5	HN(E,N,Z)	25.10.2010
3	Администрация-ПК	ADM/	01.07.2005	53.023/158.647/5	HN(E,N,Z)	17.02.2010
4	Администрация-УК	UK1/	17.12.2009	56.263/162.586/6	HN(E,N,Z)	17.12.2009
5	Алаид	ALD/ALID	08.08.2001	50.876/155.552/1400	SH(E,N,Z), EH(Z)	08.08.2001
6	Апача	APC/APC	24.02.1990	52.926/157.133/120	BH(E,N,Z), SH(Z)	14.07.2004
7	Арик	KRX/KRX	19.08.2009	53.359/158.649/1410	SH(E,N,Z), EH(Z)	19.08.2009
8	Асача	ASA/ASAK	01.12.2008	52.385/157.901/920	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.12.2008
9	Аэрологическая	AER/	1986	53.086/158.554/97	HN(E,N,Z)	19.01.2011
10	Байдарная	BDR/BDR	08.10.2005	56.568/161.208/720	SH(E,N,Z)	08.10.2005
11	Безымянный	BZM/BZMR	05.08.2006	55.935/160.49/1450	SH(E,N,Z), SL(Z)	05.08.2006
12	Безымянный-Грива	BZG/BZGR	19.08.2007	55.94/160.696/1150	SH(E,N,Z)	19.08.2007
13	Безымянный-Запад	BZW/BZWR	13.08.2007	55.965/160.497/1620	SH(E,N,Z)	13.08.2007
14	Беринг	BKI/BKI	20.11.1962	55.194/165.984/15	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	17.12.2007 17.12.2007
15	Вилочинск	VIL/	01.10.2007	52.931/158.405/40	HN(E,N,Z)	01.10.2007
16	Водозабор	UK2/	12.12.2009	56.232/162.646/2	HN(E,N,Z)	12.12.2009
17	Ганалы	L/GNL	15.01.1988	53.695/157.942/1200	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
18	Горелый	GRL/GRL	14.08.1980	52.554/158.073/1400	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
19	Дальний	DAL/DALK	28.06.2009	53.031/158.754/60	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	28.06.2009 28.06.2009
20	Дачная	DCH/	1971	53.058/158.639/160	HN(E,N,Z)	17.02.2010
21	Жупаново	GPN/	06.12.2009	54.082/159.989/25	HN(E,N,Z)	06.12.2009
22	Звездный	SPZ/	15.06.2010	53.056/158.666/168	HN(E,N,Z)	15.06.2010
23	Зеленая	ZLN/ZLN	30.10.1988	56.017/160.803/1050	SH(E,N,Z)	15.07.1996
24	Институт	INS/INSR	1972	53.067/158.609/170	LH(E,N,Z)	01.01.1996
25	Институт	IVS/	01.10.2007	53.067/158.609/170	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	01.10.2007 01.10.2007
26	Каменистая	KMN/KMNR	27.09.1990	55.756/160.247/1145	SH(E,N,Z), EH(Z)	19.11.1996
27	Каменская	KM1/KMSK	21.06.2010	62.467/166.206/45	BH(E,N,Z)	21.05.2010
28	Карымский	KRY/KII	02.09.1989	54.036/159.449/900	SH(E,N,Z), SL(Z)	01.01.1996
29	Карымшина	KRM /KRMR	17.01.2000	52.828/158.131/90	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	22.12.2010 22.12.2010
30	Кизи́мен	KZV/KZV	28.09.2009	55.113/160.294/1500	SH(E,N,Z), EH(Z)	28.09.2009
31	Киришева	KIR/KIRR	05.08.2006	55.953/160.342/1470	SH(E,N,Z)	05.08.2006
32	Ключи	KLY/KLY	1946	56.313/160.852/70	SH(E,N,Z) BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	15.07.1996 22.01.2011 22.01.2011
33	Козыревск	KOZ/KOZ	17.10.1958	56.058/159.872/60	SH(E,N,Z)	21.06.2001
34	Копыто	KPT/KPT	24.10.1997	55.966/160.222/1000	SH(E,N,Z)	24.10.1997
35	Коряка	KRK/KOK	30.08.1977	53.296/158.643/1050	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
36	Корякский ретранслятор	KRE/KRER	11.02.2009	53.304/158.749/1845	SH(E,N,Z), EH(Z)	11.02.2009

Таблица 1. (Окончание)

№	Название станции	Код региональный/международный	Дата открытия станции, дд.мм.гггг	Координаты, высота ϕ° , с.ш./ λ° , в.д./ h, м	Каналы регистрации сейсмических сигналов (компоненты)	Дата ввода канала в работу дд.мм.гггг
1	2	3	4	5	6	7
37	Крестовский	KRS/KRSR	08.04.1988	56.217/160.565/1180	SH(E,N,Z)	19.11.1996
38	Крутоберегово	KBT/KBTR	14.10.1997	56.208/162.819/360	SH(E,N,Z), EH(Z)	14.10.1997
39	Крутоберегово	KBG/KBG	10.04.1968	56.258/162.713/30	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	16.08.2009 16.08.2009
40	Логинов	LGN/LGNR	01.09.1999	56.083/160.69/2530	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.09.1999
41	Малая Ипелька	MIP/MIPR	11.11.1997	52.276/156.758/370	SH(E,N,Z), EH(Z)	11.11.1997
42	Маяк	MPP/	1980	52.887/158.704/130	HN(E,N,Z)	18.11.2010
43	Мор. порт	UK3/	22.12.2009	56.222/162.523/2	HN(E,N,Z)	22.12.2009
44	Мутновский	MTV/MTVR	01.12.2008	52.484/158.193/1390	SH(E,N,Z)	01.12.2008
45	Мыс Козлова	MKZ/MKZ	25.09.1997	54.556/161.73/520	SH(E,N,Z), EH(Z)	25.09.1997
46	НИГТЦ	НИ/	01.10.2007	53.08/158.641/190	HN(E,N,Z)	01.10.2007
47	Налычево	NLC/NLC	30.03.1984	53.171/159.345/20	SH(E,N,Z), EH(Z) HN(E,N,Z)	01.01.1996 23.12.2010
48	Николаевка	NIC/	01.10.2007	53.046/158.341/25	HN(E,N,Z)	01.10.2007
49	Оссора	OSS/OSSR	02.06.1968	59.265/163.082/20	BH(E,N,Z)	11.08.2007
50	Палана	PAL/PALN	13.11.2008	59.094/159.968/70	BL(E,N,Z)	13.11.2008
51	Паужетка	PAU/PAU	30.04.1961	51.468/156.815/130	BH(E,N,Z), SH(Z) HN(E,N,Z)	10.04.2005 30.10.2007
52	Петропавловск	PET/PET	18.03.1951	53.023/158.65/100	BH(E,N,Z) SH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	15.09.1993 15.09.1993 15.09.1993
53	Русская	RUS/RUS	21.12.1987	52.432/158.513/80	SH(E,N,Z), EH(Z) HN(E,N,Z)	01.01.1996 21.12.2010
54	Рыбачий	RIB/	01.10.2007	52.918/158.533/100	HN(E,N,Z)	01.10.2007
55	Седловина	SDL/SDLR	17.12.1991	53.278/158.887/1230	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
56	Семкарок	SMK/SMKR	18.09.2005	56.582/161.468/895	SH(E,N,Z)	18.09.2005
57	Сомма	SMA/SMAR	27.02.1991	53.266/158.812/2050	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
58	Сорокина	SRK/SRKR	18.09.2005	56.654/161.168/845	SH(E,N,Z)	18.09.2005
59	Срединный	SRD/SRDR	04.01.1992	56.319/159.693/830	SH(E,N,Z)	19.11.1996
60	Тилички	TL1/TILK	04.12.2008	60.446/166.145/25	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	02.05.2009 02.05.2009
61	Тумрок	TUM/TUMR	25.07.2003	55.283/160.146/1210	SH(E,N,Z), EH(Z)	25.07.2003
62	Тумрок_источники	TUMD/TUMD	18.03.2011	55.203/160.399/486	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	18.03.2011 18.03.2011
63	Угловая	UGL/UGLR	19.08.1992	53.21/158.829/1200	SH(E,N,Z), EH(Z)	01.01.1996
64	Ходутка	KDT/KDTR	10.12.2009	51.809/158.077/40	BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	10.12.2009 10.12.2009
65	Цирк	CIR/CIRR	16.10.1998	56.115/160.748/1450	SH(E,N,Z)	16.10.1998
66	Шипунский	SPN/SPN	25.08.1962	53.105/160.011/70	SH(E,N,Z), EH(Z) BH(E,N,Z) HN(E,N,Z)	01.01.1996 08.07.2011 08.07.2011
67	Школа	SCH/	01.10.2007	52.958/158.674/70	HN(E,N,Z)	01.10.2007
68	Эссо	ESO/ESO	24.11.1965	55.932/158.695/490	BH(E,N,Z), SH(Z)	16.12.2004

Примечание. Обозначения каналов регистрации сейсмических сигналов по табл. 2.

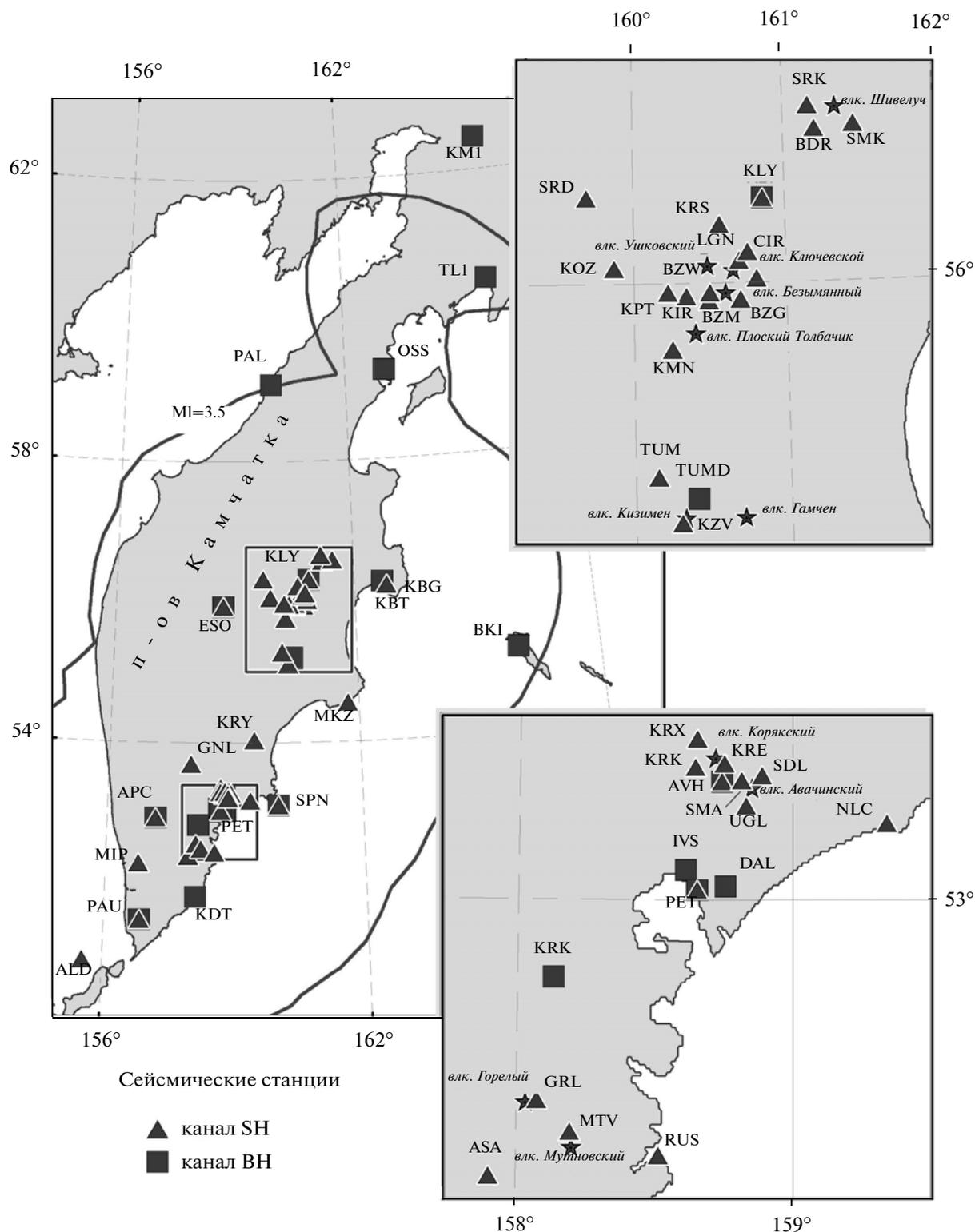


Рис. 1. Схема сейсмических станций Камчатки, оснащенных короткопериодными (SH) и широкополосными (BH) велосиметрами. $MI = 3.5$ – расчетный контур надежной регистрации землетрясений с локальной магнитудой более 3.5. На врезках показано размещение станций в районе г. Петропавловска-Камчатского и Ключевской группы вулканов. Коды станций приведены в табл. 1.

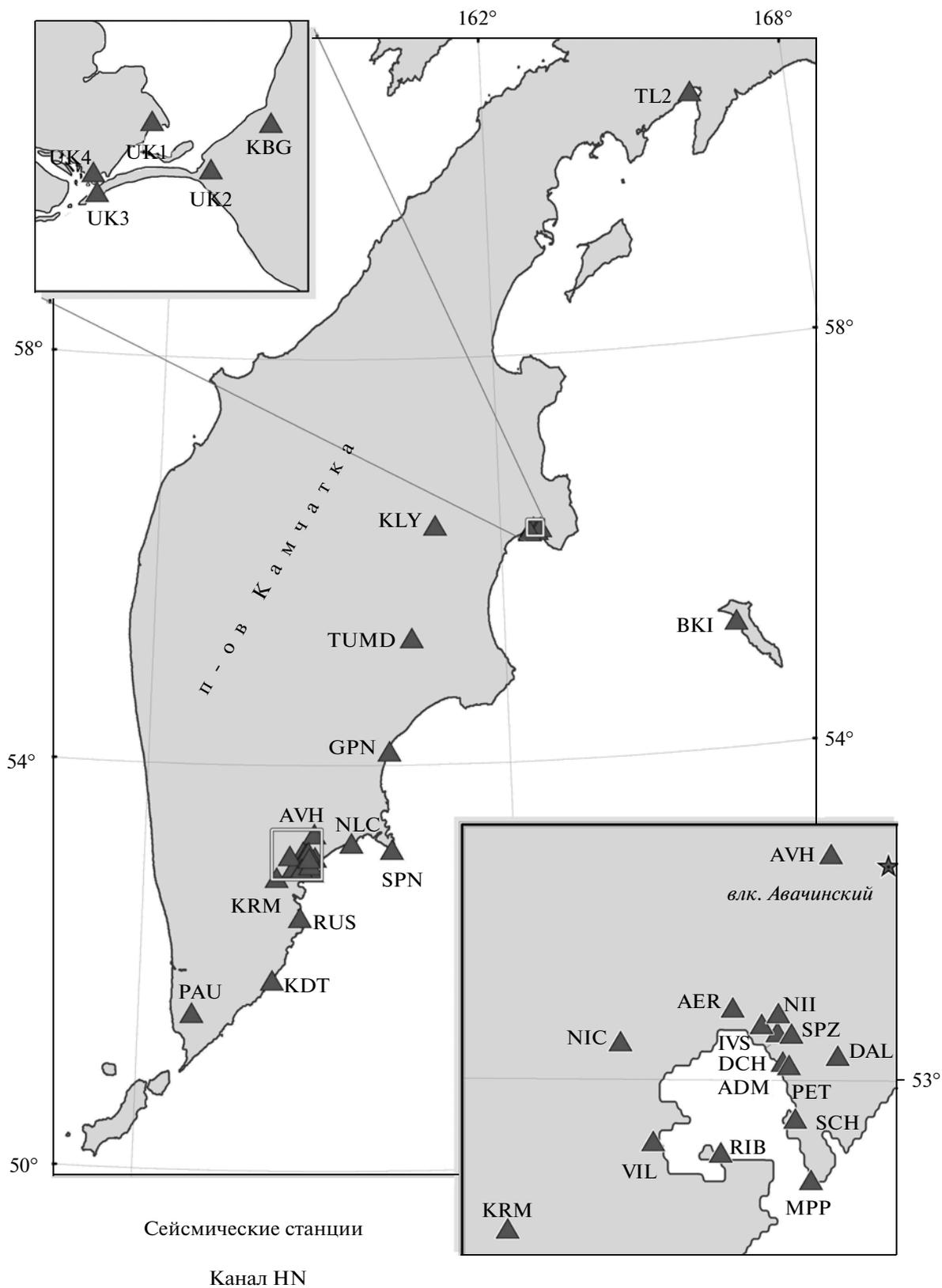


Рис. 2. Схема сейсмических станций Камчатки, оснащенных каналами регистрации ускорений (HN). На врезках показано размещение станций в районе г. Петропавловска-Камчатского и п. Усть-Камчатск. Коды станций приведены в табл. 1.

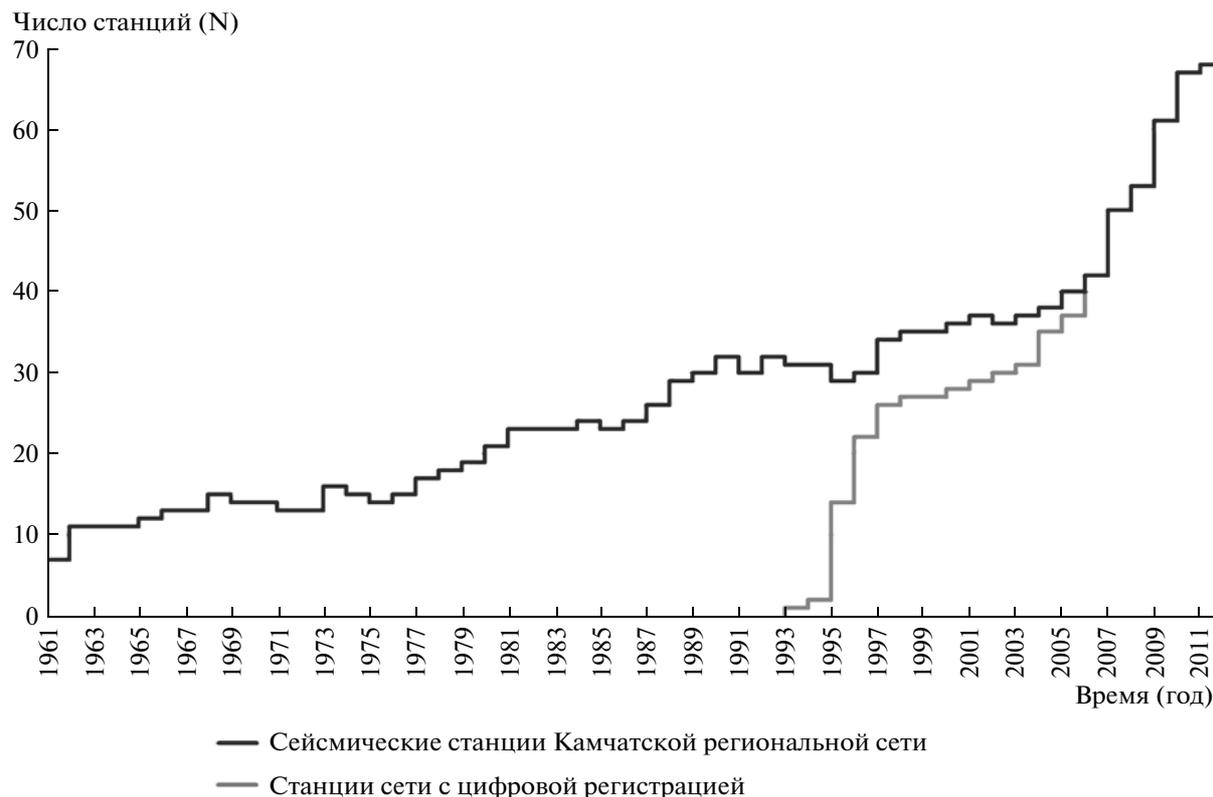


Рис. 3. Динамика развития сетей сейсмических станций на Камчатке.

ет согласование, накопление и представление данных оператору для их просмотра и обработки.

Внедрение цифровой обработки сигналов на приемных центрах РТСС обеспечивает за счет понижения аппаратных шумов расширение динамического диапазона регистрируемых сигналов не менее чем на 6Дб и повышает за счет уменьшения количества аналоговых элементов в измерительном тракте долговременную стабильность характеристик сейсмометрических каналов.

Оборудование цифровой регистрации сейсмических сигналов. Для цифровой регистрации сейсмических сигналов используется оборудование, разработанное в 2002–2005 гг. в КФ ГС РАН (стационарная цифровая сейсмическая станция (СЦСС) [Чебров и др., 2006]) и зарубежных специализированных фирм GSR-24 (GeoSIG, Швейцария), DM 24 (Guralp, Англия) как внешний, так и в составе датчиков CMG-6TD, CMG-5TD [Мишаткин и др., 2011].

СЦСС [Чебров и др., 2006] состоит из блока преобразования аналоговых сигналов в цифру на базе 24-х разрядного АЦП E-24 производства L-card (<http://www.lcard.ru/>), регистратора на базе промышленной микро-ЭВМ, приемника сигналов времени GPS, системы архивации и обработки, системы связи (передачи данных), комплекта

сейсмометров CM3-OC, системы резервного питания. Программные и аппаратные средства регистратора данных – узла сети сбора и передачи данных позволяют путем минимальных доработок подключать различные первичные цифровые источники сигналов. Это могут быть как различные АЦП с последовательным интерфейсом, так и регистраторы сейсмических сигналов российских и зарубежных производителей, поддерживающие режим “дигитайзера”. Предусмотрены отладка и контроль работы системы в дистанционном режиме.

Регистратор GSR-24 является системой регистрации сейсмических данных с высоким динамическим диапазоном с разрешающей способностью 24 разряда. В качестве датчиков к регистраторам могут подключаться сейсмометры, акселерометры, геофоны или другие датчики, имеющие выходное напряжение в пределах ± 20 В (<http://www.geosig.com/>).

Guralp CMG-DM24 (<http://www.guralp.com/products>) современный многоканальный цифровой преобразователь для получения сейсмических данных. Модуль CMG-DM24 имеет ряд исполнений. DM24 для автономной установки используется при регистрации сигналов аналоговых датчиков, а установленный в корпусе датчика, становится его физиче-

ской частью. Применение встроенного в датчик цифрового преобразователя обеспечивает лучшие характеристики по уровню шума и точности.

Гибкая система управления режимами регистрации позволяет одновременно выводить данные в канал связи и регистрировать во внутренней памяти на флэш-карте или жестком диске. Регистраторы DM24 разных модификаций используются на стационарных, радиотелеметрических станциях и на пунктах регистрации сильных движений.

Для временной привязки у всех типов регистраторов имеются внутренние часы, синхронизируемые сигналами времени с GPS-приемника.

Сеть стационарных сейсмических станций. Сеть стационарных сейсмических станций работает на Камчатке уже более 50 лет. С момента создания в 1961 г. станции региональной сети были оснащены короткопериодными сейсмографами с гальванометрической регистрацией ВЭГИК-ГБИУ ($T_c = 1.2$ с). Типовое увеличение сейсмометрических каналов всех станций составляло 5000, 10000. Динамический диапазон при регистрации на фотобумагу составлял не более 40 Дб. Для расширения диапазона регистрируемых сигналов по одной горизонтальной компоненте вводился канал с понижением чувствительности на 20 Дб. За время более чем 40-летней работы станций с гальванометрической регистрацией накоплен большой архив бумажных сейсмограмм, который сейчас хранится в КФ ГС РАН. Малый частотный и динамический диапазон, присущие гальванометрической регистрации, сужали возможности использования получаемых данных задачами на уровне исследований региональной (локальной) сейсмичности.

Значительную роль при создании региональной сети имели базовые наблюдения на сейсмической станции “Петропавловск” (PET), которая имела и имеет статус опорной станции в Единой системе сейсмических наблюдений в России [Чебров и др., 2011]. Станция “Петропавловск” работает в непрерывном круглосуточном режиме по регламентам службы срочных донесений о сильных землетрясениях России и мира и службы предупреждения о цунами. Начиная с 1993 г., станция “Петропавловск” входит в глобальную сеть цифровых станций GSN, оснащена широкополосным велосиметром STS-1 ($T_c = 360$ с), короткопериодным GS13 ($T_c = 1$ с) и трехкомпонентным акселерометром FBA-23, оборудованием регистрации фирмы Kinemetrix “Quanterra”/24. Данные станции “Петропавловск” в режиме, близком к реальному времени, доступны всем мировым сейсмологическим центрам.

В 2012 г. все стационарные сейсмические станции оснащены оборудованием с цифровой реги-

страцией. Станции “Паужетка”, “Апача”, “Оссора”, “Эссо” оснащены оборудованием СЦСС и велосиметрами CM3-OC ($T_c = 50$ с), CM3-KB ($T_c = 2$ с).

На станциях “Тилички”, “Беринг”, “Крутоберегово” и “Институт”, которые входят в сеть специализированных станций для службы предупреждения о цунами, установлены широкополосные трехкомпонентные велосиметры CMG-3TB ($T_c = 120$ с) и акселерометры CMG-5T в комплекте с 24-х разрядными регистраторами GSR-24 [Мишаткин и др., 2011; Чебров, 2007; Чебров и др., 2009]. На базе сейсмических станций “Крутоберегово” и “Институт” созданы опорные станции (ОЦС) для службы предупреждения о цунами “Усть-Камчатск” и “Петропавловск”, представляющие собой сейсмические группы с выносными пунктами, оснащенными акселерометрами CMG-5T и CMG-5TD [Чебров и др., 2010]. На станции “Палана” установлен велосиметр STS-2 ($T_c = 120$ с) с регистратором GSR-24, на станции “Ключи” – велосиметр KS-2000 ($T_c = 100$ с) с регистратором CMG-DM24.

В июне 2010 г. вместо ранее существовавшей станции “Каменское” (KAMR) введена в действие новая сейсмическая станция “Каменская” (KMSK), на которой установлен велосиметр CMG-6TD.

На рис. 4 показана структурная схема ОЦС “Усть-Камчатск” в сейсмической подсистеме СПЦ, представляющая собой сейсмическую группу с центральным элементом на базе станции “Крутоберегово” и 4-х выносных пунктов. Опорная сейсмическая станция сейсмической подсистемы предназначена для защиты населенных пунктов, ответственных объектов или участков побережья с высокой опасностью от локальных цунами [Чебров, 2007; Чебров и др., 2009; Чебров и др., 2010]. Оператор ОЦС только по своим данным может оценить параметры сильного землетрясения в ближней зоне, получить информацию об интенсивности сейсмических воздействий, вызываемых землетрясениями. ОЦС оснащены техническими и программными средствами для сбора и обработки данных, их накопления, хранения и передачи данных и результатов их обработки в региональный информационно-обрабатывающий центр в режиме, близком к реальному времени по каналам связи.

Наиболее ярким примером комплексирования наблюдений на стационарах является комплексная геофизическая обсерватория (КГО) “Карымшина”, которая была создана в 1999 г. в рамках проекта международного научно-технического центра (МНТЦ) при сотрудничестве с японскими специалистами и учеными. На КГО “Карымшина” проводятся совместные сейсмические, геофизические, гидрогеохимические и другие на-

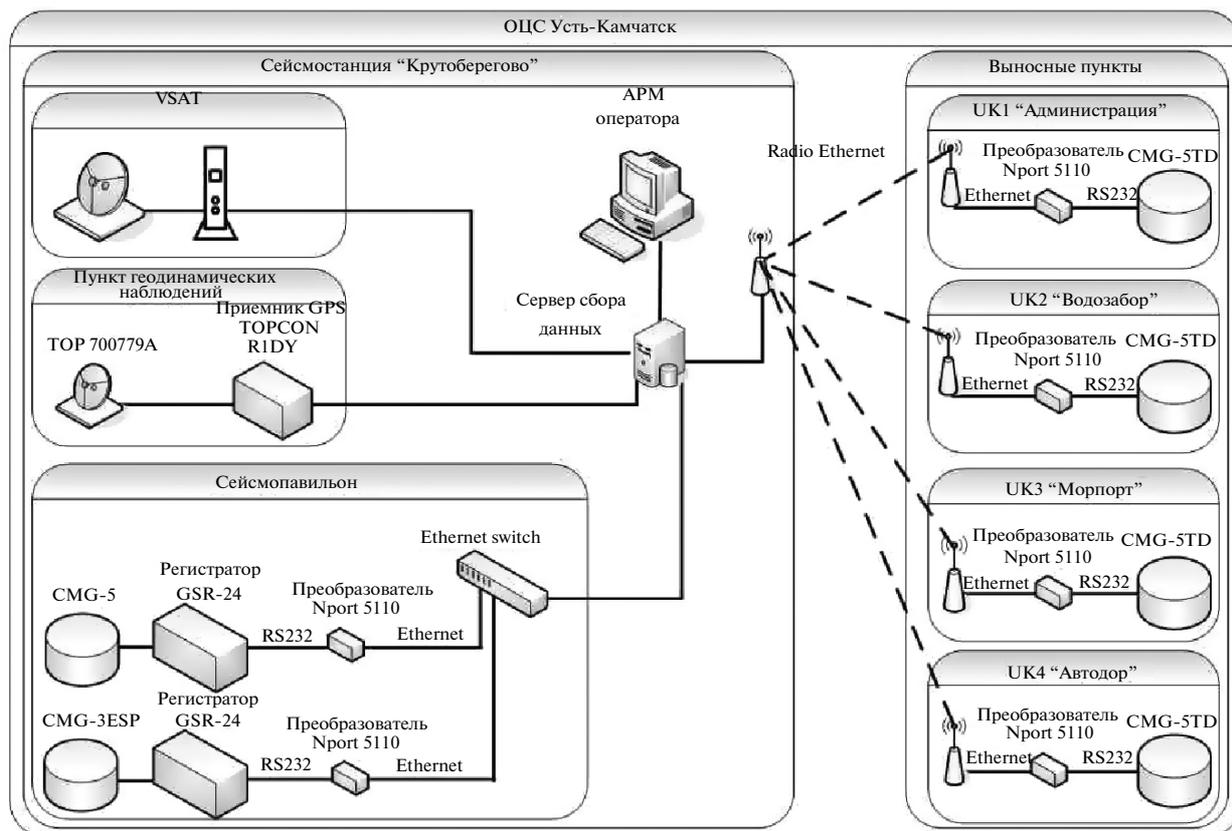


Рис. 4. Структурная схема ОЦС "Усть-Камчатск".

блюдения с целью поиска и исследований предвестников сильных землетрясений, что позволит приблизиться к пониманию процессов их подготовки и реализации.

Сеть радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС). Сеть РТСС Камчатки включает в себя три группы станций: Петропавловская (20 станций), Козыревская (10 станций), Ключевская (9 станций). С 1996 г. все приемные центры РТСС оснащены системами цифровой регистрации на базе ПЭВМ. Накопление данных ведется на жестких дисках и DVD. Приемные центры РТСС в п. Ключи и п. Козыревск с помощью каналов передачи данных включены в локальную вычислительную сеть КФ ГС РАН. Данные всех сейсмометрических каналов всех станций РТСС доступны операторам регионального информационно-обрабатывающего центра КФ ГС РАН в г. Петропавловск-Камчатский в режиме реального времени.

С 2010 г. начаты работы по модернизации сети РТСС по следующим основным направлениям:

- внедрение в сети РТСС широкополосных сейсмометрических каналов (велосиметры, акселерометры) для целей предупреждения о цунами

и регистрации полного спектра сейсмических сигналов, характеризующих вулканическую деятельность;

- развитие на базе пунктов сетей РТСС системы видео, акустических, деформационных и других геофизических наблюдений на активных вулканах Камчатки;

- внедрение в сети РТСС цифровых каналов связи с высокой пропускной способностью.

На рис. 5 приведена типовая блок-схема автономного пункта комплексных наблюдений нового поколения. Примерами служат модернизированные в 2010–2011 гг. пункты РТСС "Авача", "Русская", "Шипунский", "Нальчево" и вновь созданные "Тумрок-источники", "Водопадный", "Жупаново". Все они оснащены современными цифровыми сейсмическими датчиками CMG-6TD, CMG-5TD (Guralp, Англия). Передача данных в реальном времени с пунктов "Авача", "Русская", "Нальчево" обеспечивается оборудованием WiFi в диапазоне 5 ГГц, с пунктов "Шипунский", "Тумрок-источники", "Водопадный", "Жупаново" по спутниковым каналам VSAT. На рис. 6 приведено фото модернизированного пункта РТСС "Русская".

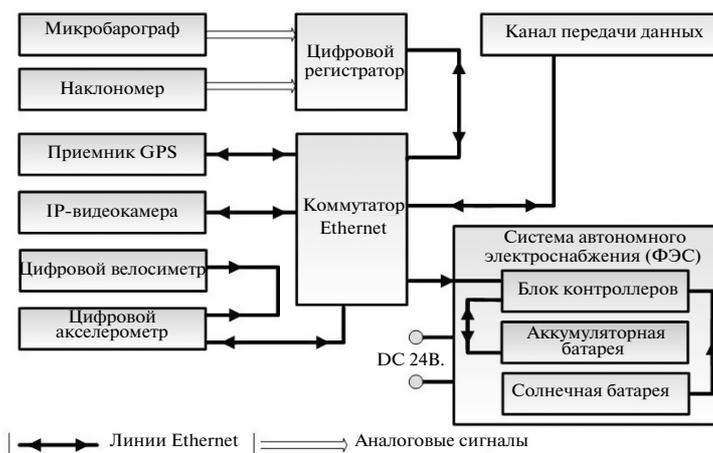


Рис. 5. Типовая блок-схема автономного пункта комплексных наблюдений нового поколения.



Рис. 6. Фото модернизированного пункта РТСС "Русская".

Автономный источник питания для цифровых пунктов РТСС реализован на солнечных панелях (фотоэлектрические модули серии MSW предприятия "Солнечный Ветер" (Краснодар) общей мощностью не менее 500 Вт и герметичных необслуживаемых аккумуляторах CSB MSJ емкостью

не менее 200 А · час, имеющих срок службы 20 лет [Мишаткин и др., 2011]. Эффективность солнечных панелей в сильной степени зависит от времени года и метеорологических условий. Для обеспечения бесперебойной работы пункта расчетная мощность солнечных панелей должна быть в 10–

20 раз больше, чем фактическая потребляемая мощность пункта РТСС.

Сеть станций сильных движений (ССД). Назначение сети станций сильных движений состоит в регистрации сильных землетрясений, когда все другие сейсмометрические системы неработоспособны. Результаты работы сети ССД, кроме научно-исследовательского значения, имеют важные практические приложения при строительстве в сейсмоопасных зонах. Записи сильных землетрясений, получаемые станциями сильных движений, лежат в основе исследований свойств очага землетрясения (источника колебаний), характера затухания амплитуд с расстоянием, влияния грунтово-геологических условий, соотношения колебаний грунта с фактическими повреждениями зданий.

Создание сети станций сильных движений на Камчатке началось в 1962 г. размещением автоматической установки УАР [Аппаратура ..., 1974; Гордеев и др., 2006] на станции “Петропавловск”, затем УАРы установили на станции “Беринг” в 1964 г. и на станции “Крутоберегово” в 1968 г. К 2004 г. сетью ССД (без станции IRIS) было зарегистрировано 60 сильных землетрясений, среди них — сильнейшие: 24.11.1971 г. $M = 7.3$; 28.12.1984 г. $M = 7.5$; 02.03.1992 г. $M = 7.1$; 08.06.1993 г. $M = 7.4$; 05.12.1997 г. $M = 7.9$.

Вместе с тем, оборудование станций ССД к началу XXI века безнадежно устарело, представляло собой аналоговые регистраторы с гальванометрической записью на фото- или киноплёнку с малым динамическим диапазоном и необходимостью оцифровки получаемых записей на специальных установках.

В 2004 г. было положено начало переоснащению сети станций ССД, 5 пунктов были оснащены 24-х разрядными цифровыми акселерографами.

В последующие годы основное развитие сеть ССД получила в рамках модернизации системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами [Чебров, 2007; Чебров и др., 2009].

По состоянию на 2011 г. сеть ССД на Камчатке состоит из 30 пунктов (см. рис. 2), все оснащены 24-х разрядными цифровыми регистраторами и акселерометрами Guralp CMG-5, максимальное регистрируемое ускорение до 1–2 g. В районе г. Петропавловска-Камчатского имеется 14 пунктов ССД.

С внедрением в сеть ССД цифровых акселерографов резко увеличилось получаемое число записей землетрясений, удовлетворяющие критериям выборки (превышение порога амплитуды ускорения 0.025 g или скорости 0.05 см/с). За 2004–2011 гг. получено около 6000 записей.

Число пунктов ССД на территории Камчатки и г. Петропавловска-Камчатского катастрофически мало. В других странах, где сейсмическая опасность так же высока, в США, Японии, Турции, Италии и др. сети акселерографов получили несоизмеримо большее развитие. Данные регистрации сильных землетрясений в разнообразных грунтовых условиях дают возможность надежно оценивать реальные характеристики сейсмических воздействий на территорию, на здания и сооружения, что обеспечивает их надежное проектирование и строительство, а значит и снижение сейсмического риска.

Временные сети для наблюдений в эпицентральных зонах сильных землетрясений и на активных вулканах. Временные локальные сейсмометрические сети (ВЛСС) и детальные полевые сейсмологические наблюдения всегда ориентированы на конкретный локальный объект и на решение конкретных научных и практических задач. Такими объектами на Камчатке являются: активные вулканы, эпицентральные зоны сильных землетрясений, сейсмически активные разломные зоны, населенные пункты и окружающая их территория и др. Среди научных и практических задач можно назвать: исследования связи сейсмического режима и активности вулканов; исследования очагов сильных землетрясений и строения верхних горизонтов земной коры; сейсмическое районирование. Основная задача таких сетей — это регистрация сейсмических сигналов от землетрясений или шумовых сейсмических сигналов (микросейсм, техногенные шумы, вулканическое дрожание) в максимально возможном частотном и динамическом диапазоне.

В XX веке для организации ВЛСС использовались автономные сейсмические станции (АСС) с записью сейсмических сигналов на магнитную ленту [Чебров и др., 1987]. При помощи АСС были проведены работы по исследованиям штормовых микросейсм, по изучению афтершоковых процессов в эпицентральных зонах сильных землетрясений, по изучению сейсмичности территории Корякского автономного округа в рамках работ по общему сейсмическому районированию, по изучению вулканического дрожания вулкана Ключевской [Гордеев и др., 2006].

В последние годы для проведения наблюдений путем создания ВЛСС Камчатским филиалом при финансовой поддержке РФФИ были приобретены цифровые портативные широкополосные сейсмометры CMG-6TD производства Guralp Systems, Ltd.

Сейсмометры CMG-6TD относятся к категории портативных широкополосных датчиков сейсмических сигналов со встроенным цифровым регистратором. Основные характеристики

SMG-6TD: частотный диапазон от 0.03 до 100 Гц; чувствительность 2×1200 В/м/с; 3-канальный 24-разрядный АЦП; максимальная частота оцифровки — 200 Гц; встроенная флэш-карта 2–16 Гб; коммуникационные возможности — Wi-Fi, Ethernet. Точная временная привязка информации обеспечивается благодаря GPS-приемнику.

Основными объектами детальных исследований путем организации ВЛСС в последние годы были вулканы Безымянный, Толбачик и Кизимен, а также Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия. Работы проводились в рамках международного сотрудничества и при поддержке РФФИ.

В течение пяти лет (2006–2010 гг.) работала временная сеть широкополосных сейсмических станций в районе вулкана Безымянный. Работы проводились в рамках Исполнительного Соглашения между Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Геофизическим Институтом Университета Аляски и Камчатским филиалом ГС РАН о проведении совместных исследований по Американско-Российско-Японскому проекту “Сотрудничество в области вулканологических исследований и образования” (рис. 7).

В 2009 г. были проведены экстренные полевые сейсмологические наблюдения в районе “Щапинский грабен – вулкан Кизимен”, связанные с обнаружением активизации слабой сейсмичности по данным региональной сети. По результатам работы временной сети удалось показать, что наряду с землетрясениями в Щапинском грабене регистрируются и сейсмические события непосредственно из-под постройки вулкана Кизимен, был уточнен диапазон глубин, в котором регистрировались землетрясения [Фирстов, Шакирова, 2011].

В 2008 г. был разбит полевой сейсмологический полигон в районе Долины Гейзеров (Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия). Наблюдения на полигоне были продолжены и в 2009 г. В ходе полевых работ были выполнены три независимых вида сейсмологических наблюдений, направленных на решение различных задач: регистрация слабой локальной сейсмичности в исследуемом районе; микросейсмическое профилирование; рекогносцировочная регистрация сейсмических сигналов на гейзерном поле. В результате была подтверждена локальная сейсмическая активность низкого энергетического уровня в районе Долины Гейзеров [Кугаенко и др., 2010а], построены глубинные разрезы земной коры до 30 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн. Идентифицирована и пространственно локализована область закристаллизовавшегося магматического очага под депрессией на глубинах 6–10 км. Выяв-

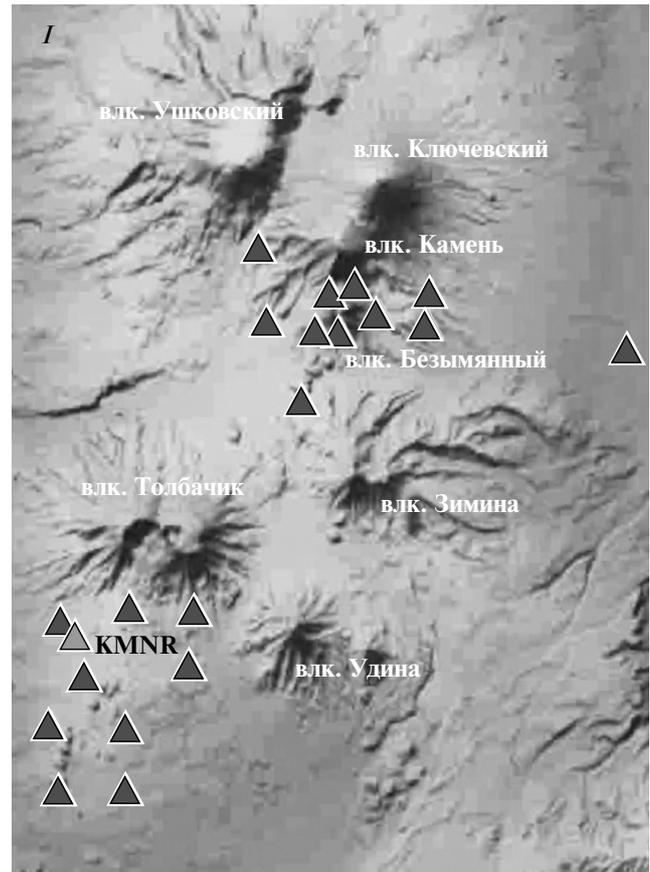


Рис. 7. Временные сети на Ключевской группе вулканов: р-н вулкана Безымянный (2006–2010 гг.) и Толбачинский Дол (2010 г.).

лены и локализованы области предположительной концентрации базальтовых расплавов. Получено согласие геометрии обнаруженных глубинных структур с моделью внедрения магмы в верхние горизонты коры, предполагаемой по данным спутниковой интерферометрии [Кугаенко и др., 2010б].

В 2010 г. были организованы полевые сейсмологические наблюдения в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 г. (БТТИ), Толбачинский Дол, Южная часть Ключевской группы вулканов. Проведенные полевые наблюдения носили мультизадачный характер и включали в себя следующие работы:

- пройден линейный микросейсмический профиль вкост Толбачинского Дола через Северный прорыв БТТИ (общее количество точек на профиле 29);

- начата площадная микросейсмическая съемка центральной части Толбачинского Дола с захватом области Северного прорыва БТТИ (в 2010 г. съемка проведена в 132 точках);

— для уточнения тонкой структуры локальной сейсмичности выполнена регистрация сейсмической микрогруппой с апертурой 17 км десятью локальными станциями, включая РТСС “Каменистую” (см. рис. 7).

По результатам микросейсмического профилирования Толбачинского Дола подтверждено существование малоглубинных магматических очагов, обнаруженных в ходе предыдущих комплексных исследований БТТИ. Новым результатом является локализация питающих каналов извержения. Их конфигурация допускает возможность поступления магмы к поверхности из различных источников, с чем, возможно, связано изменение состава изверженных базальтов в ходе БТТИ. Впервые детально показано строение зоны аркального вулканизма до глубины 20 км с ярко-выраженной сменой характера внедрений глубинного вещества от консолидированного фундамента к осадочной оболочке: субвертикальные формы сменяются преимущественно пластовыми, образуя сложную трещинно-дайково-силловую структуру.

Таким образом, в результате приобретения современных портативных средств регистрации сейсмических сигналов в КФ ГС РАН возобновлены полевые сейсмологические наблюдения. Это позволило оперативно получить новую информацию о вулканических областях, ранее не исследованных геофизическими методами. Подтверждена целесообразность дальнейшего детального исследования районов Шапинского грабена, вулканов Кизимен и Кихпинич и организации здесь локального сейсмического мониторинга. Получены новые данные о глубинном строении Толбачинского Дола и Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии.

Полевые работы в районе Долины Гейзеров и Толбачинского Дола проведены благодаря финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-05-10043, 09-05-10067, 10-05-10059, 10-05-00139).

Основные характеристики системы сейсмологических наблюдений (СН) на Камчатке. К основным характеристикам СН относятся: амплитудный и частотный диапазон регистрируемых сигналов, энергетическая представительность регистрируемых землетрясений, погрешности при определении их координат.

Энергетическая представительность регистрируемых землетрясений определяется характеристиками сейсмометрических каналов станций, уровнем сейсмических шумов (микросейсмь, техногенные шумы), способом представления записей сейсмических сигналов для их обработки и алгоритмами обработки, конфигурацией и плотностью сейсмических станций на исследуемой территории [Гордеев и др., 2006].

Основной задачей сейсмологических наблюдений является непрерывная регистрация всех сейсмических сигналов, включая естественные шумы. При организации сейсмологических наблюдений на Камчатке необходимо иметь возможность регистрировать как сильнейшие тектонические землетрясения с предельно возможными магнитудами $M > 8$ практически в зоне их очагов, так и слабые землетрясения, начиная от $M = 1$ и менее, на активных вулканах.

Динамический диапазон амплитуд смещений грунта от близких слабых и сильных землетрясений на эпицентральных расстояниях 20–100 км лежит в пределах 10–11 порядков, т.е. 200–220 Дб. При этом амплитуды смещений грунта колеблются в пределах от 10^{-4} микрон до сотен сантиметров или в ускорениях до 1 g и более. Частотный диапазон этих сигналов охватывает более 5 декад — от тысячных долей до сотен Герц [Аранович и др., 1983].

Динамический диапазон амплитуд смещений от удаленных землетрясений с магнитудами $M = 4.0–8.0$ на эпицентральных расстояниях (20–100)° составляет 6–7 порядков, т.е. 120–140 Дб [Аранович и др., 1983].

Способность сейсмической станции зарегистрировать и обнаружить землетрясение определяется техническими характеристиками оборудования, а также ее удаленностью от очага, энергией землетрясения и уровнем шума на станции.

Современные сейсмические датчики и регистраторы обеспечивают запись сейсмических сигналов с динамическим диапазоном 120–130 дБ в полосе частот от тысячных до сотен Гц, начиная с минимальных сигналов порядка 10^{-9} м/с. Регистрацию полного динамического диапазона (200–220 Дб) можно обеспечить только набором разнотипных сейсмометрических каналов с разной чувствительностью.

Сейсмические шумы на станциях Камчатской сети. Типовое значение среднеквадратической амплитуды естественного сейсмического шума в характерной для слабых землетрясений полосе частот 1–5 Гц на станциях Камчатской сети летом в ночное время составляет $10^{-7}–10^{-8}$ м/с. Это позволяет зарегистрировать и обнаружить землетрясения с $M < 0.5–1.5$ на дистанции 5–10 км [Аранович и др., 1983].

Максимальных значений сейсмические шумы достигают в зимние месяцы. Уровень шума на всех станциях, как правило, укладывается в модель сейсмического шума Петерсона [Peterson, 1993]. Суточные вариации микросейсмического фона в диапазоне 1–10 Гц наблюдаются практически на всех исследуемых станциях и связаны с хозяйственной деятельностью в населенных пунктах, в которых располагаются станции. На

Таблица 2. Сейсмометрические каналы системы сейсмологических наблюдений на Камчатке

Сейсмометр/тип канала x-смещение, v-скорость, a-ускорение	Уровень передачи, x – отсчет/м, v – отсчет/м/с a – отсчет/м/с ²	Амплитудный диапазон регистрации, x–м, v–м/с, a–м/с ²	Частотный диапазон регистрации, Гц
CMG-3TB+GSR24/ BH(E,N,Z)v	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-2}$	0.0083–40
CMG-6TD/BH(E,N,Z)v	$4 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-3}$	0.033–40
CMG-5T+GSR-24/ HN(E,N,Z)a	$5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-6} - 10$	0–40
CMG-5TD / HN(E,N,Z)a	$6 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-6} - 10$	0–40
CM3 / SH(E,N,Z)v	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	0.7–20
CM3вч / EH(E,N,Z)v	$1 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-6}$	4–20
СКД / LH(E,N,Z)x	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-3}$	0.04–1
CM3ос+СЦСС/ BH(E,N,Z)v	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-3}$	0.02–7
STS-2+GSR24/ BH(E,N,Z)v	$8 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-3}$	0.0083–40
STS-1/BH(E,N,Z)v (IRIS)	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-8} - 8 \cdot 10^{-3}$	0.0027–10
FBA-23/HN(E,N,Z)a (IRIS)	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-6} - 10$	0–25
GS-13/SH(E,N,Z)v (IRIS)	$5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-3}$	1–10

станциях, которые удалены от источников антропогенной деятельности, уровень микросейсмического фона с течением суток остается стабильным. Сезонные вариации уровня шума наблюдаются для всех широкополосных станций в диапазоне частот 0.05–1 Гц. Следует отметить низкий уровень сейсмического шума на станциях PET и PAL. Относительно низким уровнем шума в диапазоне 0.1–40 Гц выделяются станции SPN, KRM, PAU.

Сейсмические шумы различного происхождения следует рассматривать и как полезный сигнал, позволяющий изучать свойства грунтов, строение и характеристики верхней части земной коры, напряженно-деформированное состояние среды с целью прогноза землетрясений.

Характеристики сейсмометрических каналов. Передаточные функции сейсмометрических каналов станций рассчитываются с использованием результатов импульсной калибровки и на основании паспортных данных производителей оборудования (<http://www.guralp.com/products>) [Аппаратура ..., 1974; Шевченко, 1995; Шевченко и др., 1987]. Передаточные функции всех сейсмометрических каналов представляются в виде нулей и полюсов. Оперативный контроль качества и передаточных функций сейсмометрических каналов со всех станций выполняется в Петропавловске-Камчатском.

В табл. 2 сведены все типы сейсмометрических каналов, используемые в системе сейсмологиче-

ских наблюдений на территории Камчатского края в 2011 г., на рис. 8 показаны частотный и амплитудный диапазоны регистрируемых сигналов.

Разрешающая способность сетей станций на Камчатке. На рис. 1 показаны расчетные контуры надежной регистрации по [Аранович и др., 1980] в целом по зоне ответственности КФ. Наибольшая плотность сейсмических станций на территории Камчатского края достигается в районе г. Петропавловска-Камчатского и Авачинского залива, Камчатского залива, на Авачинской и Ключевской группах вулканов. На рис. 9 показаны уровни надежной регистрации по этим районам, полученные по эмпирическим данным.

Система сейсмологических наблюдений Камчатского филиала ГС РАН в 2011 г. обеспечивает уверенную регистрацию землетрясений на всей территории Камчатского края с прилегающими акваториями с магнитудами $M \geq 3.5$ ($K_{SI,2}^{Ф68} \geq 8.5$). Для событий из Авачинского залива – с $M \geq 2.6$ ($K_{SI,2}^{Ф68} \geq 7.0$), для Авачинской группы вулканов – с $M \geq 0.9$ ($K_{SI,2}^{Ф68} \geq 3.5$), для Ключевской группы вулканов – с $M \geq 1.6$ ($K_{SI,2}^{Ф68} \geq 5.0$). Локальная магнитуда M пересчитана из энергетического класса С.А. Федотова по [Гусев, Мельникова, 1990]. Увеличение числа сейсмических станций, изменение конфигурации сетей приводят к изменениям в контурах надежной регистрации землетрясений.

Кроме повышения плотности сейсмических станций для улучшения разрешающей способно-

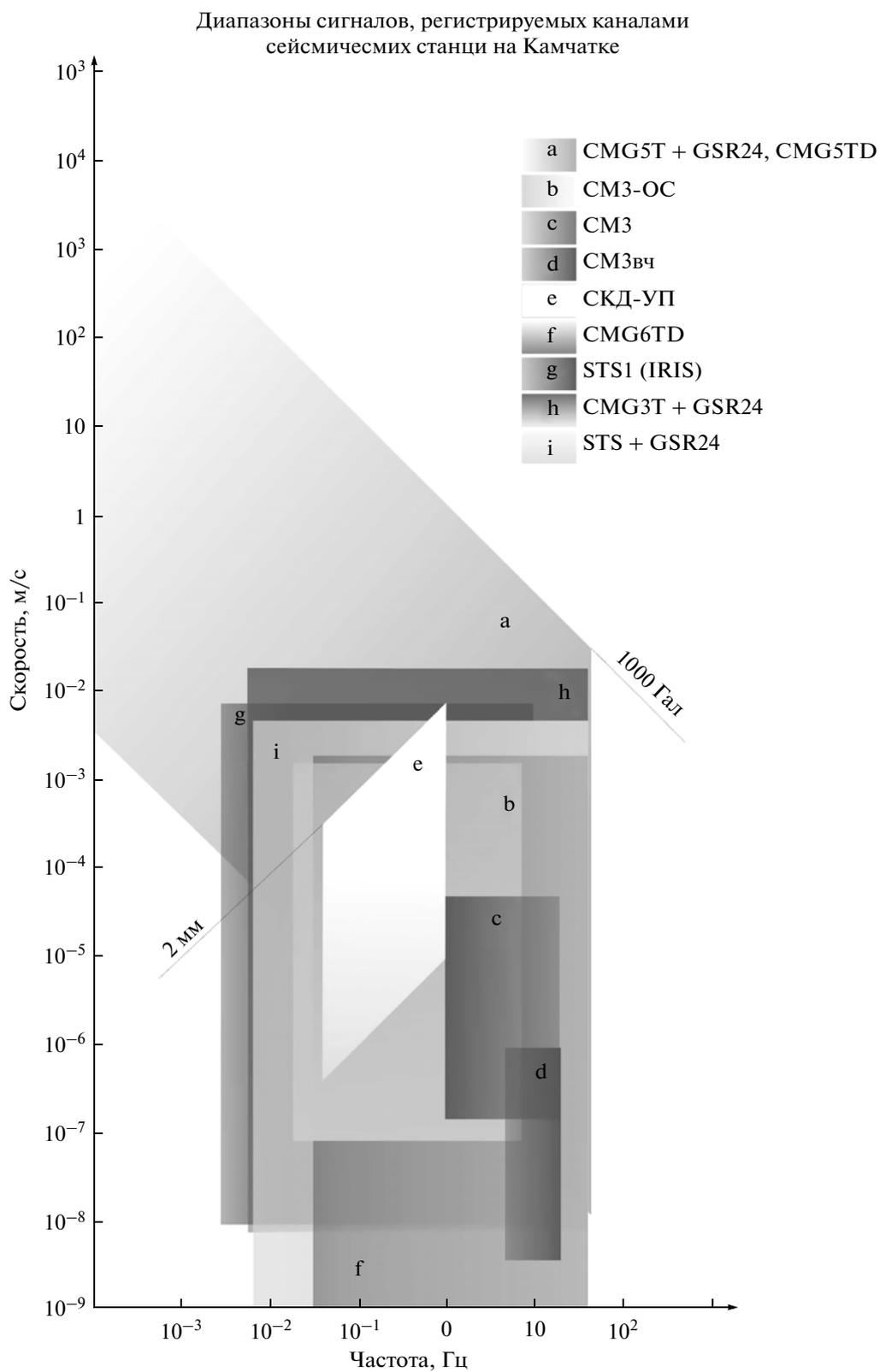


Рис. 8. Частотный и амплитудный диапазон регистрируемых сейсмических сигналов на станциях Камчатки.

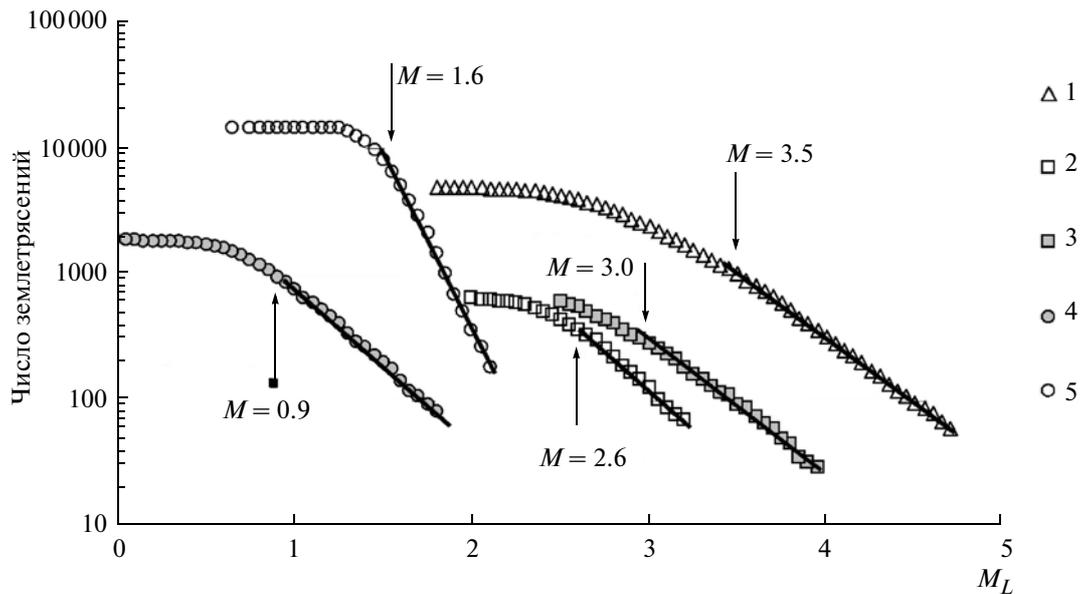


Рис. 9. Графики повторяемости вулканических и тектонических землетрясений, приуроченные к нескольким подзонам региона.

1 – весь регион, 2 – Авачинский залив, 3 – Камчатский залив, 4 – Авачинская группа вулканов, 5 – Северная группа вулканов. Стрелками отмечены пороговые значения представительности получаемых каталогов.

сти сетей большое значение имеет внедрение методов цифровой регистрации и обработки сейсмических сигналов, что позволяет обнаружить и обработать сигналы с минимальным превышением над шумами или даже ниже уровня шумов. Так резкое повышение числа землетрясений в каталоге КФ с 1996 г. связано с внедрением системы цифровой регистрации на приемных центрах РТСС [Гордеев и др., 2006].

Погрешности при определении координат землетрясений зависят от многих факторов: окружение очага землетрясения сейсмическими станциями; точность снятия вступлений основных сейсмических волн; точность используемого при расчетах годографа; принятых модели среды и алгоритма расчета. По [Гордеев и др., 2006] при использовании программы А.А. Гусева, абсолютные ошибки для определений эпицентров камчатских землетрясений – 10 км, для определений их глубины – 20 км [Гусев, 1979]. В то же время ошибки относительного положения близких очагов землетрясений существенно меньше. Детальное исследование ошибок при оценке координат гипоцентра землетрясений после коренной модернизации сетей и программного обеспечения системы обработки, а также увеличения плотности станций будет проведено при наборе достаточной статистики.

Система сейсмологических наблюдений на Камчатке, оснащенная современными цифровыми технологиями, обеспечивает на высоком уровне решение задач мониторинга сейсмической и вулканической активности территории Камчат-

ского края в режимах службы срочных донесений, службы предупреждения о цунами, оперативной и сводной обработки.

СИСТЕМА СБОРА, ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В основе системы сбора, обработки и хранения сейсмологической информации лежит корпоративная сеть КФ ГС РАН, которая включает в себя локальные вычислительные сети региональных ИОЦ ГС РАН “Петропавловск”, “Южно-Сахалинск” и “Владивосток”, удаленных центров сбора данных (опорных сейсмических станций, групп станций, приемных центров РТСС), объединенных цифровыми каналами связи [Чебров и др., 2010]. Включение в сеть КФ ИОЦ “Южно-Сахалинск” и “Владивосток” было обусловлено необходимостью организации оперативной оценки параметров землетрясений в акваториях Тихого океана, Японского, Охотского и Берингова морей в целях предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России.

Система сбора и передачи данных (рис. 10) организована на базе каналов сети Internet, RadioEthernet сетей технологической связи, спутниковых VSAT сетей по технологии “HughesNet” и “Idirect”.

С целью повышения надежности связи для опорных сейсмических станций организовано через разных провайдеров по два канала связи, ко-

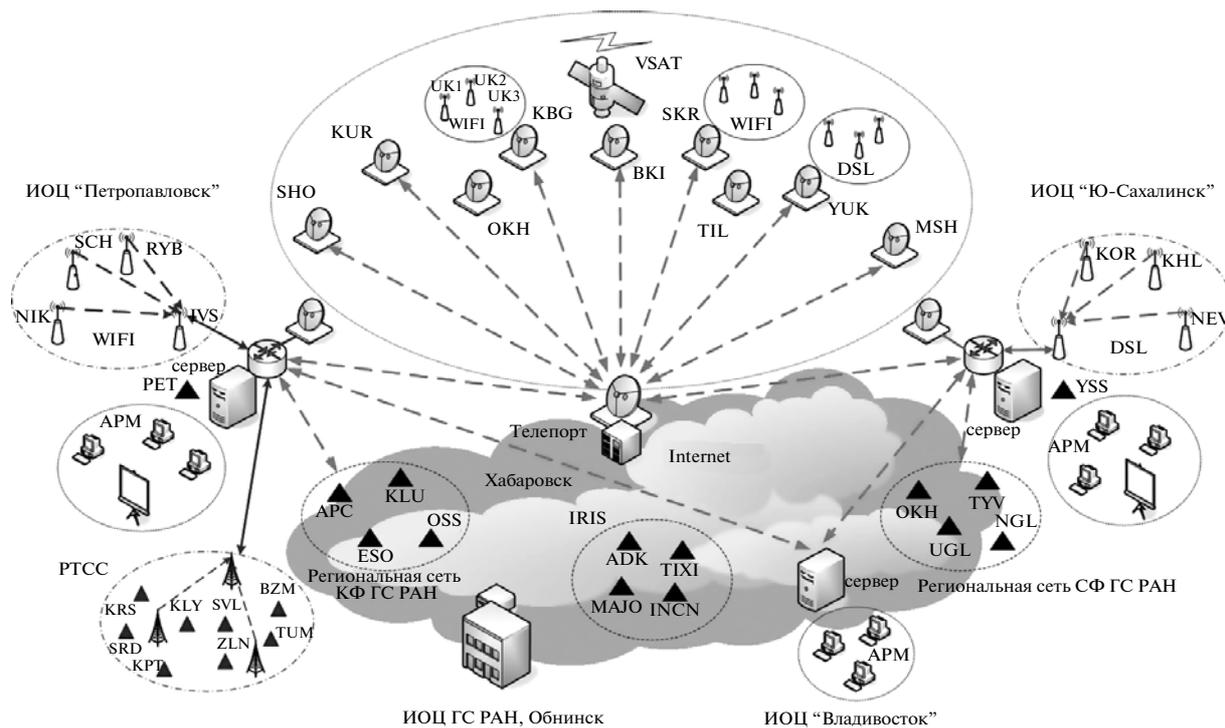


Рис. 10. Система сбора и передачи данных сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России.

торые, в случае аварии, автоматически переключаются с использованием протоколов динамической маршрутизации.

В сети используются специализированные серверы, осуществляющие буферизацию потоков данных с сети станций. Для задач оперативной обработки в целях повышения надежности оценок параметров землетрясений организована буферизация потоков данных со станций IRIS мировой сети сейсмологических наблюдений, расположенных в Тихоокеанском регионе (MIDW, ADK, INCN, MAJO, YAK, YSS, PET, TIXI, BILL). Основным файловым хранилищем являются специализированные архивные серверы сейсмических данных расположенные в ИОЦ "Петропавловск", созданные на основе двух RAID массивов 6-го уровня по 12 TB каждый. Данные хранятся в виде суточных файлов по каждой из станций. Данные сети радиотелеметрических сейсмических станций хранятся в виде суточных файлов по каждому центру сбора.

В сети работают UNIX SQL серверы баз данных. Они обеспечивают работу различных информационных баз данных. Один из серверов выполняет в сети функции Web сервера с возможностью обработки и визуализации данных по запросам клиентов. В сети предусмотрен специа-

лизированный сервер для задач контроля и мониторинга работы сети и основных потоков данных.

Организация и программное обеспечение обработки данных сейсмологических наблюдений. В зависимости от времени задержки выходных результатов обработка данных сейсмологических наблюдений имеет 3 уровня [Гордеев и др., 2006]:

- служба срочных донесений с задержкой до 30 минут;
- оперативная обработка с задержкой до 24 часов;
- окончательная (сводная) обработка с задержкой до одного года.

Служба срочных донесений обеспечивается лабораторией исследования и мониторинга сильных землетрясений (сектор "Петропавловск-Цунами") и лабораторией исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) для всех землетрясений Дальнего Востока России с $M > 5.5$, Камчатки с $M > 4.5$, для района Авачинского залива с $M > 4.0$. Кроме этого по данным РТСС производится оценка параметров камчатских землетрясений с $M > 4.0$ в автоматическом режиме.

Результаты обработки рассылаются в Центры цунами Росгидромета, ГС РАН, МЧС и в Администрацию Камчатского края, а также публику-

ются на официальной странице КФ ГС РАН в Internet (www.emsd.ru).

Лаборатория исследований и мониторинга сильных землетрясений (сектор “Петропавловск-Цунами”) в составе регионального ИОЦ ГС РАН входит также в систему предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке и при возникновении сильного близкого землетрясения у берегов Камчатки и возможной угрозе цунами объявляет тревогу.

В режиме оперативной обработки работают приемный центр РТСС в г. Ключи и лаборатория исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА). После оснащения всех стационарных станций цифровым оборудованием и организацией каналов связи, позволяющих получать их данные в реальном времени на РИОЦ, необходимости в оперативной обработке на стационарных станциях нет. Основная работа в режиме оперативной обработки выполняется в ЛИСВА. Кроме мониторинга региональной сейсмичности, здесь ведется мониторинг вулканической активности. Результаты оперативной обработки землетрясений концентрируются и организуются в базы данных. Оперативный каталог содержит координаты землетрясения, его глубину и энергетический класс $K_{S1.2}^{Ф68}$ по С.А. Федотову [1972]. Для сильных землетрясений определяется магнитуда по коде. Для расчетов координат гипоцентров тектонических землетрясений в оперативной обработке на приемных центрах РТСС с 2010 г. используется программа ПО DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010], годограф И.П. Кузина [1974] и локальные годографы вулканов Авачинский и Ключевской.

Окончательная обработка всех землетрясений совместно по всем наблюдательным сетям производится лабораторией сводной обработки (ЛСО). Для расчетов координат гипоцентров землетрясений с 1978 г. применяется программа А.А. Гусева [1979]. С 2010 г., благодаря развитию в КФ ГС РАН системы сбора данных наблюдений, обеспечивающей доступ к данным всех сейсмических станций в режиме близком к реальному времени, оценки основных параметров землетрясений (координаты гипоцентра, энергия), полученные в оперативном режиме, заносятся в окончательный каталог без изменений. Дополнительные параметры землетрясений, традиционно получаемые ЛСО в течение многих лет, включают в себя: макросейсмические данные, механизмы очагов, а также разнообразные энергетические характеристики землетрясений.

Окончательный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов является основным результатом деятельности КФ ГС РАН.

В работе подразделений КФ ГС РАН, занятых сбором и оперативной обработкой сейсмологической информации, в зависимости от уровня сейсмической и вулканической опасности, выделяются три режима: 1) повседневной деятельности; 2) повышенной опасности; 3) чрезвычайный.

Режим повышенной опасности вводится приказом по КФ ГС РАН на основании заключений о состоянии сейсмической и вулканической опасности на территории Камчатского края Камчатским филиалом Российского экспертного совета (КФ РЭС).

Чрезвычайный режим работы вводится приказом по КФ по факту произошедшего сильного землетрясения или извержения вулкана.

Для автоматизированной обработки сейсмических сигналов используется разработанный в КФ ГС РАН Д.В. Дрозниным пакет программного обеспечения DIMAS “Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms” [Дрознин, Дрознина, 2010]. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010612155. Программа предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с цифровых сейсмических станций. Она специально спроектирована для пользователей, в задачу которых входит быстрое определение параметров землетрясения по одной или группе сейсмических станций в системе сейсмического мониторинга и службе предупреждения цунами.

Для отображения, контроля и обнаружения сейсмических событий используется программа “Дисплей реального времени” (RT-DISPLAY). Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010614694. Разработчик: Д.В. Дрознин (КФ ГС РАН). Программа предназначена для сбора и отображения сейсмических сигналов, поступающих с цифровых сейсмических станций по каналам связи в режиме близком к реальному времени. Она специально спроектирована для пользователей, в задачу которых входит быстрое определение параметров землетрясения по одной или группе сейсмических станций в службах срочных донесений и предупреждения о цунами. Программа оснащена детектором сейсмических сигналов, настраиваемым пользователем, в случае обнаружения которых выдается звуковой сигнал, сигнализирующий о том, что пользователь должен произвести обработку сейсмического события.

На этапе окончательной обработки для расчета гипоцентров землетрясений используется программа GIP [Гусев, 1979].

Для быстрой автоматической оценки параметров потенциально цунамигенных землетрясений в Дальневосточном регионе России используется

программный комплекс “БЛИЦ” [Чебров, Гусев, 2010]. Программный комплекс обеспечивает определение координат и энергетическую оценку землетрясений с магнитудой более 5.5 не позднее, чем через 5.5 минут с момента начала регистрации события сетью станций. Точность оценки координат (медианная оценка) составляет менее 1 градуса дуги большого круга, а точность оценки магнитуды по поверхностным волнам (шкала $M_S(20R)$) – около 0.2 (по сравнению с оценками NEIC и оценками $M_S(PET)$). Кроме традиционных энергетических оценок определяются параметры движения грунта на сейсмических станциях и инструментальные оценки макросейсмической интенсивности по шкале MSK-64 и JMA. На базе “БЛИЦ” отрабатываются алгоритмы определения параметров землетрясений по неполным данным, а также быстрой оценки цунамигенности события.

Представление данных сейсмологических наблюдений и результатов их обработки (информационные ресурсы КФ ГС РАН). В результате обработки исходных данных сейсмических станций формируются разделы Банка сейсмологических данных КФ ГС РАН. В состав Банка входит вся сопутствующая информация о землетрясениях Камчатки и прилегающих территорий, включая оценки параметров “камчатских” землетрясений международными и Российскими сейсмологическими центрами (ГС РАН в Обнинске, Сахалинский филиал ГС РАН, Геологическая служба США USGS, Международный сейсмологический центр ISC, Global CMT США).

Разделы Банка сейсмологических данных Камчатки имеют разный уровень доступа: через Internet для всех пользователей открыт каталог основных параметров землетрясений с 1962 г. по настоящее время с энергетическим классом $K_S \geq 8.5$; остальная информация доступна пользователям локальной сети КФ ГС РАН или другим заинтересованным лицам по запросу.

Банк сейсмологических данных Камчатки и информационные ресурсы КФ ГС РАН в Internet подробно представлены в [Гордеев и др., 2008; Гордеев и др., 2010].

Существующая система хранения данных, разработанная еще в 80-х годах XX века, не отвечает современным требованиям, предъявляемым к информационным системам. В 2010–2011 гг. разработаны предложения и начаты работы по созданию единой информационной системы сейсмологических данных (ИССД), предназначенной для комплексного информационно-аналитического обеспечения деятельности КФ ГС РАН и фундаментальных научных исследований в области наук о Земле [Токарев и др., 2011].

В основу ИССД положена адаптированная под особенности КФ ГС РАН структура, используемая в Международном сейсмологическом центре (ISC) (<http://www.isc.ac.uk/doc/database/schema.html>), основополагающим принципом которой является унификация всех параметров землетрясений, полученных из различных источников.

Основные результаты обработки данных комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений (срочные донесения о сильных землетрясениях Камчатки и мира; оперативный каталог землетрясений Камчатки; оценки состояния сейсмической и вулканической опасности) передаются в МЧС, Геофизическую службу РАН, Правительство Камчатского края и другим заинтересованным организациям.

Для широкого круга исследователей, работающих в области наук о Земле, наиболее важные результаты обработки данных наблюдений доступны на сайте КФ ГС РАН через Internet.

База данных “Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов”, “Информрегистр” № 0220711890. База данных формируется на основе результатов оперативной и окончательной обработки данных инструментальных наблюдений, полученных в лабораториях исследования сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) и лаборатории сводной обработки (ЛСО) КФ ГС РАН. В “Региональном каталоге землетрясений Камчатки и Командорских островов” содержатся основные параметры землетрясений, зафиксированных камчатской региональной сетью сейсмических станций в период с 1962 г. по настоящее время, включает в себя более 130000 событий за 1962–2011 гг. Основные параметры землетрясений включают: дату, время в очаге, координаты гипоцентра, энергетические оценки (энергетический класс по С.А. Федотову и локальную магнитуду M_l , рассчитанную из класса по С.А. Федотову [Гусев, Мельникова, 1991; Федотов, 1972]). Доступ для внешних пользователей через web интерфейс по адресу http://data.emsd.ru/dbquaketxt_min/index_r.htm#tops.

База данных “Волновые формы региональных землетрясений Камчатки и Командорских островов”, “Информрегистр” № 0220913208. Структурированный цифровой архив записей региональных сейсмических станций Камчатки. Содержит цифровые сейсмограммы (волновые формы) региональных землетрясений Камчатки и Командорских островов, зарегистрированных с 1996 г. по настоящее время. Архив волновых форм формируется по данным оперативного каталога землетрясений Камчатки ЛИСВА и ежедневного бюллетеня сектора “Петропавловск-Цунами”. Файлы содержат многоканальные записи в SEED-формате, соответствующем международ-

ному стандарту хранения сейсмологической информации. Предоставление данных внешним пользователям по запросу.

База данных “Волновые формы сильных землетрясений Дальнего Востока РФ и мира”. Структурированный архив цифровых записей землетрясений опорными сейсмическими станциями сети Дальнего Востока. Содержит цифровые сейсмограммы (волновые формы) сильных землетрясений Дальнего Востока РФ и мира с $M \geq 6.5$, зарегистрированных с ноября 1993 г. по настоящее время. Файлы содержат многоканальные записи в SEED-формате. Предоставление данных внешним пользователям по запросу.

База данных “Волновые формы вулканических землетрясений Камчатки”, “Информрегистр” № 0220913209. Структурированный цифровой архив записей региональных сейсмических станций Камчатки. Содержит цифровые сейсмограммы (волновые формы) вулканических землетрясений Северной и Авачинской групп вулканов, зарегистрированных с 1996 г. по настоящее время. Файлы содержат многоканальные записи в SEED-формате. Предоставление данных внешним пользователям по запросу.

База данных “Макросейсмический каталог”. База данных содержит сведения о макросейсмических проявлениях землетрясений на территории Камчатки и прилегающих областей за период с 1962 г. по настоящее время. Сбор макросейсмической информации осуществляется при помощи телефонной и радиосвязи, интернета, письменных сообщений об ощутимых землетрясениях. Интенсивность сотрясений в пунктах оценивается по шкале MSK-64. Предоставление данных внешним пользователям по запросу.

База данных “Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов”. Содержит информацию о результатах расчета механизмов очагов наиболее сильных землетрясений Камчатки и Командорских островов по программе FA2007 А.В. Ландера (по знакам первых вступлений объемных волн). Предоставление данных внешним пользователям по запросу.

База данных записей сильных движений. Записи станций сильных движений хранятся в виде базы данных, реализованной на основе СУБД MySQL и включает в себя таблицы: каталог землетрясений ($K_s \geq 9.5$); сведения о станциях сильных движений; каталог записей станций сильных движений; файлы записей, удовлетворяющие критериям выборки (превышение порога амплитуды ускорения 0.025 г или скорости 0.05 см/с).

По состоянию на конец декабря 2011 г. база данных сильных движений содержит информацию о 7551 записях (начало данных 1971 г., окончание — настоящее время).

База данных “Активность вулканов Камчатки”, “Информрегистр” № 0220711891. Содержание — результаты ежедневной оценки состояния вулканов по комплексу наблюдений: сейсмический, видео (или визуальный) и спутниковый мониторинг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе, заложенной в 1960-х и 1970-х годах работами ИФЗ АН СССР и ИВ ДВНЦ АН СССР, и в результате плодотворной деятельности КФ ГС РАН на территории Камчатки и Командорских островов создана современная система сейсмологических наблюдений, оснащенная цифровыми технологиями, методами, алгоритмами и программным обеспечением сбора и обработки данных. Данные всех сейсмометрических каналов всех сейсмических станций доступны операторам регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) в г. Петропавловске-Камчатском в режиме реального времени, что обеспечивает эффективный мониторинг сейсмической и вулканической активности, а также предупреждение о цунами. Разработаны и внедрены методические и программные средства для обработки землетрясений в автоматическом и автоматизированном режимах. Эффективность ССН проверена при регистрации сильных землетрясений (Кроноцкое, 05.12.1997 г., $M_w = 7.9$; Олюторское, 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$; Тохоку, 11.03.2011 г., $M_w = 9.0$) [Кроноцкое землетрясение ..., 1998; Олюторское землетрясение ..., 2007; Чебров, 2010; Чебров и др., 2011], роев вулканических землетрясений в период активизации вулканов Ключевской, Шивелуч, Безымянный, Корякский, Карымский и Кизимен [Сенюков, 2006; Сенюков и др., 2009].

По состоянию на 2011 г. система сейсмологических наблюдений на Камчатке представляет собой специализированную сеть сбора (регистрации), хранения, передачи и обработки сейсмической и геофизической информации.

Число действующих сейсмических станций вместе с пунктами регистрации сильных движений, которые обеспечивают контроль сейсмичности территории Камчатки, в 2011 г. составляет 68. Разномасштабные сети станций с различной разрешающей способностью дают возможность регистрировать без искажений как сильнейшие тектонические землетрясения с $M > 8$, так и слабые землетрясения с $M \leq 1.0$.

Сейсмические станции Камчатки, оснащенные короткопериодными и широкополосными велосиметрами, обеспечивают надежную регистрацию землетрясений на всей территории Камчатского края с прилегающими акваториями с $M_l \geq 3.5$ ($K_{sl,2}^{68} \geq 8.5$). Для событий из Авачинского залива —

с $M \geq 2.6$ ($K_{SI.2}^{Ф68} \geq 7.0$), для Авачинской группы вулканов — с $M \geq 0.9$ ($K_{SI.2}^{Ф68} \geq 3.5$), для Ключевской группы вулканов — с $M \geq 1.6$ ($K_{SI.2}^{Ф68} \geq 5.0$).

Создан и развивается Банк сейсмологических данных с системой визуализации и доступом к нему пользователей. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов включает в себя более 130000 событий за 1962–2011 гг. и доступен на Internet-странице КФ ГС РАН (www.emsd.ru).

С 2007 г. по 2011 г. в КФ ГС РАН разработана и создана информационно-коммуникационная система сбора данных сейсмических станций всего Дальнего Востока России в реальном времени, создана система хранения данных (RAID6) суммарной емкостью хранения 2×12 ТБ.

Система сейсмологических наблюдений, созданная на Камчатке к 2011 г., обеспечивает решение многих фундаментальных и прикладных задач сейсмологии. Изучение очагов землетрясений в области низких и высоких частот с целью определения их основных параметров: тензоров сейсмического момента, скалярных сейсмических моментов, спектров сейсмического момента (“очаговых спектров”); получение неискаженных записей сейсмических сигналов и решение обратных задач для реконструкции деталей очагового процесса; оценка размеров очагов и длительностей процессов в очаге; изучение особенностей очагов в различных тектонических и глубинных зонах, а также особенностей очагов вулканических и цунамигенных землетрясений; изучение строения, скоростных и поглощающих свойств коры и верхней мантии.

Данные сейсмологических наблюдений и результаты их обработки и интерпретации лежат в основе взаимосвязанных исследований по вулканологии, геофизике, геодезии, геодинамике, геотермии и другим направлениям наук о Земле, в основе всех работ по оценке сейсмической и вулканической опасности, при поиске и исследованиях предвестников сильных землетрясений и извержений вулканов. Записи землетрясений приборами сильных движений служат основой работ по исследованиям свойств очага землетрясения (источника колебаний), изучения сейсмических воздействий на территории Камчатки.

Основные задачи дальнейшего развития системы сейсмологических наблюдений на Камчатке, направленные на повышение эффективности мониторинга сейсмической и вулканической опасности, а также предупреждения о цунами: расширение сетей в центральной и западной части Камчатки; развитие сетей акселерографов, локальных сетей станций на активных вулканах; разработка и внедрение новых методов и алгорит-

мов цифровой обработки сейсмических сигналов; разработка и внедрение новых методов и алгоритмов оценки параметров очагов землетрясений и др.

Достижения в развитии системы сейсмологических наблюдений на Камчатке и ее успешная работа обусловлены трудом всех инженеров, техников, операторов сейсмических станций, программистов, научных сотрудников, которые участвовали в разработке оборудования, в организации сетей станций и их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. М.: Наука, 1974. 245 с.
- Аранович З.И., Меламуд А.Я., Негребецкий С.А., Трапезников Н.Л.* Метрология, принципы построения и функциональные особенности сейсмометрических регистрирующих систем // Автоматизация сбора и обработки сейсмологической информации. М.: Радио и связь, 1983. С. 5–20.
- Аранович З.И., Ахалбадашвили А.М., Гоцадзе О.Д.* Сравнительный анализ эффективности региональной сети станций Кавказа на основных этапах ее развития // Методика и результаты оценки эффективности региональных систем сейсмических наблюдений. Тбилиси, 1980. С. 9–28.
- 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.
- Гаврилов В.А., Воропаев В.Ф., Головицкова И.А. и др.* Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 // Сейсмические приборы. М.: Наука, 1987. Вып. 19. С. 5–16.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Викулин А.В. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке (состояние, развитие, перспективы) // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.: Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 12–24.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6–27.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Банк сейсмологических данных Камчатки // Открытое образование. 2008. № 4. С. 16–22.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Сеникоков С.Л. и др.* Информационные ресурсы для вулканологических исследований на Камчатке // Открытое образование. 2010. № 5 (82). С. 73–82.
- Гусев А.А.* Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 74–81.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.

- Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии // Отв. ред. Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. 445 с.
- Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия // Отв. ред. Гордеев Е.И., Викулин А.В. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. 320 с.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А. Локальная сейсмичность района Долины Гейзеров по данным полевых наблюдений 2008–2009 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010а. № 1. Вып. 15. С. 90–99.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. Глубинная структура района Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии по данным микросейсмического зондирования // ДАН. 2010б. Т. 435. № 1. С. 96–101.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В. и др. Новые данные о глубинном строении Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 539–543
- Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974. 145 с.
- Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 1. С. 26–51.
- Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований // Отв. ред. Чебров В.Н. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. 290 с.
- Сенюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др. Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 50–59.
- Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.
- Токарев А.В., Бахтиярова Г.М., Чеброва А.Ю., Митюшкина С.В. Современный взгляд на устаревшую систему хранения сейсмологических данных КФ ГС РАН // Труды Третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 401–404.
- 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.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С. Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке // Проблемы современной сейсмологии: Голицынские чтения, 1981 г. М.: Наука, 1985. С. 71–86.
- Федотов С.А. К 25-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах, XI. 1961–X. 1986: история, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 3–10.
- Федотов С.А., Феофилактов В.Д., Гордеев Е.И. и др. Развитие сейсмометрических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 11–28.
- Федотов С.А. К 40-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 73–79.
- Федотов С.А. Исследования по вулканологии и сейсмологии, их развитие и значение на Камчатке, история отечественной науки. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 2002. 169 с.
- Фирстов П.П., Шакирова А.А. Сейсмические явления, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен в 20011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 7–13.
- Чебров В.Н., Сеницын В.И., Попов Е.В. и др. Аппаратура для временных локальных сетей сейсмометрических станций // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 91–97.
- Чебров В.Н., Воронаев В.Ф., Дрознин Д.В. и др. Развитие сети цифровых сейсмических станций Камчатки // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2006. С. 13–20.
- Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 27–36.
- Чебров В.Н. Развитие комплексного геофизического мониторинга Камчатки и Командорских островов (к 30-летию КФ ГС РАН) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 13–18.
- Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К. и др. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 4. С. 41–57.
- Чебров В.Н. Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г.: организация исследований, наблюдения, проблемы, результаты // Вулканология и сейсмология. 2010. № 2. С. 3–6.
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Захарченко Н.З. и др. Опорная сейсмическая станция “Петропавловск” для службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 1. С. 5–15.
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Сергеев В.А., Пантюхин Е.А. Система сбора, обработки, хранения и представления сейсмологических данных и результатов их обработки в СП СПЦ, технические средства, алгоритмы и ПО // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 332–336.
- Чебров В.Н., Левин Ю.Н., Чебров Д.В. и др. Работа сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами нового поколения по землетрясению в Японии

11 марта 2011 г., $M_W = 9.1$ // Наука и технологические разработки. 2011. Т. 90. № 1. С. 13–26.

Чебров В.Н., Чебров Д.В., Викулин А.В. и др. Сейсмическая станция “Петропавловск”. К 60-летию непрерывных наблюдений. Обнинск: ГС РАН, 2011. 50 с.

Чебров Д.В., Гусев А.А. Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 4. С. 35–57.

Шевченко Ю.В., Гаврилов В.А., Лянник Ю.А. Импульсная калибровка сейсмометрических каналов радиотелеметрической системы // Вулканонология и сейсмология. 1987. № 4. С. 98–103.

Шевченко Ю.В. Метрологическое обеспечение сейсмометрических сетей станций на Камчатке // Вулканонология и сейсмология. 1995. № 1. С. 90–105.

Peterson J. Observations and Modeling of Seismic Background Noise, Open-File Report 93-322, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey, Albuquerque, NM, USA, 1993.

The System of Detailed Seismological Observations in Kamchatka in 2011

V. N. Chebrov, D. V. Droznin, Yu. A. Kugaenko, V. I. Levina, S. L. Senyukov, V. A. Sergeev, Yu. V. Shevchenko, and V. V. Yashchuk

Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: chebr@emsd.ru

Abstract—This paper presents the main results from the development of the detailed seismological observation system in Kamchatka and the information on the system as of 2011. We describe the networks of seismological stations, the systems for the acquisition, storage, and processing of seismological observations and their technical, methodological, and software support. We discuss the basic characteristics of the recording channels and the system as a whole. We present the information resources of the Kamchatka seismological data bank that provide for basic research in earth sciences. In 2011, the system of seismological observation in Kamchatka was a specialized network for acquisition (recording), storage, transmission, and processing of seismic and geophysical data that provides support for the effective monitoring of seismic and volcanic activities, as well as tsunami warning.