

Общероссийский математический портал

А. И. Иващенко, В. К. Гусяков, В. А. Джумагалиев, Г. Йех, Л. Д. Жукова, Н. Д. Золотухина, В. М. Кайстренко, Л. Н. Като, А. А. Клочков, Ю. П. Королев, А. А. Кругляков, Е. А. Куликов, В. Н. Куракин, Б. В. Левин, Е. Н. Пелиновский, А. А. Поплавский, В. В. Титов, А. А. Харламов, В. Н. Храмушин, Е. В. Шельтинг, Шикотанское цунами 5 октября 1994 г., *Докл. РАН*, 1996, том 348, номер 4, 532–538

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 77.124.111.173

21 декабря 2023 г., 11:55:55



ШИКОТАНСКОЕ ЦУНАМИ 5 ОКТЯБРЯ 1994 г.

© 1996 г. А. И. Иващенко, В. К. Гусяков, В. А. Джумагалиев, Г. Йех, Л. Д. Жукова, Н. Д. Золотухина, В. М. Кайстренко, Л. Н. Като, А. А. Клочков, Ю. П. Королев, А. А. Кругляков, Е. А. Куликов, В. Н. Куракин, Б. В. Левин, Е. Н. Пелиновский, А. А. Поплавский, В. В. Титов, А. А. Харламов, В. Н. Храмушин, Е. В. Шельтинг

Представлено академиком В.И. Кейлис-Бороком 01.12.94 г.

Поступило 01.03.95 г.

5 октября 1994 г. в 00 ч 23 мин по местному времени (4 октября в 13 ч 23 мин по Гринвичу) в районе Южных Курильских о-вов произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_S = 8.0$ по шкале Рихтера, которое проявилось с интенсивностью (по 12-балльной шкале MSK-64): 8–9 баллов на о. Шикотан, 7–8 баллов на других о-вах Малой Курильской гряды и о. Кунашир, 6–7 баллов на о-вах Итуруп и Хоккайдо, ощущалось силой до 5–6 баллов на севере о. Хонсю, 2–4 баллов на севере Курильской гряды, большей части о. Сахалин и вызвало самые тяжелые последствия на Южных Курилах. В результате землетрясения пострадало 13.4 тыс. человек в том числе 11 человек погибло, 32 серьезно ранено, 210 легко ранено, 7.7 тысяч человек осталось без крова. Разрушено полностью 111 домов, частично – более 250, повреждено и разрушено более 800 объектов экономики; по предварительным оценкам материальный ущерб составил около 600 млрд. руб.

Землетрясение 5 октября 1994 г. вызвало значительные волны цунами на побережье Южных Курил; заметные волны зарегистрированы на Сахалине и во многих пунктах на побережье Тихого океана (в Японии, США, Чили и других странах). К счастью, человеческих жертв от цунами не было, благодаря тому что оно произошло в ночные

часы, однако причиненный им материальный ущерб довольно значителен.

Одним из важнейших последствий землетрясения явилось общее тектоническое опускание о. Шикотан на 0.5–0.7 м.

Ниже дан краткий анализ Шикотанского цунами 5 октября по имеющимся оперативным данным и результатам полевого обследования на Южных Курилах.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Возникновение сильного землетрясения с $M_S > 7.5$ в районе Южных Курил в течение 1993–1997 гг. ожидалось с позиций долгосрочного [1] и среднесрочного [2] прогноза, однако краткосрочный прогноз не был осуществлен, так как в марте 1994 г. из-за финансовых трудностей прекратились сейсмологические наблюдения на Южных Курилах, включая службу предупреждения о цунами. Они возобновились лишь спустя 1–2 недели после землетрясения 5 октября, поэтому характеристика очаговой зоны приведена по данным удаленных сейсмических станций и ближайшей к очагу локальной сети Хоккайдского университета.

Главный толчок произошел под дном Тихого океана, в 50 км восточнее о. Шикотан (рис. 1); координаты его эпицентра и глубина очага (табл. 1) определены путем совместной обработки данных российских, японских и американских станций с ошибкой ± 15 км. В течение последующего месяца произошло более 1500 афтершоков с $M_S > 3.0$. По афтершокам первой недели четко очерчивается очаговая область размерами около 200×80 км, вытянутая вдоль островов и частично перекрывающая очаги предшествующих сильных цунами в этом районе. За исключением главного афтершока 9 октября 1994 г. с $M_S = 7.4$ прочие сильные афтершоки с $M_S > 6.8$ возникали в пределах узкой поперечной к глубоководному желобу зоны и лишь в первые 6 ч после главного толчка, что наводит на мысль о возможной другой ориентации

Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск
Вычислительный центр Сибирского отделения
Российской Академии наук, Новосибирск
Институт океанологии им. П.П. Шишова
Российской Академии наук, Москва
Институт прикладной физики
Российской Академии наук, Нижний Новгород
Сахалинское управление Росгидромета,
Южно-Сахалинск
Университет Вашингтон, Сизтл, США
Университет Южной Калифорнии,
Лос-Анджелес, США

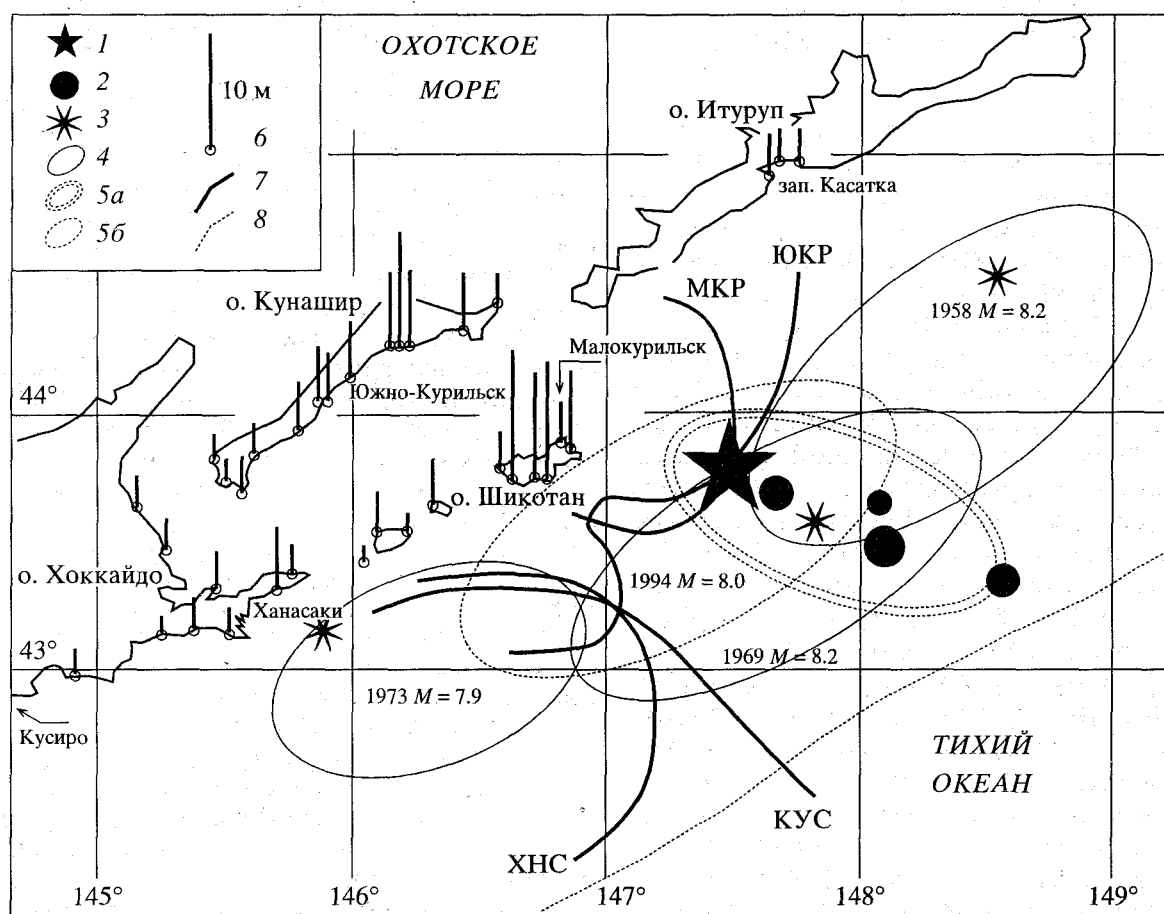


Рис. 1. Область очага Шикотанского цунами 5 октября 1994 г. и максимальные наблюдаемые высоты цунами на побережье (по результатам полевого обследования). 1–3 – эпицентры: 1 – главного толчка 5 октября 1994 г., 2 – афтершоков с $M \geq 6,8$ в первые 6 ч после главного толчка, 3 – сильнейших исторических землетрясений (указаны год и магнитуда землетрясения); 4–5 – контуры очагов цунами: 4 – сильнейших исторических цунами; 5а – цунами 5 октября 1994 г., по сильнейшим афтершокам за первые 6 ч, 5б – то же, по области афтершоков первой недели; 6 – обратные изохроны добегания цунами, построенные от пунктов на побережье; 7 – пункты на побережье и максимальные наблюдаемые в них высоты цунами; 8 – ось глубоководного желоба.

очаговой области (рис. 1). В целом по сейсмическим параметрам землетрясение 5 октября является типичным для зон субдукции, в том числе для района Южных Курил, событием с $M_s > 8$ (табл. 1, рис. 1), но имеет и некоторые отличия от предшествующих событий: а) близкое расположение очаговой области к о. Шикотан; б) довольно

большая величина сейсмического момента очага M_0 для события с $M_s = 8,0$; в) значительная по величине сдвиговая компонента подвижки в очаге. Значительный макросейсмический эффект землетрясения 5 октября и большую интенсивность сопровождавшего его цунами можно в известной мере объяснить этими особенностями его очага.

Таблица 1. Основные параметры сильнейших землетрясений и цунами района Южных Курил по данным [3–8]

Дата	Время в очаге			Координаты гипоцентра, градусы		H, км	M_s	M_0 , Нм	Плоскость разрыва в очаге, градусы			Параметры цунами	
	ч	мин	с	с.ш.	в.д.				Str.	Dip	Slip	i_0	H_m , м
06.11.58 г.	22	58	09	44.53	148.54	40	8.2	4.4	46	58	97	+2.0	5
11.08.69 г.	21	27	36	43.58	147.82	40	8.2	2.2	50	70	98	+1.5	5
17.06.73 г.	03	55	02	43.15	145.88	55	7.9	0.67	43	67	81	+1.0	1.5
04.10.94 г.	13	23	01	43.8	147.5	30	8.0	2.9–3.7	58	69	142	+2.0	10.8

Примечание. Str. – простирание, Dip – угол падения плоскости разрыва в очаге, Slip – угол скольжения в плоскости разрыва; i_0 – интенсивность цунами в очаге, H_m – максимальная отмеченная высота цунами на побережье.

ДЕЙСТВИЯ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

Сейсмическая часть службы во время землетрясения базировалась на работе одной сейсмической станции "Южно-Сахалинск" (на цунами-станциях "Курильск" и "Шикотан" наблюдения прекратились с марта 1994 г.). Тревога цунами была объявлена станцией через 8 мин после начала регистрации землетрясения (регламент 10 мин), сообщение об угрозе цунами передано по телеграфу в Курильск (о. Итуруп) через 15 мин, а в Южно-Курильск (о. Кунашир) лишь через 7 ч после объявления тревоги, так как с момента землетрясения связь с Южно-Курильском прервалась из-за массового повреждения аппаратуры связи и оповещения. Фактически оповещение населения Кунашира, Шикотана и других о-вов Малой Курильской гряды об угрозе цунами действующей службой сделано не было, а тревога цунами объявлялась мэром Южно-Курильска Н.А. Покидным по факту сильного ощутимого землетрясения. Сигнал отбоя тревоги цунами был передан на Южные Курилы спустя 8.5 ч после землетрясения, когда дальнейшие изменения уровня океана были признаны не опасными для населения. Можно констатировать, что действующая служба предупреждения о цунами не справилась с возложенными на нее функциями из-за ее крайне слабого технического оснащения средствами наблюдений и связи.

ПОЛЕВОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЦУНАМИ

Через 10 дней после землетрясения на Южные Курилы выехала группа специалистов-геофизиков и океанологов из ряда академических институтов страны, Сахалингидромета и двух университетов США для сбора натурных данных о проявлениях цунами. Полевые работы проводились в течение двух недель с использованием визуального обследования, фотографирования, геодезической и аэрофотосъемки. Наиболее детально обследованы побережья о-вов Шикотан и Кунашир с океанской стороны, обращенной к очагу цунами. Измерения высот заплесков цунами и дальности затопления на побережье не вызвали особых затруднений, поскольку выполнялись по свежим следам. В большинстве случаев граница затопления отчетливо выделялась по выбросам морской травы, мусора, по верхней кромке травяного покрова, испытавшего воздействие соленой морской воды, или по иным признакам. Использование на отдельных участках побережья аэрофотосъемки позволило оценить границу затопления сразу на всей протяженности участка и приблизительно оценить (по топографическим данным) высоту волн. В дальнейшем эти данные использовались как основа для выбора мест точных измерений высот заплесков с помощью геодезических методов. Результаты измерений в отдельных пунктах представлены в табл. 2, а также на рис. 1, где они дополнены данными по о. Хоккайдо, полученными от японских коллег.

Таблица 2. Измеренные максимальные высоты заплесков волн цунами 5 октября 1994 г. над теоретическим нулем глубин (по результатам полевого обследования)

Место измерения	Координаты пункта		Высота цунами, м	Место измерения	Координаты пункта		Высота цунами, м
	с.ш.	в.д.			с.ш.	в.д.	
Малая Курильская гряда				Большая Курильская гряда			
о. Шикотан				о. Кунашир			
бух. Димитрова	43°46′	146°34′	6.3–10.8	от оз. Круглое до р. Филатова			4.0–5.0
бух. Крабовая	43 52	146 42	3.2–3.4	р. Илюшина	44°10′	145°57′	6.3–9.8
бух. Малокурильская	43 54	146 48	2.9–3.7	бух. Космодемьянская	44 07	145 52	4.6
бух. Церковная	43 16	146 40	6.0–8.9	Южно-Курильск	44 04	145 50	4.0–4.8
о. Зеленый				зал. Измены	43 44	145 30	2.0–2.6
юго-вост. берег	43 29	146 06′	1.5*	о. Итуруп			
о. Полонского				зал. Касатка	44 54′	147 40	3.4
бух. Часовня	43 41	146 18	4.0*	о. Сахалин			
о. Юрий				Катангли			0.2**
мыс Бакланий	43 26	146 06	3.5*	Поронайск	49 13	143 06	0.3**
бух. Широкая	43 25	146 05	1.5*	Стародубское	47 25	142 51	0.3**

Примечание. Одной звездочкой обозначены визуальные оценки, двумя – оценки по записям мареографов.

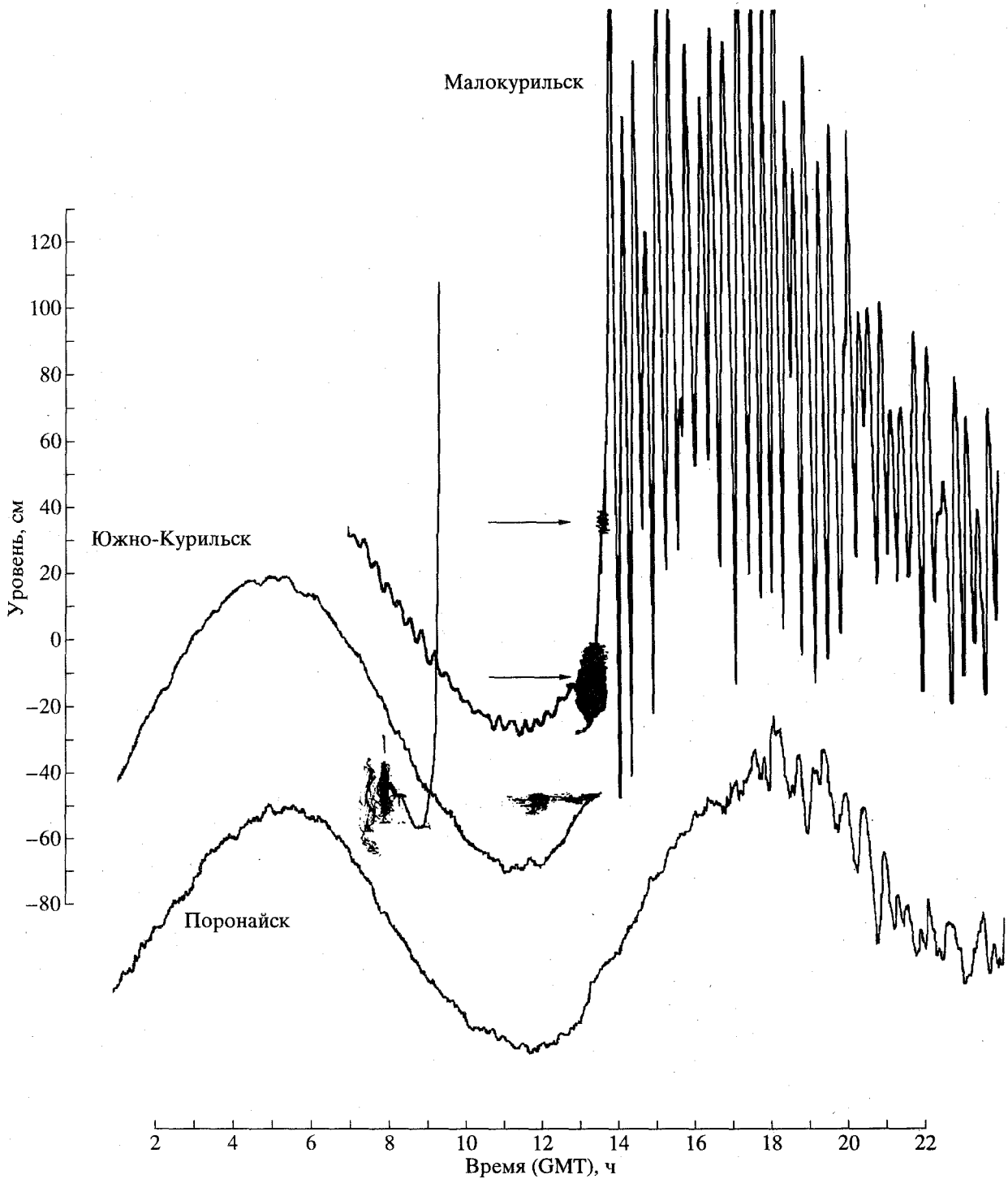


Рис. 2. Записи колебаний уровня, вызванные цунами 5 октября 1994 г., в пунктах Малокурильск (о. Шикотан), Южно-Курильск (о. Кунашир), Поронайск (о. Сахалин). Стрелками отмечены момент основного толчка и положение пера самописца, зафиксировавшего изменение уровня моря, предшествовавшее приходу волн.

Наибольший материальный ущерб от цунами наблюдался в старой части Южно-Курильска, расположенной на пологом берегу. Здесь дальность затопления составляла в среднем 200–250 м, а в пойме реки около 900 м. Практически все со-

оружения в зоне затопления были повреждены, а некоторые полностью разрушены. Волной цунами смыто 3 дома, из них один сорван с фундамента и перенесен вверх по течению реки на 300 м; многие легкие постройки снесены на десятки

метров; цунами разрушило и повредило причалы, часть производственных зданий в порту; затонуло 2 судна, на берег выброшено 7 плашкоутов и пассажирский катер, а несколько судов, выброшенных на берег предшествовавшим тайфуном, были перенесены волной цунами в глубь суши на расстояние от 30 до 200 м. На о. Шикотан и бух. Малокурильская цунами проявилось как резонансные сейшевые колебания с амплитудой до 2 м и периодом около 20 мин; сильно пострадали причалы и пришвартованные суда.

Одним из наиболее важных результатов полевого обследования явилось выявление факта общего опускания о. Шикотан в результате землетрясения на 0.5–0.7 м, установленного с помощью геодезической съемки и промеров глубин. Сообщения местных жителей об опускании о-вов Анучина и Полонского, а также южной (зал. Измены) и центральной (м. Столбчатый) частей о. Кунашир после землетрясения пока не подтверждены инструментальными измерениями. Опускание островов не противоречит данным о механизме очага главного толчка, но требует детального последующего исследования.

Интересные сведения были получены от очевидцев, находившихся в море на судах во время землетрясения вблизи его эпицентра. “Моретрясение”, как отмечалось и ранее [9, 10], ощущалось многими как сильнейший удар по корпусу судна с последующей продолжительной (несколько десятков секунд) вибрацией. В [11] показано, что эти эффекты можно объяснить действием ударной волны, возбуждаемой в толще воды сильным землетрясением.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЦУНАМИ

Записи волн были получены многими береговыми самописцами уровня как в России и Японии, так и на удаленных станциях (Гавайи, Аляска и др.). Наиболее интересными являются записи 4 ближайших к очагу мареографов: в Малокурильске (о. Шикотан) и Южно-Курильске (о. Кунашир) (рис. 2); в Ханасаки и Кусиро (о. Хоккайдо). Запись в Южно-Курильске малопригодна для изучения характера волны цунами: в момент толчка перо самописца перескочило назад по оси време-

ни, а после прихода волны цунами зацепилось за край бумаги. Видно, что примерно через 30 мин после толчка был небольшой отлив на 10 см, а еще через 30 мин – резкий подъем уровня. По сообщениям очевидцев, цунами в Южно-Курильске началось с отлива через 30–60 мин после главного толчка, а затем последовали 3 больших волны с периодом около 15 мин. На записи в Малокурильске хорошо видны: след главного толчка в виде жирного чернильного пятна; последующий быстрый подъем уровня; сейшевые колебания с периодом около 20 мин. Сопоставление наблюдаемого прилива с предвычисленным указывает на опускание берега в районе бух. Малокурильская около 0.6 м в результате землетрясения. Скачкообразные изменения уровня, вызванные остаточной деформацией поверхности при землетрясении, наблюдаются в меньшей степени и на записях мареографов в Ханасаки и Кусиро. По этим 4 записям были определены времена добегания цунами от очага, что дало возможность построить по ним обратные изохроны добегания (рис. 1) и уточнить границу очага цунами со стороны островного склона. Она отвечает, по-видимому, взброшенному океаническому крылу разрыва в очаге (табл. 1), вызвавшему наиболее интенсивные волны цунами, начавшиеся с прилива.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ

Расчет ожидаемых высот цунами по сейсмическим данным только начинает внедряться в службу оперативного предупреждения о цунами. Впервые в Российской службе подобные расчеты были выполнены для цунами 5 октября 1994 г. по оперативным данным, полученным в Центре цунами Сахалингидромета. Они проводились по схеме, реализующей уравнения длинных волн на мелкой воде, с соблюдением аппроксимационных критериев для периода расчетной волны [12]. Пример расчета дан на рис. 3, а табл. 3 содержит в обобщенном виде результаты сравнения наблюдаемых и расчетных высот цунами по 5–6 опорным пунктам на побережье для 3 вариантов очага, характеристики которого уточнялись по мере поступления оперативных сейсмических и мареографных данных. Сходимость в среднем наблюдаемых и расчетных данных следует признать

Таблица 3. Сравнение наблюдаемых и расчетных максимальных высот цунами в 6 опорных пунктах для разных вариантов задания очага

Вариант	Размеры очага, км	Период волны, мин	Амплитуда начального возмущения, м	Среднее H_n/H_p
1	130 × 40	4	+2.7/–0	1.5 ± 0.5
2 (рис. 1, 5a)	~160 × 70	12	+1.5/–1.5	1.3 ± 0.4
3 (рис. 1, 5б)	~180 × 80	12	+1.8/–0.7	1.1 ± 0.3

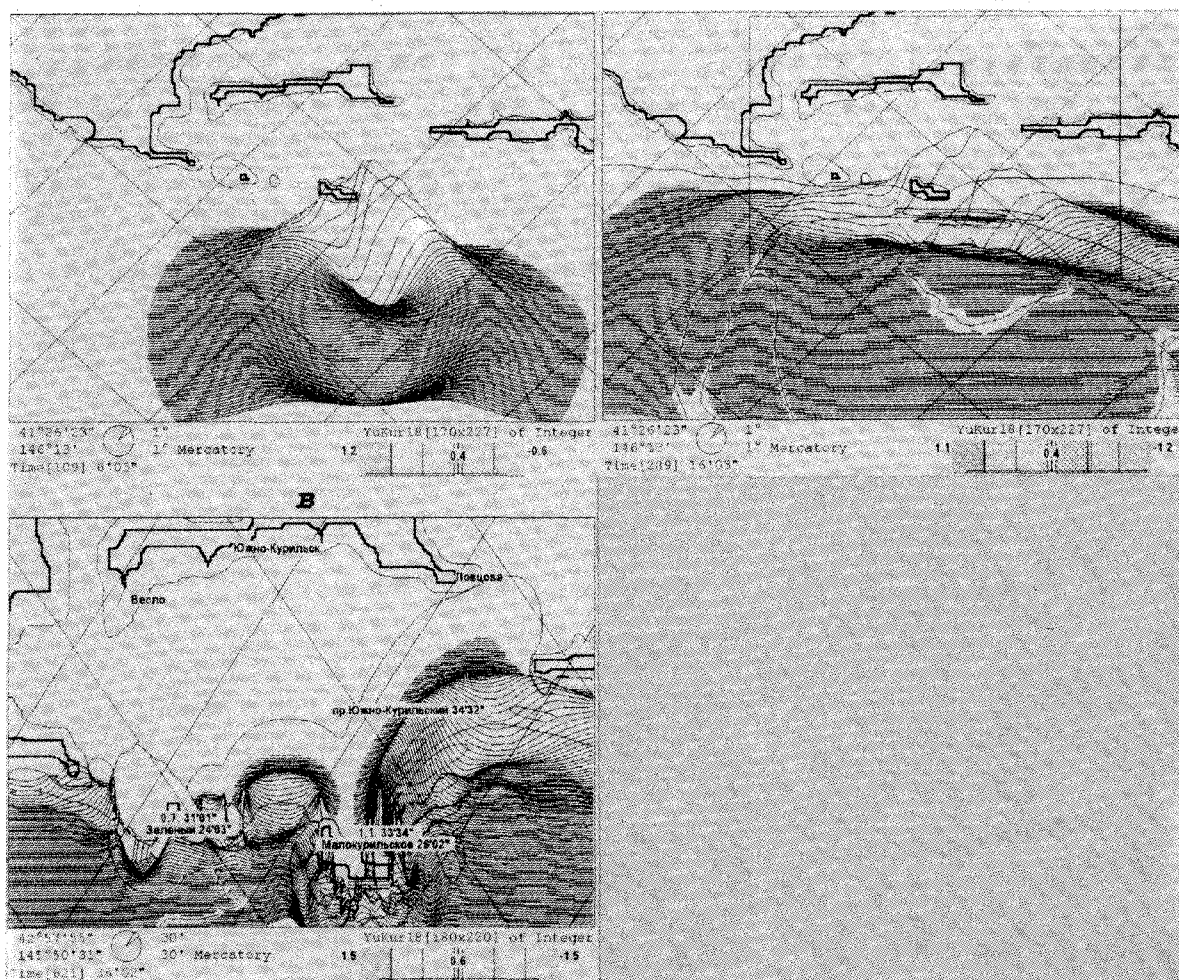


Рис. 3. Результаты численного моделирования Шикотанского цунами 5 октября 1994 г. в районе Южных Курил: а – форма очага возмущения уровня океана через 6 мин после землетрясения, максимальное возвышение в источнике 1.7 м; б – переход с обзорной расчетной батиметрии с шагом 1.8 км на более подробную (1 км); в – прохождение первой волны цунами в Южно-Курильский пролив. Под каждым рисунком указаны координаты левого нижнего угла сетки, вид картографической проекции, время с момента начала землетрясения (ч, мин, с) и градации по высотам уровня, которые служат масштабной шкалой.

удовлетворительной даже для 1-го варианта очага, заданного весьма неточно – по эмпирическим формулам с использованием оперативной оценки $M_s = 7.7$ и первого определения координат эпицентра. Для 3-го варианта, по-видимому, наиболее близко соответствующего реальному очагу, расчетные данные дают распределение высот цунами, которое хорошо согласуется с наблюдаемым по результатам полевого обследования.

В заключение отметим чрезвычайную важность оперативного натурного обследования последствий таких редких природных катастроф, как Шикотанское цунами 5 октября 1994 г., которое относится к числу сильнейших в регионе в этом столетии. Повторяемость такого события оценивается примерно в 50 лет [13]. В сочетании с численным моделированием материалы обследо-

вания позволят проверить более детально имеющиеся теоретические модели волн цунами и будут способствовать улучшению оперативного и долгосрочного прогноза цунами.

Авторы благодарят администрацию Южно-Курильского района за содействие экспедиции по обследованию, Н.С. Терентьева (Информгеоцентр ГП “Востокгеология”, Южно-Сахалинск) за материалы аэрофотосъемки, японских коллег д-ра М. Касахара из университета Хоккайдо (Саппоро) и проф. Н. Шүто из университета Тохoku (Сендай) за предоставленные данные по афтершокам землетрясения и высотам цунами на о. Хаккайдо. Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума ДВО РАН и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93-05-8073, -8110, -14499; 94-05-16772).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Потапова О.В. В кн.: Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Информ.-анал. бюл. ФССН. Экстр. Вып. 1994. С. 57–67.
2. Кособоков В.Г., Шебалин П.Н., Тихонов И.Н. и др. Там же. С. 71–73.
3. Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Иващенко А.И. и др. Там же. С. 10–18.
4. Ekstrom G., Salganik M., Sianissian S. Harvard Event-File. Name M100494X. 1994.
5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. С. 375–447.
6. Purcaru G., Berckhemer H. // Tectonophysics. 1982. V. 84. № 1. P. 57–130.
7. Балакина Л.М. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 1. С. 5–20; 1989. № 2. С. 31–47.
8. Соловьев С.Л. В кн.: Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–136.
9. Ambraseys N. In: Earthquake engineering and structural dynamics. L., 1985. V. 13. P. 412–424.
10. Harris T. // Underway (Еххон). 1988. V. 12. № 3. P. 5–9.
11. Levin B., Kaistrenko V., Kharlamov A., Chepareva M. Proc. IUGG/IOC Internat. Tsunami Symp. Wakayama, 1993. P. 309–320.
12. Храмушин В.Н. В кн.: Вычислительные технологии. Новосибирск, 1992. Т. 1. № 3. С. 281–295.
13. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. В кн.: Тихоокеанский ежегодник-88. Владивосток, 1988. С. 9–17.