

УДК 550.345

ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ 15 НОЯБРЯ 2006 г. НА ЦЕНТРАЛЬНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОТ ЗАПЛЕСКОВ

© 2008 г. Член-корреспондент РАН Б. В. Левин, В. М. Кайстренко, А. В. Рыбин, М. А. Носов, Т. К. Пинегина, Н. Г. Разжигаева, Е. В. Сасорова, К. С. Ганзей, Т. Н. Ивельская, Е. А. Кравчуновская, С. В. Колесов, Ю. В. Евдокимов, Д. Бурджуа, Б. Макиннесс, Б. Фицхью

Поступило 28.09.2007 г.

15 ноября 2006 г. в центрально-курильском сегменте Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой $M_w = 8.3$. Очаг землетрясения располагался в океане напротив о-вов Симушир–Матуа, инструментальный эпицентр находился примерно в 85 км от северной оконечности о. Симушир. Землетрясение такой силы было зафиксировано в данном районе впервые за всю историю сейсмических наблюдений.

В период с 1 июля по 14 августа 2007 г. в районе Центральных Курил были проведены две морские комплексные экспедиции. Одна из задач экспедиций – обследование побережья Центральных Курильских островов с целью измерения высот и дальностей заплеска цунами, сбора данных по геологическим эффектам цунами на побережьях. Первая экспедиция была организована Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (гранты РФФИ и средства Президиума ДВО РАН), вторая проводилась в рамках проекта NSF “Kuril

Biocomplexity Project”. Экспедиции были выполнены на теплоходе “Искатель-4”, порт приписки Корсаков. В состав экспедиции вошли известные специалисты по цунами из разных институтов России и США, совместная работа которых на общих объектах обеспечила высокий уровень проведенных исследований.

Необходимо упомянуть, что летом 2006 г. многие из авторов уже побывали в районе Центральных Курил, поэтому представилась уникальная возможность сравнить участки побережий до и после цунами. Кроме того, летом 2006 г. на о-вах Кетой, Матуа и Харимкотан были установлены временные GPS-станции, которые зафиксировали косейсмические деформации от ноябрьского и последовавшего за ним январского землетрясений (13.01.2007 г., $M_w = 8.1$). Январское событие также было цунамигенным, однако на основе ряда мареограмм и полученных нами полевых данных можно утверждать, что второе цунами было значительно слабее ноябрьского.

За 45 дней работы участники экспедиции обследовали о-ва Уруп, Симушир, Кетой, Янкича и Рыпонкича (о-ва группы Ушишир), Распуа, Матуа (рис. 1).

Наиболее высокие заплески цунами были выявлены на о. Матуа, где их средняя высота превышала 10 м. В бухте Айну (юго-запад о. Матуа) цунами сильно изменило морфологию берега, размыв участок морской аккумулятивной террасы шириной 20–30 м. В бухте Душной (северо-восточная часть о. Симушир) цунами оставило на морской террасе многочисленные промоины. Помимо эрозии на обследованных побережьях повсеместно наблюдалась и аккумуляция. Отложения цунами представлены морским песком, галькой, валунами, перемещенным в сторону суши плавником. На крутых склонах берегов во время

*Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова*

*Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский*

*Тихоокеанский институт географии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва*

*Центр цунами Сахалинского управления
Росгидромета, Южно-Сахалинск
Университет штата Вашингтон, Сиэтл, США*

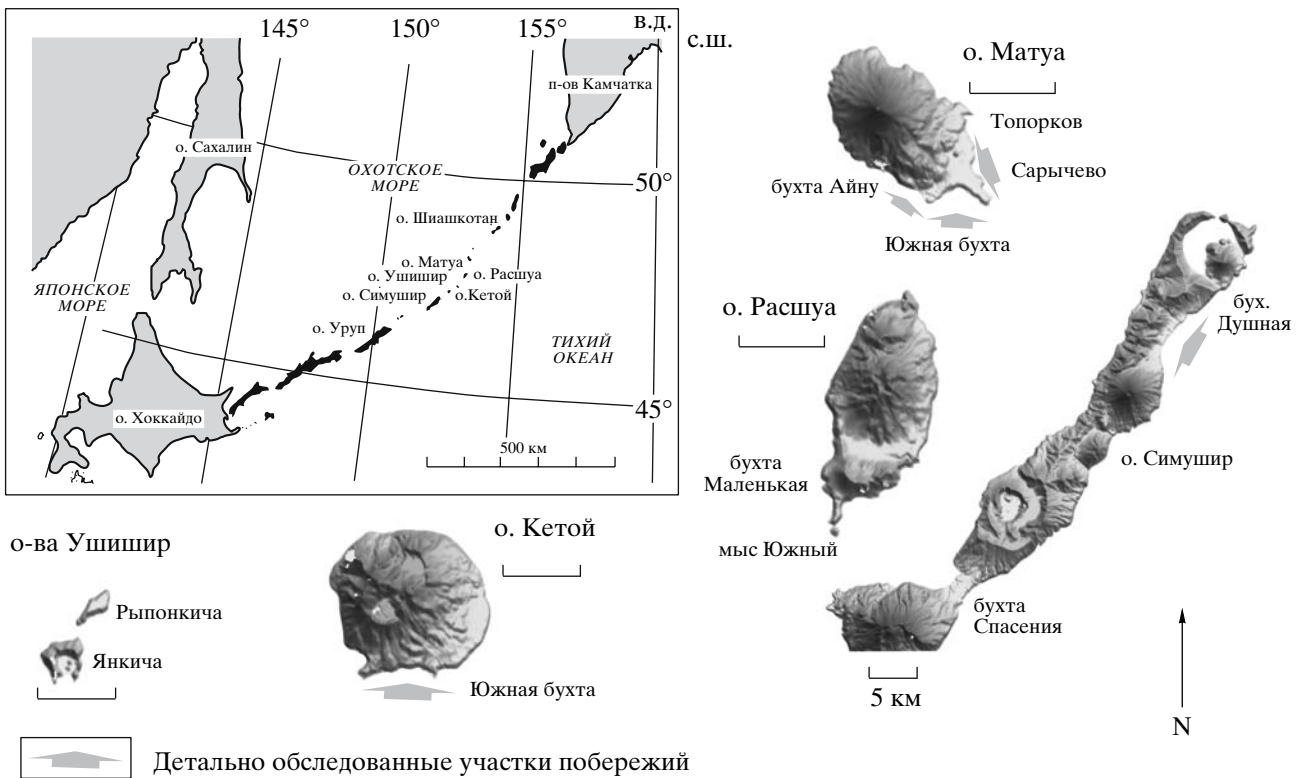


Рис. 1. Район экспедиционных работ и участки обследованных побережий. Все острова показаны в разном масштабе, длина масштабной линейки в каждом случае соответствует 5 км.

цунами частично уничтожена растительность и смыта почва.

На юго-востоке о. Симушир интенсивность цунами была уже значительно ниже, а на юге о. Уруп высоты заплесков цунами не превысили высоты заплесков штормовых волн и составили не более 4–6 м, а возможно, и меньше. Полученные нами результаты по высотам и дальностям заплеска цунами представлены в табл. 1.

Все собранные во время экспедиций данные после их окончательной обработки войдут в российские и мировые базы данных. Собранный фактический материал позволит оттестировать и уточнить численные модели, на основе которых оценивается цунамиопасность побережий.

Численное моделирование цунами 15.11.2006 г. проводили в рамках линейной теории длинных волн [1]. Линеаризованные уравнения мелкой воды, записанные в сферической системе координат без учета силы Кориолиса, сводились к волновому уравнению относительно смещения свободной поверхности. Вблизи береговой линии на изобате 10 м ставилось граничное условие полного отражения, на внешних границах расчетной области – условие свободного прохода. В каче-

стве начального условия использовано отклонение свободной поверхности воды от равновесного положения, которое полагали идентичным вертикальным остаточным деформациям дна. Волновое уравнение аппроксимировалось традиционной явной конечно-разностной схемой (прямоугольная сетка).

В качестве начального условия рассматривали смещение свободной поверхности воды от равновесного положения, которое полагали идентичным вертикальным деформациям дна океана. Вертикальные деформации рассчитывали по формулам Окада в соответствии с моделью очага землетрясения Геологической службы США (USGS, <http://earthquake.usgs.gov/>). На рис. 2 вертикальные деформации дна показаны белыми изолиниями. Шаг по времени определялся условием устойчивости Куранта и составлял 0.75 с. Расчетная область простиралась от 149° до 156° в.д. и от 45° до 49° с.ш. Шаг по пространству составлял 0.004° (1751 × 1001 узлов).

Для моделирования распространения волны цунами, особенно в мелководных областях, необходимы надежные данные о рельефе дна (батиметрия). В расчетах нами использована комбинированная батиметрия, созданная на основе одномоментного

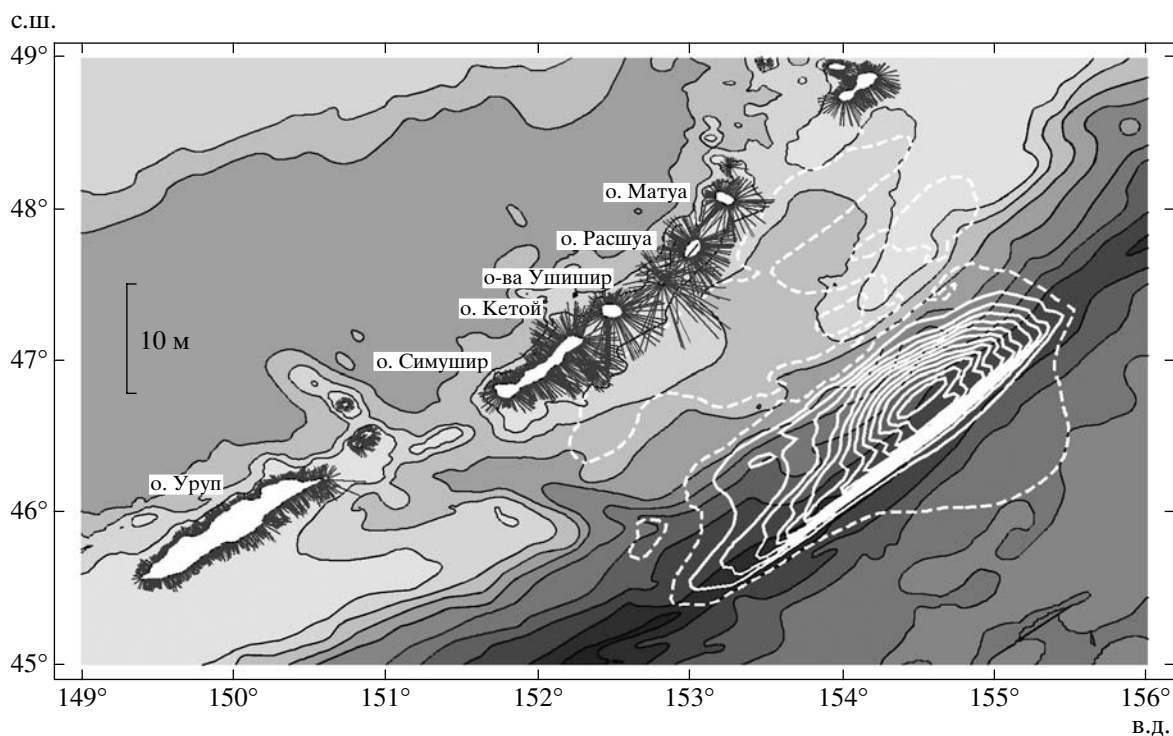


Рис. 2. Расчетная область и источник цунами 15.11.2006 г. Изобаты построены с интервалом 1000 м. Белые изолинии – вертикальная деформация дна (сплошная линия – поднятие, штриховая – опускание, интервал 0.2 м). Расчетные высоты заплеска показаны отрезками, ориентированными по нормали к береговой линии; длина отрезка пропорциональна высоте заплеска; 10 м – масштаб высоты заплеска.

цифрового атласа GEBCO (British Oceanographic Data Centre, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>) и цифровой модели рельефа дна с разрешением 0.25 угловых минут, созданной на основе несекретных морских навигационных карт, предоставленных Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации.

Во время экспедиции для проверки качества информации о глубинах нами проводилась эхолотная съемка на шельфе Курильских островов. Данные измерений сопоставлялись с информацией из атласа GEBCO и с цифровой моделью рельефа ГУНиО. Установлено, что атлас GEBCO часто дает завышенные глубины в исследуемом регионе (ошибка 100% от фактической глубины и более). Цифровая модель рельефа ГУНиО хорошо соответствовала данным измерений. В силу того, что цифровая модель рельефа дна не покрывает всю область, необходимую для расчетов, но только квадраты, соответствующие листам морских навигационных карт масштаба 1:250000, возникла необходимость создания комбинированной батиметрии.

Распределение расчетных максимальных высот волн показано на рис. 2 отрезками, ориенти-

рованными по нормали к береговой линии. Длина отрезка пропорциональна высоте заплеска. Максимальные расчетные заплески (до 7.5 м) соответствуют тихоокеанскому побережью о-вов Симушир, Кетой, Ушишир, Расшуа и Матуа. Охотоморское побережье островов подвержено волнам заметно меньшей амплитуды. Высоты заплесков в южной части о. Симушир (бухта Спасения) оказываются существенно меньшими по сравнению с его северной частью (бухта Душная). Сравнительно небольшой оказывается высота волн на берегах о. Уруп.

Напомним, что используемая нами численная модель является линейной и, кроме того, рассчитывает высоту заплеска цунами не на реальное побережье, а на гипотетическую вертикальную стенку, установленную вдоль изобаты 10 м. Известно, что учет нелинейности увеличивает высоту заплеска, но не более чем в два раза. Высота заплеска также заметно возрастает в случае наката цунами на пологий берег. По указанным причинам расчетные высоты волн в 2–3 раза уступают измеренным значениям. С учетом этой поправки можно заключить, что в целом расчетные высоты заплесков неплохо соответствуют измеренным значениям.

Таблица 1. Высота и дальность заплеска цунами 15.11.2006 г. на обследованных побережьях Централных Курильских островов

Дата обследования (2007 г.)	Остров	Район наблюдений	Высота заплеска, м	Точность измерения (±), м	Дальность заплеска, м	Метод измерений	Кол-во профилей	Кол-во заморов заплесков	Примечание к измерениям
08.08	Топорков (к востоку от Матуа)	Западное побережье острова	9–10	1.0	30–40	PPP	6	14	В проливе между о. Топоркова и о. Матуа
02–03.08	Матуа	Берег "Сарычева", север	11–17	<0.5	50–60	НР, PPP	9	16	Исключая максимально низкий и максимально высокий заплеск
02–04.08	»	Берег "Сарычева", центральная часть	13–16	<0.5	50–65	НР, PPP	8	12	То же
07.08	»	Берег "Сарычева", южная часть	6–10	0.5	60–100	PP	9	9	»
06.08	»	Бухта Южная, восточная часть	6–8	0.5	100–140	PP	6	6	С учетом высоты береговых валов между берегом и линией максимального заплеска
06–07.08	»	Бухта Южная, западная часть	6–8	<0.5	180–220	НР + 2006	4	5	То же
02–05.08	»	Бухта Айну, юго-восточная часть	12–14	0.5	100–120	PP	2	2	
04–06.08	»	Бухта Айну, центральная часть	17–20	0.5	200–400	PP, НР, PPP + 2006	8	16	
02–05.08	»	Бухта Айну, северо-западная часть	13–14	0.5	70–120	PP	2	2	Дальности заплесков по GPS
11.08	Распуа	Мыс Южный, Охотская сторона	4.2, 5	0.5	65	PP	2	2	
11.08	»	Бухта Маленькая	9.7	0.5	50	PPШ	1	1	Определение по конечному валу из плавника и пластика
09.08	Рыпонкича	Северная оконечность	5.7	0.5	54	PP	1	1	
09.08	Рыпонкича	Юго-восточное побережье	10–11	<0.5	45–55	НР	6	19	Исключая максимально низкий и максимально высокий заплеск
10.08	Янкича	Северная оконечность	12.8	<0.5	50	НР	1	1	Определение по большому кол-ву плавника и пластика на береговом валу
08.07	Кетой	Бухта Южная, восточная часть	6.5–7.5	0.5	50–60	PPP	5	34	Исключая максимально низкий и максимально высокий заплеск
08, 11.07	»	Бухта Южная, западная часть	6–9	0.5	35–65	PP	17	17	То же
10–27.07	Симушир	Бухта Душная, север	9–14	<0.5	50–90	НР	10	100	Для коротких и крутых профилей исключены максимально низкий и максимально высокий заплески
10–27.07	»	Бухта Душная, центральная часть	7–9	<0.5	100–150	НР + 2006	13	30	Для длинных и пологих профилей исключены максимально низкий и максимально высокий заплески
10–27.07	»	Бухта Душная, юг	12–19	<0.5	80	НР, PP	3	3	Очень крутые профили
12–19.07	»	Бухта Спасения	4.5–7	0.5	80–140	PP	7	8	Исключая максимально низкий и максимально высокий заплеск

Примечания. Часть данных еще не откорректирована по таблицам приливов; вариации уровня моря в обследованных районах обычно менее ±0.5 м. Дальности заплесков, полученные по топографическим профилям, обычно имеют погрешность менее 10%; оценка погрешности (в ряде случаев коррекция) проведена с помощью GPS по прямой линии между точкой уреза воды и точкой максимального заплеска цунами. Методы измерений: НР – нивелир и рейка; PPP – ручной нивелир, рейка, рулетка; PPШ – ручной нивелир, рейка, шагомерная съемка; PP – ручной нивелир и рейка для замеров высоты и расстояния; +2006 – использованы топографические профили 2006 г. Приведено количество замеров высот заплесков, измеренных между топографическими профилями.

Авторы выражают благодарность И.В. Файну за предоставление данных о вертикальной деформации дна в источнике цунами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-10070к, 06-05-08098, 07-05-00363, 07-05-00414, 05-05-64733), Президиу-

ма ДВО РАН и Национального научного фонда (NSF) ARC-0508109.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левин Б.В., Носов М.А.* Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.