

УДК 551.466

ВЛИЯНИЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ЦУНАМИ В ОХОТСКОЕ МОРЕ (НА ПРИМЕРЕ ЯПОНСКОГО ЦУНАМИ 11 МАРТА 2011 ГОДА)

© 2016 г. И. С. Костенко^{1,2}, А. А. Куркин¹, Е. Н. Пелиновский^{1–3}, А. Ялченир⁴

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

E-mail: aakurkin@gmail.com

²Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований

693023 Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

E-mail: irenka_k@rambler.ru

³Институт прикладной физики РАН

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: pelinovsky@gmail.com

⁴Ближневосточный технический университет (Middle East Technical University)

06800 Анкара, Турция, бульвар Думлипинара, 1

E-mail: yalciner@metu.edu.tr

Поступила в редакцию 16.01.2015 г.

Проведено исследование особенностей распространения цунами 11 марта 2011 г. в северо-восточной части Тихого океана для выявления степени влияния Курильских островов на проникновение цунами в Охотское море. Для этого проведена серия вычислительных экспериментов в рамках теории мелкой воды с использованием двух батиметрий: 1) с Курильскими островами; 2) без Курильских островов. Выполнен анализ рассчитанных высот волн и оценена магнитуда и интенсивность цунами в Охотском море. Проведенные вычислительные эксперименты позволят оценить количественно уменьшение интенсивности цунами при прохождении волны Курильских островов.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, Курильские острова, Охотское море.

DOI: 10.7868/S0002351516010065

ВВЕДЕНИЕ

Охотское море расположено в северо-западной части Тихого океана и оно соединено с Тихим океаном проливами Курильских островов. Протяженность Курильских островов около 1200 км. Ширина Курильских проливов 500 км, что составляет 41.6% от общей протяженности островов. Тихий океан и сами Курильские острова расположены в зоне сильной сейсмической активности, где подводные землетрясения вызывают цунами, которые распространяются по Тихому океану и проникают в акваторию Охотского моря. Обзор исторических цунами, зарегистрированных на Дальнем Востоке России, содержится в [1–7]. Несмотря на то, что в акватории Тихого океана случаются землетрясения с магнитудой более 8, за всю историю наблюдений на Охотском побережье не было зарегистрировано катастрофического цунами. Некоторые источни-

ки цунами, достаточно сильно появившиеся на побережье Охотского моря, располагались в Тихом океане: восточнее полуострова Камчатка (цунами 04.11.1952 г.); около полуострова Аляска (США) (цунами 28.03.1964 г.); южная Америка (Чили) (цунами 22.05.1960 года и 27.02.2010 г.). По данным наблюдений высоты волн от этих цунами на о-ве Сахалин, где располагается большинство станций измерения уровня моря, составили 0.1–1.2 м. Естественно говорить в этом случае, что Курильские острова экранируют Охотское море от проникновения океанских волн цунами. Именно поэтому долгосрочные оценки высот цунами на о-ве Сахалин (максимальная высота прогнозируемой волны в Корсакове на 100 лет составляет 2 м), сделанные в [8], носят пока предварительный характер.

Расчеты характеристик волн цунами в Охотском море неоднократно проводились в литературе. Так, сценарии цунами в Охотском море, свя-

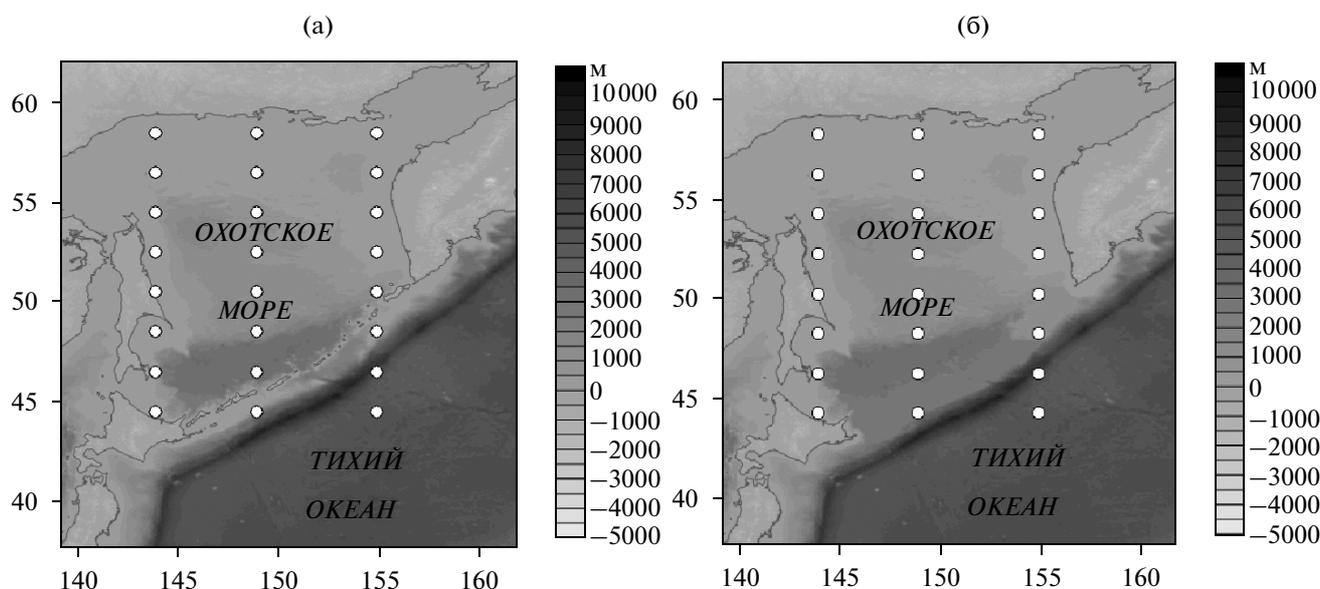


Рис. 1. Батиметрии, использованные в вычислительных экспериментах: а – с Курильскими островами; б – без Курильских островов.

занные с возможным катастрофическим землетрясением вблизи о-ва Симушир, рассмотрены в [9]. Отмечается, что высота волны цунами на побережье о-ва Сахалин примерно вдвое меньшая, чем на Курильских островах. Время распространения до материковой части Охотского моря оценивается в 3 часа. Случившееся вслед за этим цунами 15 ноября 2006 г. подтвердило прогностический сценарий, в данном случае о. Симушир принял на себя главный удар и защитил побережье Сахалина и Магаданской области [10–13]. Проникновение Чилийских цунами (1960 и 2010 г.) и Японского цунами 2011 года в Охотское море изучалось в [14–16]. Показано, что численное моделирование хорошо объясняет наблюдаемые времена прихода цунами, а также характер мареограмм в пунктах о-ва Сахалин. Количественного согласия добиться не удастся, поскольку в расчетах последние точки находятся не совсем у берега, где стоят реальные мареографы. Недавно анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье России выполнен в [17] на основе результатов математического моделирования, что позволило выявить цунамигенные зоны, наиболее опасные для побережья Охотского моря. Отмечается, что волны от южночилийских очагов достаточно свободно проникают сквозь Курильские проливы в Охотское море, где могут вызывать опасные (с размахом до 2 м) колебания уровня на восточном побережье Сахалина, на побережье Колымы и на западе Камчатки. Все расчеты подтверждают, что Курильские острова экранируют Охотское море от проникновения цунами из Тихого океана. По предварительным оценкам,

сделанным в [16], около 80% энергии цунами отражается Курильскими островами.

Настоящая статья посвящена количественной оценке защитной роли Курильских островов в проникновении цунами из Тихого океана в Охотское море. Для этого мы провели серию расчетов распространения цунами в реальной акватории северо-западной части Тихого океана, так же как в акватории с искусственно удаленными Курильскими островами. В качестве источника цунами выбрано Японское цунами 2011 г., проявившееся на Дальневосточном побережье России [18–20]. Постановка задачи, численная модель, очаг цунами и батиметрия выбранного района представлена в разд. 1. Распространение цунами в Охотском море исследуется в разд. 2, диаграмма направленности волн цунами показана в разд. 3. Рассчитанные записи волн цунами представлены в разд. 4, а их сопоставление с мареограммами в прибрежных пунктах сделано в разд. 5.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для анализа экранирующих свойств Курильской гряды мы выполнили серию вычислительных экспериментов с использованием двух батиметрий акватории в северо-западной части Тихого океана: 1) с Курильскими островами; 2) без Курильских островов. Расчетная акватория ограничена квадратом от 127.5 до 163 градусов Северной широты и от 29 до 62 градусов северной долготы, она представлена на рис. 1. Батиметрия этого района взята из атласа *Gebco Digital Atlas* с 30 секундным разрешением [<http://www.gebco.net/>].

Шаг сетки в среднем составляет 900 м. Во втором случае глубина бассейна на месте Курильских островов сглажена с изменением глубины с 2.5 км до 1 км ближе к полуострову Камчатка (рис. 1б). Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса NAMI DANCE [http://avi-nami.ce.metu.edu.tr], решающего уравнения мелкой воды, записанных в сферических координатах, с учетом вращения Земли

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = fN, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = -fN,$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \quad (3)$$

где η – смещение уровня моря; M и N – компоненты расхода воды вдоль широты λ и долготы θ ; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести, R – радиус Земли, f – параметр Кориолиса и n – коэффициент шероховатости дна. В расчетах используется значение $n = 0.0015 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька).

На самом деле, численное решение уравнений (1)–(3) делается с относительно большим шагом, так что возникающая численная дисперсия заменяет физическую дисперсию волн на воде, и в результате решаются уравнения нелинейной дисперсионной теории длинных волн [21]. Этот прием, предложенный в [22, 23] и используемый в ряде работ, позволяет не увеличивать время вычислений. При моделировании использовался временной шаг 1 секунда, удовлетворяющий условию Куранта. Граничные условия на твердых границах ставятся на подвижном урезе, так что учитывается заплеск волны на берег. На открытой границе в Тихом океане ставятся неотражающие граничные условия (в рамках линейной теории мелкой воды), соответствующие уходу волны из расчетной области. Моделирование выполнялось на протяжении от 8 до 30 расчетных часов, что позволяет рассмотреть процесс подхода волны цунами к побережью, а также сейшевые колебания в бассейне Охотского моря.

Для сопоставления результатов численного моделирования при использовании разных батиметрий, а также для сравнения с данными наблюдений при выполнении численных расчетов компьютерные мареографы располагаются в местах, максимально приближенных к постам измерения уровня моря Российской службы предупрежде-

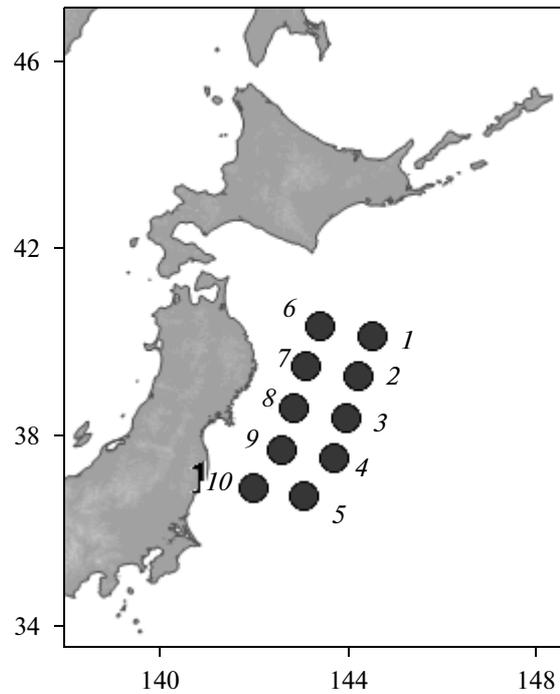


Рис. 2. Положение афтершоков землетрясения 11 марта 2011 г.

ния о цунами на о-ве Сахалин и Курильских островах (рис. 1). Однако они расположены в открытом море, в то время как реальные мареографы установлены в портовых бухтах, что в свою очередь может повлиять на высоту и характерные периоды колебаний уровня моря. Для оценки особенностей распространения цунами в районе Курильских островов и в акватории Охотского моря дополнительно использовались три группы компьютерных мареографов, разделенных с шагом 1 градус в широтном направлении (рис. 1). Первая группа расположена ближе к о-ву Сахалин, вторая – в центральной части Охотского моря и третья расположена близко к западному побережью Камчатки. При численных расчетах на обеих батиметриях использовались одни и те же компьютерные мареографы. Однако на двух компьютерных мареографах, которые попадают непосредственно на проливы Курильских островов, при использовании батиметрии без них глубина мареографов была изменена.

В качестве реального события для моделирования выбрано катастрофическое цунами, происшедшее 11 марта 2011 г. вблизи берегов Японии. Это цунами хорошо описано [24–29], и оно проявилось на Дальневосточном побережье России [18–20]. В качестве очага цунами 2011 г. выбран очаг проф. Имамуры, приведенный в [30]. Он построен по параметрам десяти наиболее крупных афтершоков, произошедших за небольшой промежуток времени (рис. 2). Очаг цунами состоит из

Таблица 1. Некоторые параметры очага цунами

№ сегмента	Координаты эпицентра	Глубина очага, км	Вертикальное смещение очага, м	Максимальное рассчитанное смещение уровня воды, м	Время срабатывания сегмента, с
1	40.168 N, 144.507 E	1	20	12.49	0
2	39.300 N, 144.200 E	1	10	6.24	0
3	38.424 N, 143.939 E	1	35	21.87	30
4	37.547 N, 143.682 E	1	15	9.37	30
5	36.730 N, 143.070 E	1	2.5	1.56	60
6	40.367 N, 143.394 E	24	1	0.5	60
7	39.496 N, 143.100 E	24.2	3	1.5	90
8	38.620 N, 142.853 E	24.2	4	1.99	90
9	37.744 N, 142.609 E	24.2	2	0.99	120
10	36.926 N, 142.009 E	24.2	2	0.99	120

десяти сегментов, срабатываемых в различные моменты времени; их параметры содержатся в табл. 1. Часть параметров одинакова для всех сегментов: длина и ширина разлома одинаковые и равны 100 км; угол между меридианной и линией разлома (Strike angle) 193° ; угол наклона плиты (Dip angle) 14° ; угол сдвига плиты (Slip angle) 81° . Высоты смещения уровня воды в очаге каждого сегмента вычислены с помощью решения Окада [31].

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ

На рис. 3 показано распространение волны цунами через 1, 3, 5 и 7 часов, рассчитанные с использованием батиметрии с Курильскими островами (слева) и без них (справа). Сильное понижение уровня моря перед основным фронтом волны получается в начальный момент землетрясения, когда сработали первые два сегмента в очаге. В дальнейшем зона понижения уровня моря уменьшается по амплитуде и размеру. Эта зона показана стрелками на рис. 3 через один час после начала землетрясения, когда сработали уже все сегменты. Форма волны цунами, видимая на рис. 3 за время 1 и 3 часа после начала землетрясения, получается несколько различной в вариантах с разной батиметрией, она более симметричная в варианте без Курильских островов. При наличии Курильских островов фронт представляет собой две полукруглости с разными радиусами. Поэтому волны цунами при моделировании без Курильских островов, как и ожидалось, распространяются в Охотском море немного быстрее и амплитуда их больше.

Хотелось бы отметить, что численные расчеты распространения волн цунами в акватории Охотского моря применительно к реальному событию 2011 г. являются модельными, так как в марте основная часть моря покрыта льдом. Нам неизвест-

ны работы, в которых изучается динамика волн цунами подо льдом. Поскольку волны цунами достаточно длинные, то лед должен оказывать слабое действие на волны, по крайней мере, в открытой части моря, но может приводить к уменьшению высот волн на больших расстояниях. Поскольку, однако, нашей целью является исследование влияния Курильских островов на проникновение цунами в Охотское море, то мы надеемся, что сравнительные характеристики обоих вариантов распространения цунами останутся неизменными.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ АМПЛИТУД ВОЛН ЦУНАМИ В АКВАТОРИИ ОХОТСКОГО МОРЯ

На рис. 4 показано распределение максимальных амплитуд волн цунами, рассчитанное за интервал времени в 8 часов при использовании разных батиметрий. Из-за особенностей расположения очага цунами основная часть энергии цунами распространялась в юго-восточном направлении в открытый океан. При численных расчетах с использованием разных батиметрий отмечается схожее распределение амплитуд волн в Тихом океане и в районе глубоководного Курило-Камчатского желоба, и это естественно объяснить диаграммой направленности цунами. При численных расчетах с использованием батиметрии без Курильских островов энергия цунами “поворачивает” (эффект рефракции волн на мелководье) в Охотское море, и основной рукав здесь направляется вдоль 147° – 150° меридиана восточной долготы к северному побережью Охотского моря, отклоняясь немного к востоку. Между 47° и 52° северной широты отмечается увеличение амплитуды максимальных колебаний волн цунами в районе северо-восточной части о. Сахалин. Таких “рукавов” не видно на рис. 4а, где использована реальная батиметрия акватории.

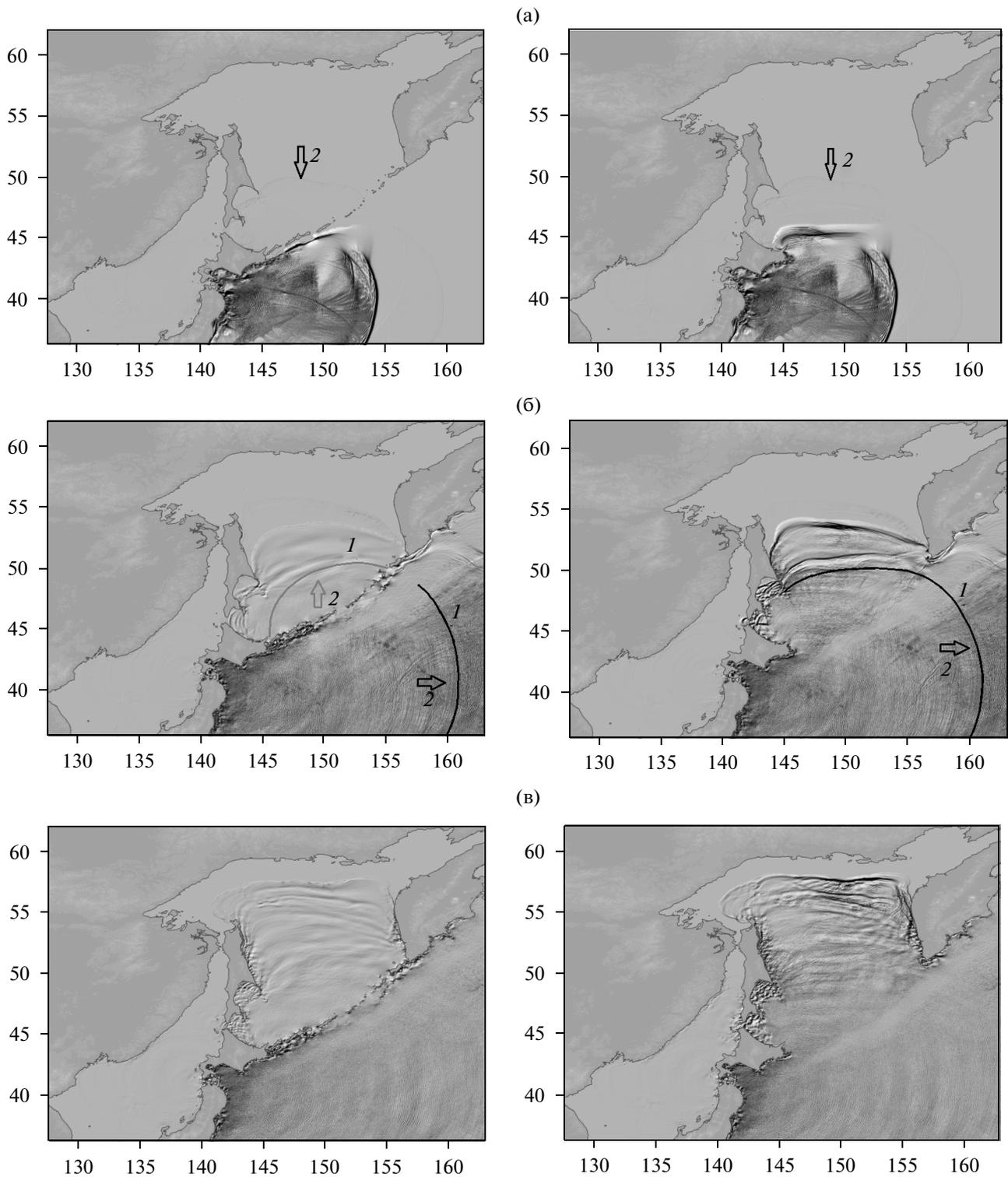


Рис. 3. Волны/цунами в Охотском море: а – через 1 час; б – через три часа; в – через 5 часов; г – через 7 часов (слева используется реальная батиметрия, справа - без Курильских островов); 1 – фронт волны цунами; 2 – направление фронта волн цунами.

В целом, можно выделить три района в Охотском море, где цунами проявились наиболее интенсивно: южное и восточное побережье о-ва Са-

халин, северное побережье Охотского моря (район г. Магадан) и западное побережье полуострова Камчатка. Эти районы, в сущности, заметны на

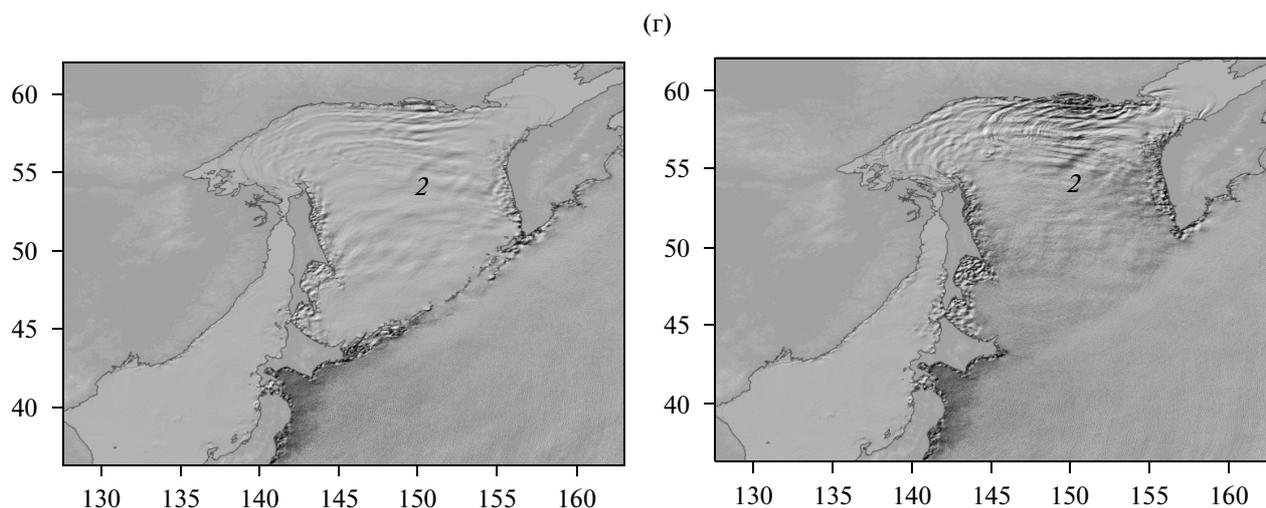


Рис. 3. Окончание.

обеих частях рис. 4, но при численных расчетах с использованием батиметрии с Курильскими островами эти районы выражены менее интенсивно и амплитуда волн в них меньше. Эффект увеличения амплитуды волн цунами в этих же районах от источников, расположенных в районе Курильских островов и в Тихом океане, описывался во многих работах (хотя иногда и не отмечался специально) [9–16] (естественно при использовании реальной батиметрии с Курильскими островами). Отмечалось, что при изменении положения источников цунами районы увеличения амплитуд цунами в Охотском море сохраняются, а меняется только их интенсивность проявления и положения максимальных волн. Как показывают наши

расчеты, в случае отсутствия Курильских островов районы максимального усиления волн цунами выделяются сильнее.

4. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ОХОТСКОГО МОРЯ

Для выявления особенностей распространения в Охотском море с использованием разных батиметрий компьютерные мареографы, расположение которых показано на рис. 1, как уже указывалось, распределены на три группы с шагом 1 градус в широтном направлении: а – восточнее о-ва Сахалин; б – в центральной части Охотского моря (там, где получают максимальные ампли-

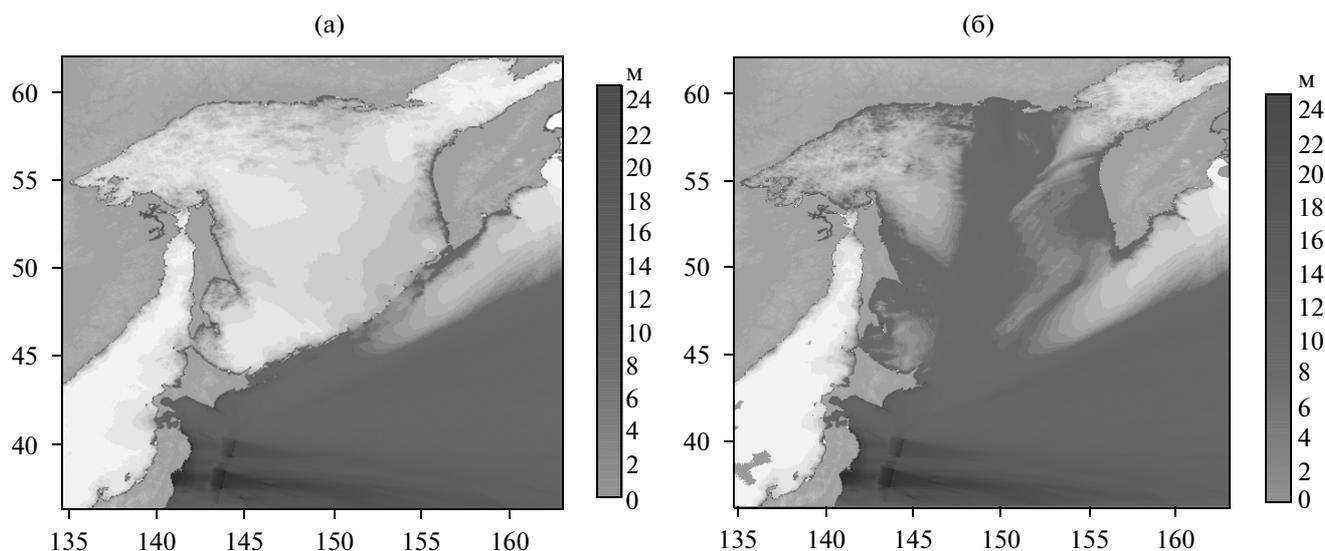


Рис. 4. Распределение максимальных амплитуд волн цунами при использовании батиметрии: а – с Курильскими островами; б – без Курильских островов.

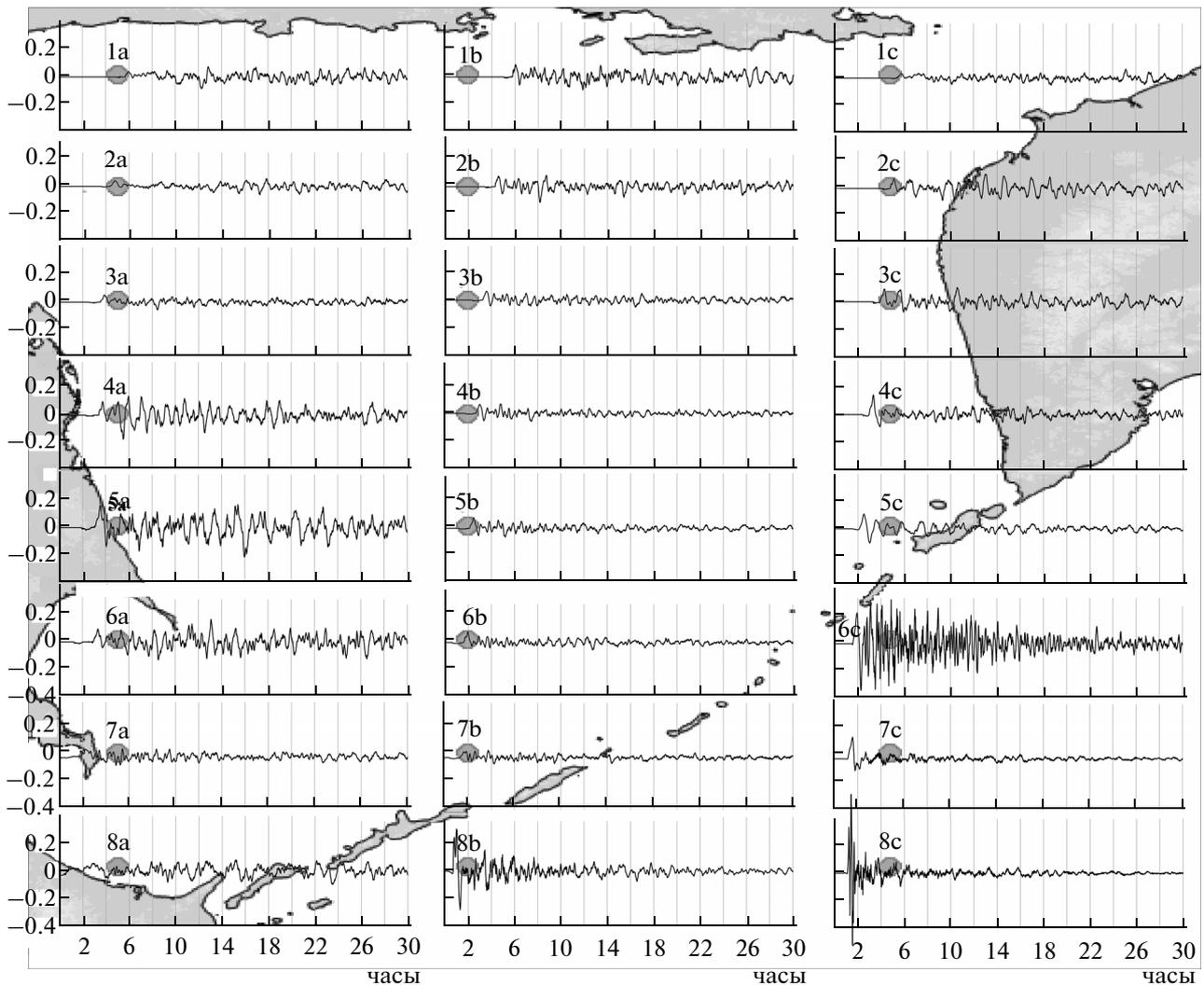


Рис. 5. Колебания уровня моря в различных точках по результатам моделирования цунами с учетом Курильских островов на протяжении 30 часов.

туды при моделировании с использованием батиметрии без Курильских островов — рис. 4б); с — западное полуострова Камчатка. На обеих батиметриях использовались одни и те же мареографы с одинаковыми глубинами постановки, за исключением мареографов 8б и 6с, расположенных в месте сглаживания глубины на батиметрии без Курильских островов. Ниже представлены результаты расчетов колебаний уровня моря в этих точках за интервал времени в 30 часов (рис. 5).

Обсудим сначала компьютерные мареограммы цунами в акватории с реальной батиметрией (рис. 5). Как и ожидалось, амплитуда волн на тихоокеанских мареографах выше, чем в Охотском море, свидетельствуя о защитной роли Курильских островов в проникновении цунами в Охотское море. Отметим, что колебания уровня моря с океанской стороны затухают примерно в два раза за 10 часов (мареографы 6с, 7с, 8б и 8с), в то время как в

Охотском море они продолжают, в сущности, без заметного спада по амплитуде за все время расчетов (30 часов). Такие колебания связаны с возбуждением сейш в бассейне Охотского моря, который представляет собой почти замкнутый резонатор.

На рис. 6 показаны совмещенные колебания уровня моря, полученные по результатам численных расчетов с использованием батиметрий с Курильскими островами и без них продолжительностью 8 часов. Из рисунка видно, что в большинстве точек Охотского моря первая волна цунами при моделировании без Курильских островов приходит немного раньше и амплитуда ее, как правило, выше. Отличия наблюдаются и в формах волн. При отсутствии Курильских островов колебания уровня моря в центральной части относительно быстро затухают, поскольку теперь бассейн Охотского моря является открытым, и долгоживущие сейши в нем

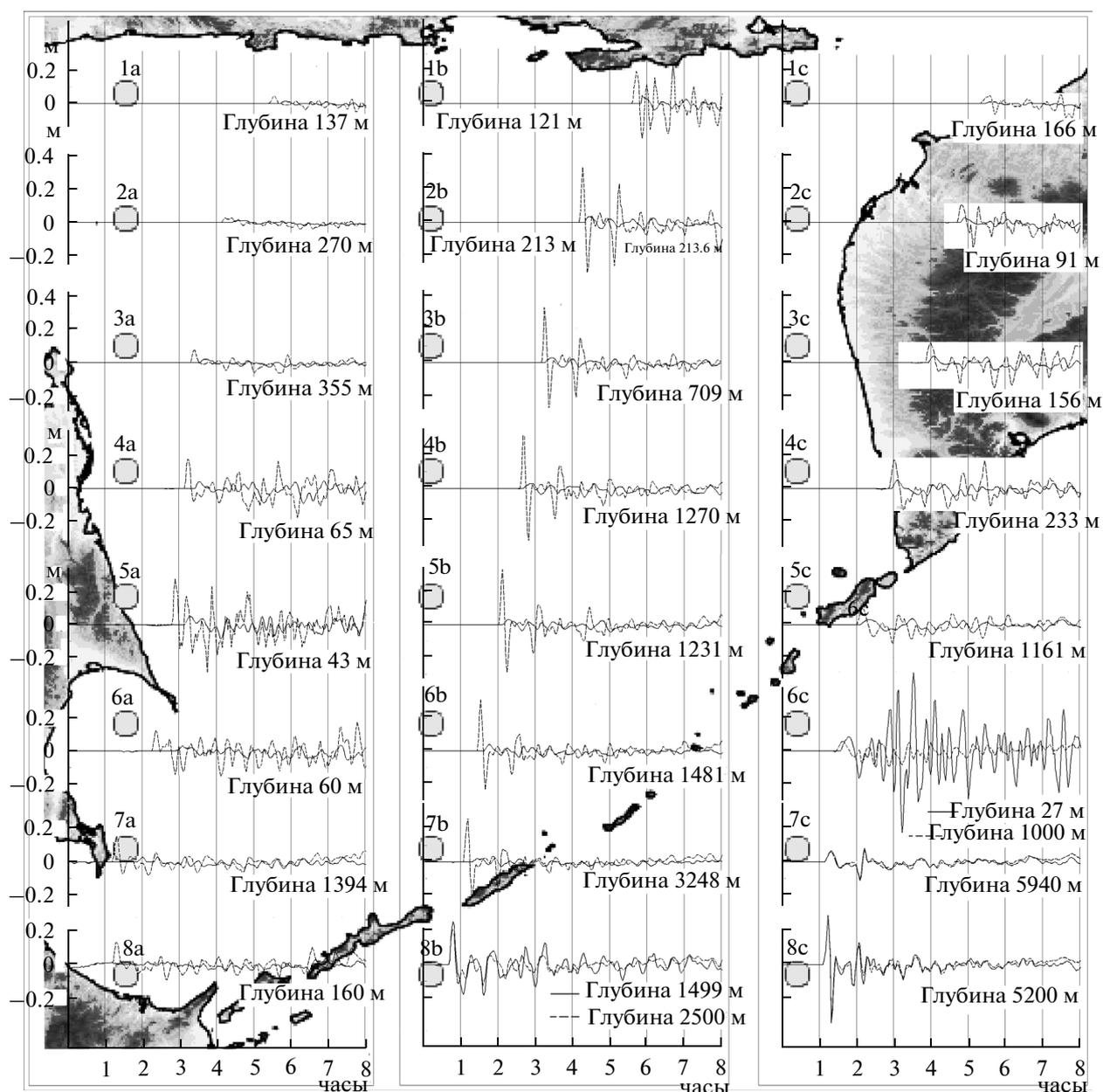


Рис. 6. Колебания уровня моря в различных точках по результатам моделирования с Курильскими островами и без них на протяжении 8 часов.

невозможны. В то же время вблизи побережья длинноволновые колебания уровня моря продолжают на протяжении 8 часов и уменьшаются незначительно в силу локальных резонансных эффектов.

Во многих точках (мареографы 4a–8a, 4b–8b и 2c–6c) цунами начинается с небольшого понижения уровня моря (около 0.01 м), что связано с особенностями очага цунами (см. рис. 3). В северной части Охотского моря, куда волны приходят в результате многочисленных отражений, понижение уровня моря практически исчезает.

Увеличение амплитуды колебаний уровня моря на расчетных записях в точках 4a, 5a и 6a, особенно при моделировании с использованием батиметрии без Курильских островов (рис. 6), связано с тем, что они расположены недалеко от побережья о-ва Сахалин и глубины постановки этих компьютерных мареографов меньше, чем у остальных мареографов группы “а”.

В точке 6c амплитуда волны в реальной батиметрии оказалась больше, чем в случае отсутствия Курильских островов, что связано с разницей глубин постановки компьютерного мареографа. На

Таблица 2. Параметры волн цунами по результатам численного моделирования для группы компьютерных мареографов “а”

Номер мареографа	Глубина постановки компьютерного мареографа, м	Время вступления первой волны с Курильскими островами*	Время вступления первой волны без Курильских островов*	Высота первой волны с Курильскими островами, м	Высота первой волны без Курильских островов, м	Высота максимальной волны с Курильскими островами, м	Высота максимальной волны без Курильских островов, м
1 а	137.2	5 ч 39 мин	5 ч 22 мин	0.03	0.06	0.03	0.09
2 а	270.2	4 ч 19 мин	4 ч 6 мин	0.02	0.03	0.03	0.05
3 а	355.7	3 ч 33 мин	3 ч 17 мин	0.03	0.09	0.04	0.12
4 а	65.96	3 ч 25 мин	3 ч 7 мин	0.08	0.28	0.14	0.29
5 а	43	3 ч 7 мин	2 ч 47 мин	0.06	0.5	0.15	0.59
6 а	60	2 ч 53 мин	2 ч 15 мин	0.05	0.14	0.1	0.3
7 а	1394	1 ч 52 мин	1 ч 11 мин	0.03	0.24	0.07	0.24
8 а	160.4	0**	1 ч 12 мин***	0.03	0.17	0.08	0.18

Примечание. * – от начала моделирования цунами; ** – волна начинается с понижения уровня моря, значительных высот волн не просматривается; *** – начало вступления большой волны.

Таблица 3. Параметры волн цунами по результатам численного моделирования для группы компьютерных мареографов “b”

Номер мареографа	Глубина постановки компьютерного мареографа, м	Время вступления первой волны с Курильскими островами*	Время вступления первой волны без Курильских островов*	Высота первой волны с Курильскими островами, м	Высота первой волны без Курильских островов, м	Высота максимальной волны с Курильскими островами, м	Высота максимальной волны без Курильских островов, м
1 b	121.4	5 ч 48 мин	5 ч 34 мин	0.09	0.43	0.09	0.43
2 b	213.6	4 ч 19 мин	4 ч 9 мин	0.08	0.7	0.08	0.7
3 b	709.5	3 ч 16 мин	3 ч 10 мин	0.06	0.72	0.07	0.72
4 b	1270	2 ч 40 мин	2 ч 35 мин	0.07	0.81	0.09	0.81
5 b	1231	2 ч 8 мин	2 ч	0.07	0.66	0.08	0.66
6 b	1481	1 ч 38 мин	1 ч 26 мин	0.07	0.59	0.07	0.59
7 b	3248	1 ч 18 мин	1 ч 4 мин	0.04	0.49	0.08	0.49
8 b	1499/2500**	41 мин	41 мин	0.46	0.36	0.46	0.36

Примечание. * – от начала моделирования цунами; ** – для батиметрии без Курильских островов.

месте компьютерного мареографа бс глубина моря на батиметрии без Курильских островов сглажена до 1000 м (рис. 1, табл. 4), а на батиметрии с Курильскими островами она составляет 27.6 м. Естественно, что амплитуда волны тем больше, чем меньше глубина места.

В табл. 2–4 представлены рассчитанные время вступления первой волны цунами и амплитуды первых и максимальных волн в разных точках рассматриваемой акватории.

Из табл. 2–4 видно, что Курильские острова задерживают приход волн цунами в Охотском море на 5–40 минут, поскольку волны вынуждены распространяться через относительно узкие проливы. Разница в амплитудах колебаний уровня моря в этих двух вариантах значительна (пример-

но в 2–3 раза), так что Курильские острова действительно экранируют прохождение цунами в Охотское море. Исключение составляют компьютерные мареографы, расположенные с тихоокеанской стороны Курильских островов, где большая положительная первая волна для обоих случаев моделирования, естественно, оказывается одинаковой.

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ ВОЛН ЦУНАМИ В ОХОТСКОМ МОРЕ

Наблюдения за цунами 11 марта 2011 г. проводились в ряде населенных пунктов о-ва Сахалин и Курильских островов Российской службой предупреждения о цунами. На северном и восточном

Таблица 4. Параметры волн цунами по результатам численного моделирования для группы компьютерных мареографов “с”

Номер мареографа	Глубина постановки компьютерного мареографа, м	Время вступления первой волны с Курильскими островами*	Время вступления первой волны без Курильских островов*	Высота первой волны с Курильскими островами, м	Высота первой волны без Курильских островов, м	Высота максимальной волны с Курильскими островами, м	Высота максимальной волны без Курильских островов, м
1 с	166.7	5 ч 26 мин	5 ч 19 мин	0.02	0.12	0.02	0.15
2 с	91.7	4 ч 47 мин	4 ч 41 мин	0.05	0.2	0.05	0.27
3 с	156.3	3 ч 55 мин	3 ч 50 мин	0.07	0.19	0.11	0.24
4 с	233.6	2 ч 57 мин	2 ч 52 мин	0.1	0.33	0.1	0.33
5 с	1161	2 ч 6 мин	1 ч 59 мин	0.07	0.19	0.08	0.19
6 с	27.6/1000**	1 ч 34 мин	1 ч 27 мин	0.27	0.1	0.98	0.17
7 с	5940	1 ч 8 мин	1 ч 8 мин	0.11	0.1	0.2	0.2
8 с	5200	1 ч 5 мин	1 ч 5 мин	0.98	1.01	0.98	1.01

Примечание. * – от начала моделирования цунами; ** – для батиметрии без Курильских островов.

побережьях Охотского моря в рассматриваемый период измерения уровня моря не проводились. На рис. 7 показано расположение прибрежных постов измерения уровня моря на о-ве Сахалин и Курильских островах, зарегистрировавшие цунами 2011 г. При выполнении численных расчетов компьютерные мареографы находятся в местах, максимально приближенных к этим постам. В целом, они расположены в открытом море на больших глубинах, в отличие от “реальных” мареографов, установленных в портовых бухтах. Номерам

на рисунке соответствуют номера постов измерения уровня моря в табл. 5 [<http://rtws.ru>].

На рис. 8 показано сопоставление рассчитанных мареограмм цунами с наблюдаемыми [<http://rtws.ru>]. Как видим, наблюдается хорошее согласие между расчетами и наблюдениями, несмотря на различия в положениях реальных и компьютерных мареографов. В то же время “удаление” Курильских островов ведет к более раннему приходу волн цунами и значительному увеличению их высоты.

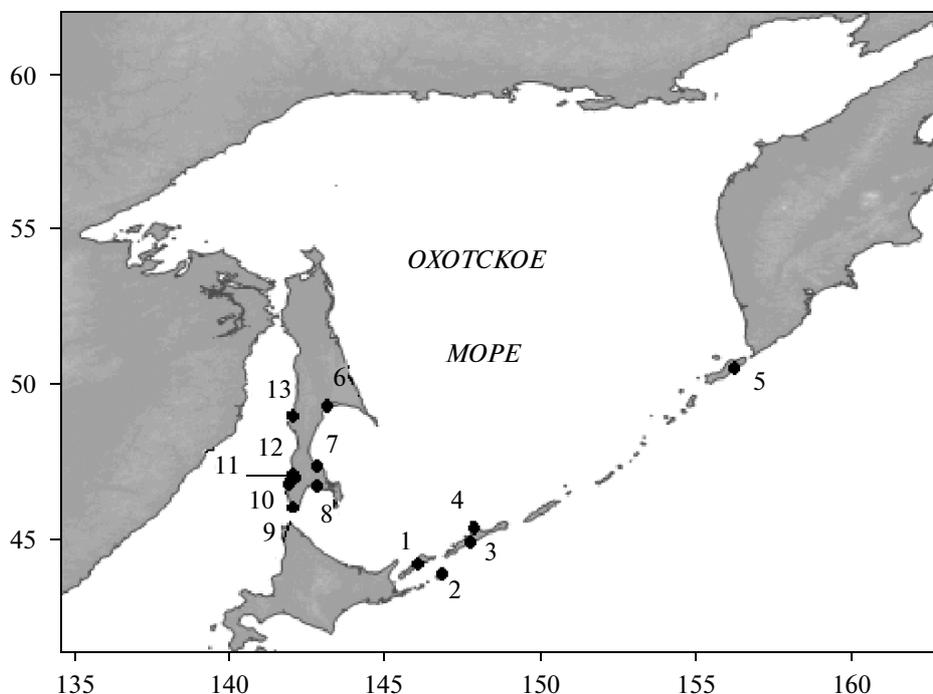
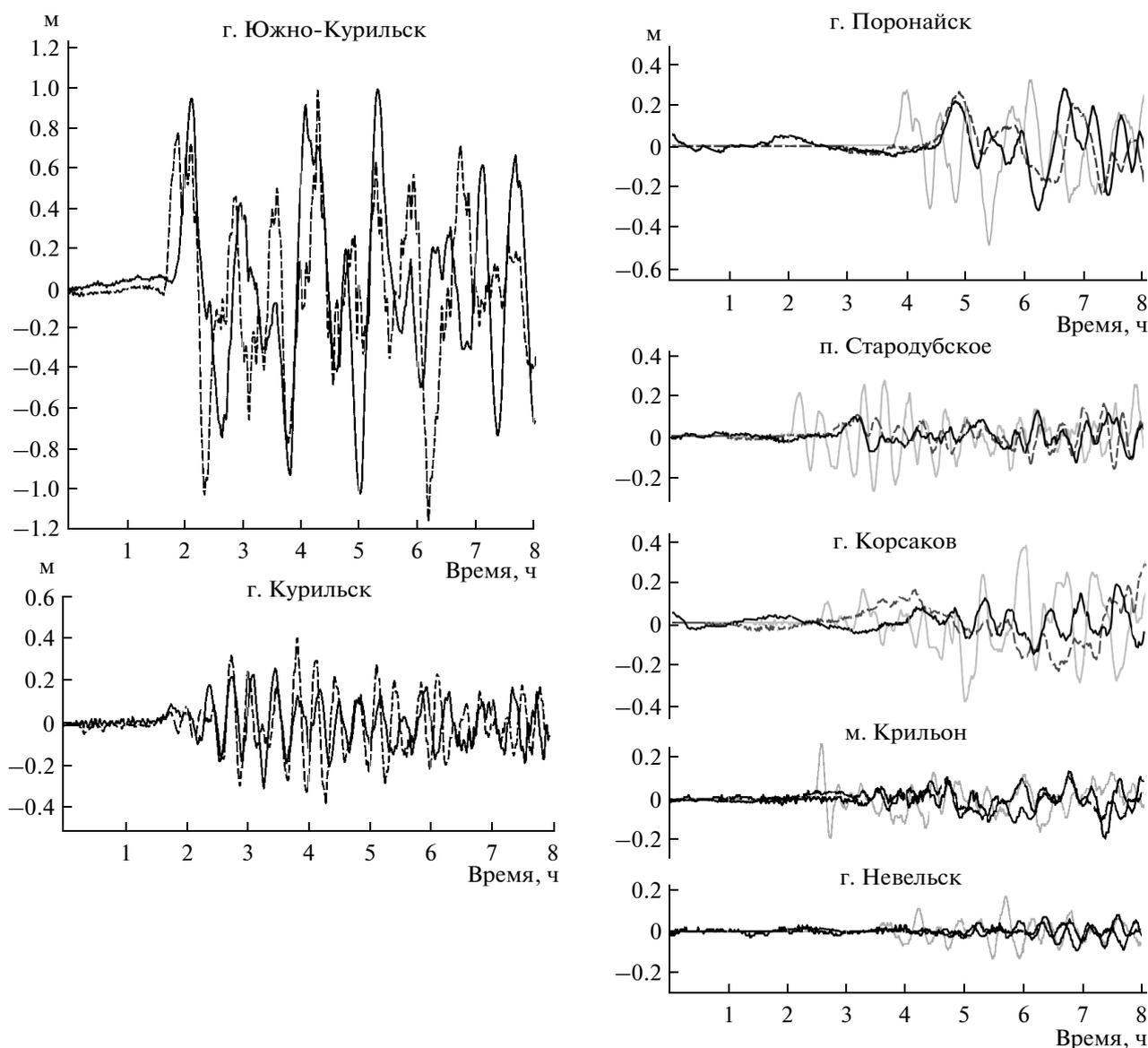
**Рис. 7.** Расположение прибрежных станций измерения уровня моря.

Таблица 5. Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, вызванные землетрясениями у юго-восточного побережья Японии

Населенный пункт	Высота цунами, м	Наименование населенного пункта	Высота цунами, м
1. г. Южно-Курильск (о. Кунашир)	3	8. г. Корсаков (о. Сахалин)	0.67
2. п. Малокурильское (о. Шикотан) (визуально)	1.89	9. м. Крильон (о. Сахалин)	0.29
3. п. Буревестник (о. Итуруп) (визуально)	0.56	10. г. Невельск (о. Сахалин)	0.27
4. г. Курильск (о. Итуруп)	2	11. п. Правда (о. Сахалин)	0.25
5. г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	1.6	12. г. Холмск (о. Сахалин)	0.22
6. г. Поронайск (о. Сахалин)	0.85	13. г. Углегорск (о. Сахалин)	0.18
7. п. Стародубское (о. Сахалин)	0.65		

**Рис. 8.** Колебания уровня моря по наблюдениям и расчетам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью статьи являлась количественная оценка экранных свойств Курильских островов при проникновении цунами в Охотское море. В качестве примера рассмотрено распространение Японского цунами 2011 г. Наша модель адекватно воспроизводит это цунами, что видно из хорошего совпадения рассчитанных колебаний уровня моря с мареограммами цунами в прибрежных пунктах о-ва Сахалин. В то же время, если бы не было Курильских островов, то цунами приходило к берегу значительно раньше (максимально на 40 мин в удаленных пунктах) и с большей высотой (в 2–3 раза). Таким образом, расчеты подтвердили, что Курильские острова существенно препятствуют проникновению цунами в Охотское море и позволили сделать количественные оценки данного эффекта.

Представленные результаты получены в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133 (проект № 2839), а также при поддержке грантов РФФИ (14-05-91370_СТ_а, 14-05-00092).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 308 с.
2. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. Каталог цунами в Тихом океане, 1969–1982. М.: Межведомственный геофизический комитет. 1986. 164 с.
3. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–138.
4. Ким Х.С., Рабинович А.Б. Цунами на северо-западном побережье Охотского моря // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. — Владивосток ДВО АН СССР, 1990. Т. 1. С. 206–218.
5. Шетников Н.А. Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952–1968 гг. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 164 с.
6. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
7. Шевченко Г.В., Ковалев П.Д., Богданов Г.С. и др. Регистрация цунами у берегов Сахалина и Курильских островов // Вестник ДВО. 2008. № 6. С. 23–33.
8. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР. Тихоокеанский ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9–17.
9. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в бассейне Охотского моря: Возможные сценарии // ДАН. 2006. Т. 410. № 4. С. 528–531.
10. Лобковский Л.И., Куликов Е.А., Рабинович А.Б. и др. Землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. в районе центральных Курил: оправдавшийся прогноз // ДАН. 2008. Т. 418. № 6. С. 829–833.
11. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 181–197.
12. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Морозова А.О. Численное моделирование и спектральный анализ цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатской зоне // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 485–494.
13. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Левин Б.В. и др. Курильские цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.: два трансихоокеанских события // ДАН. 2009. Т. 426. № 3. С. 386–392.
14. Зайцев А.И., Костенко И.С., Чернов А.Г. Моделирование воздействия удаленного цунами на Дальневосточное побережье России // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 3(82). С. 34–39.
15. Костенко И.С. Исследование воздействия удаленных цунами на побережье Сахалинской области // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 2(87). С. 32–37.
16. Костенко И.С., Зайцев А.И., Ялченир А. и др. Проявление Тохоку цунами 2011 года в районе Курильских островов и о. Сахалин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2(99). С. 43–51.
17. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 5. С. 578–590.
18. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 года на тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–64.
19. Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice // Pure Appl. Geophys. 2013. V. 170. P. 1103–1114.
20. Shevchenko G., Ivetskaya T., Loskutov A. Characteristics of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Russian Far East Coast: Deep-Water and Coastal Observations // Pure Appl. Geophys. 2014. V. 171. P. 3329–3350.
21. Kian R., Yalciner A.C., Zaytsev A. Evaluating the performance of tsunami propagation models // Proc. Bauhaus Summer School in Forecast Engineering: Global climate change and the challenge for built environment (17–29 August 2014, Weimar, Germany), Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2014. 10 p.
22. Yoon S.B. Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № C10. P. 3140-1-11.
23. Yoon S.B., Lim C.H., Choi J. Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2007. V. 18. № 1. P. 32–53.
24. Mori N., Takahashi T. Nationwide Post Event Survey and Analysis of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami // Coastal Engineering J. 2012. V. 54. № 1. P. 1250001-1-27.

25. *Wei Y., Chamberlin C., Titov V.V. et al.* Modeling of the 2011 Japan Tsunami: Lessons for Near-Field Forecast // *Pure Appl. Geophys.* 2013. V. 170. № 6–8. P. 1309–1331.
26. *Fine I.V., Kulikov E.A., Cherniawsky J.Y.* Japan's 2011 Tsunami: Characteristics of Wave Propagation from Observations and Numerical Modelling // *Pure Appl. Geophys.* 2013. V. 170. № 6–8. P. 1295–1307.
27. *Saito T., Inazu D., Tanaka S., Miyoshi T.* Tsunami coda across the Pacific ocean following the 2011 Tohoku-Oki earthquake // *Bull. Seismol. Soc. America.* 2013. V. 103. № 2B. P. 1429–1443.
28. *Chen C., Lai Z., Beardsley R.C. et al.* The March 11, 2011 Tohoku M 9.0 earthquake-induced tsunami and coastal inundation along the Japanese coast: A model assessment // *Prog. Oceanogr.* 2014. V. 123. P. 84–104.
29. *Choi B.H., Kim K.O., Min B.I., Pelinovsky E.* Transoceanic propagation of 2011 East Japan earthquake tsunami // *Ocean and Polar Res.* 2014. V. 36. № 3. P. 223–232.
30. *Imamura F., Koshimura S., Oie T. et al.* Tsunami source model for the 2011 Tohoku off Pacific earthquake, Tohoku University model (ver. 1.1). Tsunami eng., Tohoku: Tohoku University, 2011. 12 p.
31. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seism. Soc. America.* 1985. V. 75. P. 1135–1154.

ВЛИЯНИЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ЦУНАМИ В ОХОТСКОЕ МОРЕ (НА ПРИМЕРЕ ЯПОНСКОГО ЦУНАМИ 11 МАРТА 2011 ГОДА)

© 2016 г. И. С. Костенко^{1,2}, А. А. Куркин¹, Е. Н. Пелиновский¹⁻³, А. Ялчинер⁴

¹Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
E-mail: aakurkin@gmail.com

²Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований
693023 Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25
E-mail: irenka_k@rambler.ru

³Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: pelinovsky@gmail.com

⁴Ближневосточный технический университет (Middle East Technical University)
06800 Анкара, Турция, бульвар Думлипинара, 1
E-mail: yalciner@metu.edu.tr

Поступила в редакцию 16.01.2015 г.

Проведено исследование особенностей распространения цунами 11 марта 2011 г. в северо-восточной части Тихого океана для выявления степени влияния Курильских островов на проникновение цунами в Охотское море. Для этого проведена серия вычислительных экспериментов в рамках теории мелкой воды с использованием двух батиметрий: 1) с Курильскими островами; 2) без Курильских островов. Выполнен анализ рассчитанных высот волн и оценена магнитуда и интенсивность цунами в Охотском море. Проведенные вычислительные эксперименты позволят оценить количественно уменьшение интенсивности цунами при прохождении волны Курильских островов.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, Курильские острова, Охотское море.