

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И МИНИМИЗАЦИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

УДК 551.466.62

С.Ф. Доценко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ В ЧЕРНОМ, АЗОВСКОМ И КАСПИЙСКОМ МОРЯХ КАК НЕОБХОДИМЫЙ ЭЛЕМЕНТ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

Дан обзор исследований о цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях. Описана математическая модель прогноза поверхностных длинных волн, наиболее широко применяемая для описания распространения цунами в ограниченных бассейнах переменной глубины. Дана характеристика возможностей использования модели для раннего предупреждения цунами. Приведены примеры сценариев развития цунами в морях и распределения максимальных высот волн вдоль побережья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, Азовское море, Каспийское море, цунами, прогнозирование, сценарии событий, районирование побережья.*

Введение. В последние годы интерес к изучению цунами в районах Мирового океана, где это явление наблюдается сравнительно редко, существенно усилился, особенно после произошедших в различных районах Земли катастрофических цунами сейсмического происхождения. Эти события привлекли внимание мировой общественности и стимулировали развертывание европейской системы раннего предупреждения о цунами в северо-восточной Атлантике, Средиземном и Черном морях [1]. Помимо этого, запланировано также создание систем раннего предупреждения о цунами в Индийском океане и Карибском бассейне. В Украине проблема черноморских цунами рассматривается в контексте морских природных катастроф в Азово-Черноморском регионе, включая такие опасные природные явления, как сгонно-нагонные колебания уровня моря, штормовые волны, волны-убийцы, сейши, тягун в портах и др. [2]. Они могут увеличивать реальные высоты цунами, а в результате усиливать негативное воздействие волн на население, инфраструктуру и экологию побережья.

Исследовательские программы для расчета цунами в бассейнах с реальной батиметрией давно получили широкое распространение. Разработка компьютерной системы прогноза цунами – более сложная задача. Такая система предполагает возможность быстрого приспособления к новым районам Мирового океана, гибкость по отношению к изменениям разрешения модели, телескопирование, простую процедуру изменения положения и па-

© С.Ф. Доценко, 2012

раметров очага цунами, визуализацию волновых полей, расчет мареограмм, нахождение экстремальных характеристик волн и другой информации. Давно и успешно работы по разработке компьютерных систем для прогноза волн цунами проводятся в лаборатории цунами Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Сибирское отделение Российской академии наук, Новосибирск, Россия) [3], в дальневосточных организациях (Южно-Сахалинск, Владивосток) [4], в Центре исследования цунами Национального управления океанических и атмосферных исследований (Сиэтл, США) [5] и др., предназначенных, в основном, для расчета распространения цунами в бассейне Тихого океана.

В работах [6, 7] описаны версии компьютерной системы прогноза цунами в Черном море. Они могут быть использованы для исследовательских или прикладных работ, оперативных прогнозов, в частности, в качестве элемента системы раннего предупреждения о черноморских цунами.

Ниже дан обзор исследований о цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях, относящихся к морям средиземноморского пояса. Описана математическая модель прогноза поверхностных длинных волн с учетом донного трения, наиболее широко применяемая для описания распространения цунами в ограниченных бассейнах переменной глубины. Изложены некоторые результаты исследования явления цунами в этих морских бассейнах и дана характеристика возможностей использования математической модели для раннего предупреждения цунами. Наконец, приведены примеры сценариев развития цунами в морях и оценки возможных высот волн вдоль побережья.

Основные блоки математической модели прогноза цунами. Компьютерная система прогноза цунами в Черном море включает следующие основные блоки [7]:

- ввод данных;
- расчет параметров начального возмущения моря и эволюции волны цунами в Черном море;
- выходные данные по результатам вычислительного эксперимента.

Входными данными компьютерной системы являются сетка глубин и топографии местности, параметры эллиптической зоны генерации цунами (длины осей эллипса, смещение дна в центре очага, ориентация большой оси эллипса по отношению к параллелям), задаваемые пользователем, шаг интегрирования по времени, пункты регистрации расчетных мареограмм.

Выходные данные включают поле уровня моря, его экстремальные подъемы и понижения в заданные моменты времени и мареограммы для выбранных точек бассейна.

В систему вводится топография Черноморской впадины на квадратной сетке, имеющей 2397×1779 узлов с пространственным шагом 500 м. На границе бассейна глубина принята равной 5 м.

Для задания параметров очага цунами использованы эмпирические формулы для осей эллипса, найденные по данным для евроазиатского региона [8], и максимальные смещения дна в центре очага для тихоокеанского [9]. Формулы имеют вид:

$$\begin{aligned}
L &= W; \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5); \\
\lg L &= 0,6M - 2,5; \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5); \\
\lg a_0 &= 0,8M - 5,6,
\end{aligned}
\tag{1}$$

где L и W – большая и малая оси эллипса соответственно (в км); a_0 – максимальное смещение дна (начальное смещение уровня моря в м) в эпицентре; M – магнитуда землетрясения.

Формулы (1) использованы в расчетном модуле системы для нахождения начального смещения поверхности моря в эллиптической области с центром в точке (x_0, y_0) по формуле

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2}\right) \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1),
\tag{2}$$

где

$$r = 2\sqrt{\left(\frac{x_1}{L}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{W}\right)^2},$$

$x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$; $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha - (x - x_0)\sin\alpha$; α – угол наклона продольной оси эллипса к оси x , отчитываемый против часовой стрелки.

В компьютерной системе реализован конечно-разностный алгоритм расчета полей на основе системы нелинейных уравнений динамики поверхностных длинных волн в полных потоках с учетом квадратичного по скорости донного трения [10]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{U^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{UV}{D}\right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2},
\tag{3}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{UV}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{V^2}{D}\right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2},
\tag{4}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0
\tag{5}$$

с условием скольжения на твердой береговой границе, означающем равенство нулю нормальной к границе проекции полного потока жидкости:

$$V_n = 0.
\tag{6}$$

Начальные условия задаются в виде

$$U = V = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0).
\tag{7}$$

В начально-краевой задаче (3) – (7) переменные x, y – зональная и меридиональная координаты; t – время; $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора полного горизонтального потока жидкости на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещения поверхности жидкости от горизонтального положения; $\zeta_0(x, y)$ – начальное смещение свободной поверхности жидкости (2); $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ – полная (динамическая) глубина жидкости; $H(x, y)$ – глубина бассейна в невозмущенном состоянии; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ – локальная скорость распространения длинных волн; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр Маннинга.

Решение задачи (3) – (7) находилось методом конечных разностей по явно-неявной по x, y и одношаговой по времени t схеме на разнесенных для проекций полного потока и смещений поверхности моря сетках (сетка Аракавы C) с шагами, соответствующими сетке глубин бассейна [7]. Шаг по времени – 1 с.

Аналогичная схема расчета волн цунами из распределенных зон генерации была применена для описания распространения длинных поверхностных волн без дисперсии в Азовском и Каспийском морях и оценки экстремальных подъемов и понижений уровня моря вдоль побережья.

Цунами в Черном море. Все известные черноморские цунами можно разделить на две группы. Первая включает события, которые в силу исторической давности, удаленности зон проявления от гидрометеопостов или иных причин не были зарегистрированы инструментально, но описаны очевидцами, отмечены как разрушительные для населения прибрежных районов в летописях и легендах. Во вторую группу входят события, при которых аномальные колебания уровня зафиксированы мареографами.

Пункты и даты проявления черноморских цунами, отнесенных к первой группе событий, показаны на рис. 1.



Рис. 1. Пункты (■) и годы наблюдения цунами вдоль побережья Черного моря без инструментальной регистрации колебаний уровня.

Карта включает 21 цунами за последние две тысячи лет [11 – 15]. События характеризуются различной степенью достоверности, а именно, от возможных

событий, относящихся в первую очередь к древним временам, до исторических событий, не вызывающих сомнения. Вопрос достоверности информации о черноморских цунами первой группы с использованием специальной шкалы надежности исторических данных обсуждался ранее в статье [12].

Цунами наблюдались вдоль всего побережья Черного моря. Их подавляющая часть вызвана землетрясениями в море, некоторые генерировались землетрясениями на суше. Исторические свидетельства позволяют говорить, что цунами в районах Сухуми (20 г.), Севастополя (103 г.), Варны (543 г.), Босфора (557 г.), Евпатории (1341 г.), Фороса (1427 г.), у восточного побережья Черного моря (1909 г.) и на севере Турции (1598 г.) были, весьма вероятно, катастрофическими с высотами волн до 2 – 3 м.

Наибольший интерес для оценки параметров черноморских цунами у побережья представляет вторая группа событий, к которой отнесены волны, зарегистрированные инструментально. Известно четыре таких события. Явление сопровождало подводным землетрясениям 26.06.1927 г. и 11 – 12.09.1927 г. к юго-западу и к югу от Южного берега Крыма с магнитудами $M = 5,5$ и $6,5$ соответственно, разрушительному Эрзинджанскому землетрясению 26.12.1939 г. ($M = 7,9 - 8,0$) с эпицентром на суше в 150 км от северо-восточного побережья Турции и подводному землетрясению 12.06.1966 г. ($M = 5,8$) на восточном берегу моря в районе Анапы. Эпицентры этих землетрясений указаны на рис. 2.

В работе [16] обобщены и уточнены мареографические данные для этих цунами. Каждое событие зарегистрировано несколькими мареографами вдоль крымского и кавказского участков побережья Черного моря. Пункты регистрации цунами на побережье Черного моря и в Азовском море указаны на рис. 2.



Рис. 2. Эпицентры цунамигенных землетрясений (○) и пункты регистрации (■) цунами: 1 – Одесса; 2 – Евпатория; 3 – Севастополь; 4 – Ялта; 5 – Феодосия; 6 – Керчь; 7 – Опасное; 8 – Мариуполь; 9 – Новороссийск; 10 – Геленджик; 11 – Туапсе; 12 – Потти; 13 – Батуми.

Явление цунами наблюдалось вдоль всего побережья Черного моря. Волны возбуждались как подводными землетрясениями, так и землетрясе-

ниями на суше. Колебания уровня носили нерегулярный характер, представляли собой наложение волн с различными характерными частотами. В ряде случаев они были модулированы по амплитуде. Весьма вероятно предположить многократное отражение волн цунами от берегов Черного моря. Отмечено прохождение цунами 11 – 12 сентября 1927 г., 28 декабря 1939 г. и 12 июля 1966 г. из Черного в Азовское море через Керченский пролив: отголоски этих цунами зарегистрированы в пунктах Опасное или Мариуполь Азовского моря [17]. Крымский полуостров частично экранирует волны зонального направления. Так, в Одессе отмечены только слабые отголоски одного из зарегистрированных цунами [17]. Приход цунами сопровождался возбуждением и усилением сейш в бухтах Черного моря.

Оцифровка мареографических данных и компьютерный анализ полученных временных рядов позволил уточнить и найти ряд характеристик реальных цунами в Черном море [16]. Рассчитаны высоты первых из пришедших волн цунами, максимальные высоты и характерные периоды волн, знаки вступления первой волны, время распространения волн из зон генерации до береговых пунктов регистрации и др. Для определения периодов волн использованы расчеты частотных спектров [18].

Распределение высот черноморских цунами вдоль побережья моря очень неравномерно. Высота первой волны в пунктах наблюдения изменялась в диапазоне от 0,015 до 0,52 м, а высота волн цунами в целом – от 0,03 до 0,52 м. Для большинства пунктов побережья видна заметная тенденция к увеличению высот волн с ростом магнитуды землетрясения. Как правило, цунами характеризуются первоначальным подъемом уровня моря, а первая волна не являлась наибольшей по высоте. Максимальные высоты цунами не превысили 0,52 м, однако в некоторых пунктах побережья смещения уровня моря составили по визуальным оценкам 1 – 2 м [12]. Максимальные перепады уровня моря в пакетах волн цунами для рассматриваемых мареограмм соответствовали как понижениям, так и повышениям уровня моря.

Время распространения цунами до ближайших к зоне сейсмической генерации пунктов регистрации составило 9 мин, а до ближайших участков побережья волна распространялась за 5 мин и менее. Время распространения волн до удаленных точек берега значительно больше: волны цунами 1927 г. распространялись из зоны генерации до Одессы приблизительно 3 ч, до Мариуполя более 4,5 ч.

Только численное моделирование позволяет описать процесс распространения волн в морском бассейне в целом или в его частях. Остановимся на организации вычислений для участка моря, примыкающего к Южному берегу Крыма и восточному побережью моря [19].

Расчеты волн цунами выполнены для 24 эллиптических очагов (рис. 3) с центрами на изобатах 200, 1 000 и 1 800 м материкового склона.

Такой выбор положений очагов мотивирован одинаковыми перепадами глубин в направлении берега, что создает почти равные исходные условия (для каждого из трех рядов очагов) с точки зрения усиления волн цунами при распространении к берегу. Большие оси очагов ориентированы вдоль изобат.

Для расчета параметров начального сейсмического возмущения моря использованы формулы (1) и (2). Очаги покрывают Южнобережную (Крымско-Кавказскую) зону повышенной сейсмической активности, которая соз-

дает наибольшую потенциальную цунамиопасность для Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря. Южнобережная сейсмоактивная зона Черноморской впадины характеризуется наибольшим выделением энергии в верхнем 15-километровом слое литосферы и значительным вкладом землетрясений с магнитудами $M \geq 5$ [20]. Очаг 1 близок к зоне сейсмической генерации цунами 26 июня 1927 г.

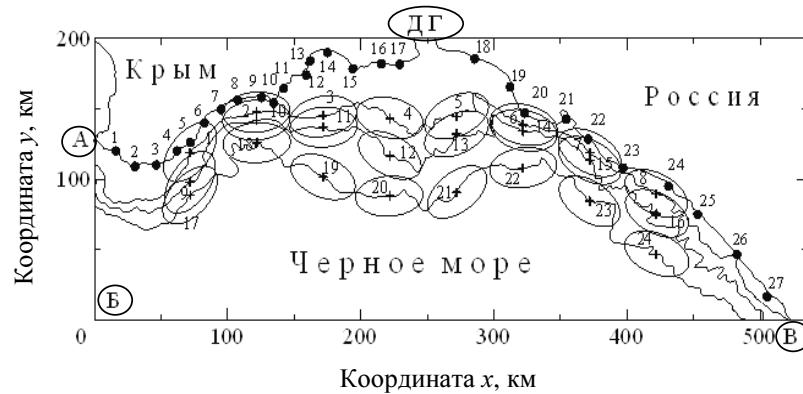


Рис. 3. Расчетная область АБВГДА численной модели эволюции цунами с указанием 27 береговых пунктов для анализа расчетных мареграмм и 24 эллиптических зон сейсмической генерации волн ($M = 7$).

Обобщенные оценки интенсивности цунами, вызванных землетрясениями в Крымско-Кавказской сейсмической зоне, приведены на рис. 4 для диапазона магнитуд 6 – 7, характерного для Черноморской впадины.

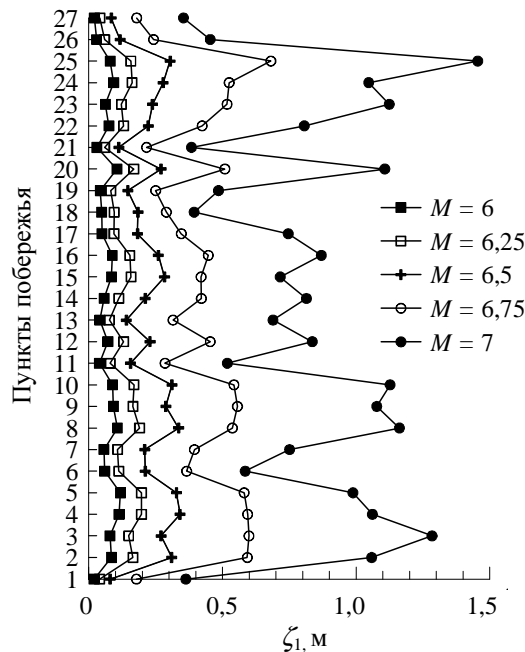


Рис. 4. Максимально возможные (для всей системы эллиптических зон генерации) высоты ζ_1 первых гребней волн цунами в пунктах побережья 1 – 27 при землетрясениях различной магнитуды в диапазоне 6 – 7.

Это максимально возможные (для всей системы эллиптических зон генерации, показанных на рис. 3) высоты ζ_1 первых гребней волн цунами в

пунктах побережья 1 – 27. Распределения высот гребней волн вдоль берега крайне нерегулярны. Участки побережья с высоким уровнем цунамиопасности перемежаются с зонами, где высоты волн цунами относительно невелики.

Важное свойство черноморских цунами, установленное численно, следующее: максимальные подъемы уровня моря в данном пункте побережья генерируются ближайшим к пункту сейсмическим очагом. Сейсмические источники, расположенные на различных изобатах материкового склона Черноморской впадины, возбуждают волны с близкими амплитудными характеристиками, несмотря на существенное отличие глубин моря для различных очагов цунами. Это свойство эволюции волн можно объяснить конкуренцией двух факторов:

- во-первых, ослаблением двумерных волн за счет их пространственной расходимости;
- во-вторых, усилением волн за счет увеличения перепада глубин между очагом генерации цунами и шельфовой зоной.

Цунами в Азовском море. О цунами сейсмогенной природы в Азовском море практически ничего не известно [12]. В значительной степени отсутствие информации о цунами связано с практической асейсмичностью этого региона. Эпицентры исторических относительно слабых подводных землетрясений сосредоточены в южной и юго-западной частях Азовского моря [20].

Наиболее сильные землетрясения зафиксированы в 1978 и 1990 гг. в северной и южной частях моря. Глубины очагов для них составили около 33 км, а магнитуды не превысили 4,5.

Описанная выше численная модель распространения цунами в ограниченных бассейнах переменной глубины применена для анализа цунамиопасности побережья при различных положениях очага цунами в акватории Азовского моря. Численный анализ эволюции волн выполнен для 18 круговых очагов генерации *A, B, ... R* (см. рис. 5), которые достаточно равномерно распределены по акватории Азовского моря [21]. Характеристики волн анализировались по расчетным мареограммам в точках бассейна 1 – 15.

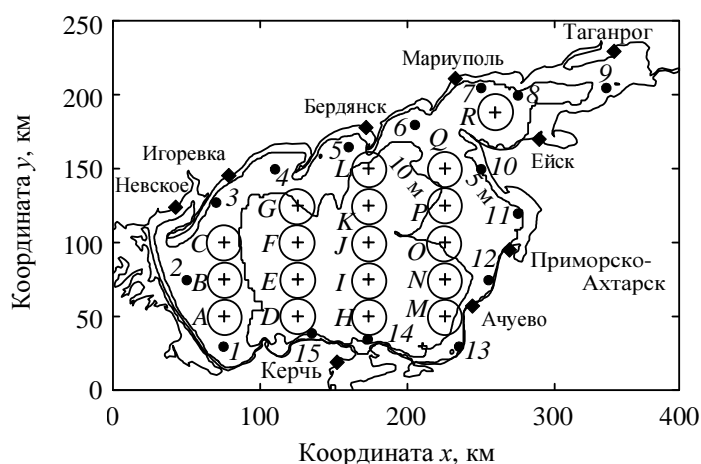


Рис. 5. Азовское море. Круговые очаги генерации цунами радиуса 12,56 км для магнитуды $M = 6,5$, использованные в вычислительных экспериментах, отмечены буквами *A, B, ... R*. Цифрами 1 – 15 обозначены точки бассейна, в которых рассчитывались колебания уровня моря.

Эволюцию цунами из очага H , расположенного у входа в Керченский пролив, иллюстрирует рис. 6. На начальной стадии формируется близкая к кольцевой знакопеременная волна (рис. 6, a). Она обладает слабой направленностью распространения (серповидная волна понижения уровня, следующая за головной волной повышения) в сторону больших глубин в центральной части моря. В последующем близкая к кольцевой головная волна цунами распространяется в сторону северного побережья (рис. 6, b). В результате отражений от берегов формируется волновое поле типа волновой толчи, охватывающее всю акваторию Азовского моря (рис. 6, $в$). Некоторое локальное усиление волнового поля происходит вблизи участков нерегулярностей береговой черты (песчаных кос вдоль северного побережья) и банки Еленина. Усиления волн в Таганрогском заливе для рассмотренного временного интервала не происходит. Аналогичный вывод следует и из расчетов эволюции начального поднятия уровня в зоне Керченского пролива, представленных в работе [22].

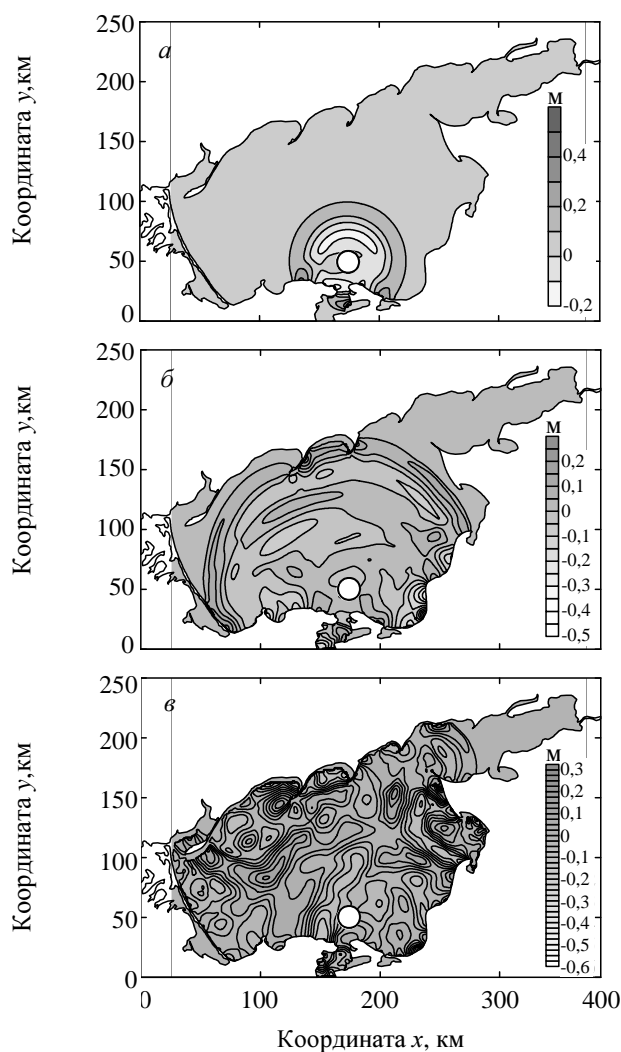


Рис. 6. Распространение волны цунами из очага H ($M = 7$):
 $a - t = 1$ ч; $b - t = 3$ ч; $в - t = 5$ ч.

По полученным оценкам вызванные землетрясениями максимальные подъемы и минимальные понижения уровня моря в различных точках побережья Азовского моря не превышают по абсолютной величине значения $0,3|a_0|$ (при магнитуде землетрясения 7). Наибольшие подъемы уровня соответствуют волнам цунами, излученным из ближайшего к пункту побережья очага генерации волн. В целом можно утверждать, что уровень цунами-опасности побережья Азовского моря не высок, а вероятность сейсмической генерации сильных цунами в этом бассейне невелика.

Цунами в Каспийском море. Освоение природных ресурсов Каспия требует изучения физико-статистических характеристик и разработки эффективных методов прогноза цунами как одного из опасных природных явлений региона. Каспийские цунами изучены недостаточно в силу низкой повторяемости событий, практического отсутствия измерений сопутствующих явлению колебаний уровня моря и малого объема даже описательной информации о цунами в регионе.

В настоящее время можно говорить о 14 исторических цунами или случаях аномальных колебаний уровня [23 – 28], годы и районы наблюдения которых показаны на рис. 7. Только для события 1962 г. имеется невыразительная мареограмма колебаний уровня моря у иранского побережья Каспия [28].

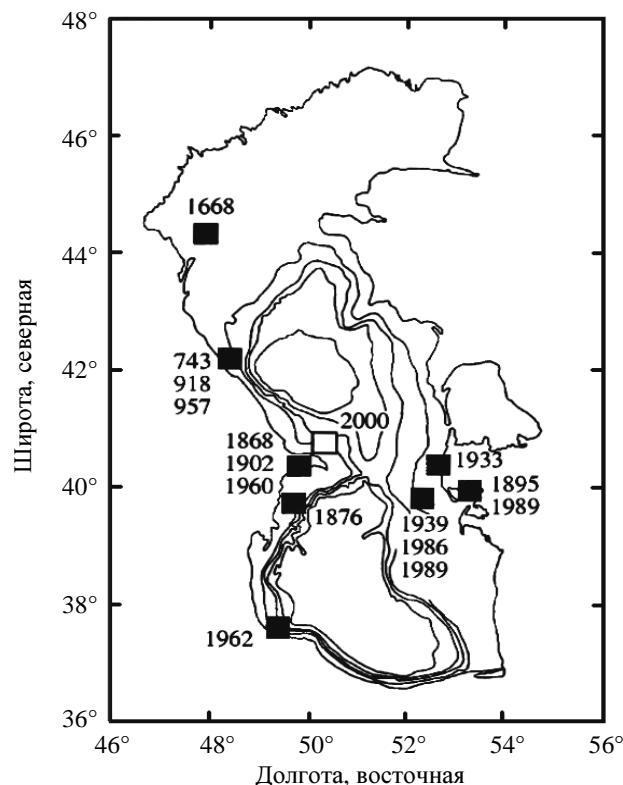


Рис. 7. Районы (■) и годы наблюдения цунами или аномальных низкочастотных колебаний уровня в бассейне Каспийского моря. Знаком □ отмечено положение сильного землетрясения, которое могло вызвать цунами.

По визуальным наблюдениям высоты исторических цунами не превысили 1 – 2 м. По оценкам работы [24], высоты каспийских цунами могут достигать 0,5 – 2,6 м. Аномальные колебания уровня моря в 743, 918, 957, 1895, 1902, 1960, 1962, 1986, 1989 и 1962 гг. наблюдались после землетрясений в море или на суше. События 1868, 1876, 1933 и 1939 гг. могли быть вызваны неизвестными местными землетрясениями, подводными оползнями, извержениями грязевых вулканов или иными источниками. Заметим здесь, однако, что по оценкам работы [24] грязевые вулканы не могут являться эффективными энергетическими источниками волн цунами.

При недостаточном для анализа каспийских цунами объеме данных натурных наблюдений особую значимость приобретает математическое моделирование явления и численное исследование возможных сценариев развития событий в регионе. Численная модель распространения цунами была применена для описания закономерностей эволюции волн из наиболее вероятных зон сейсмической генерации и оценивания высот волн у побережья Каспия в зависимости от параметров и положения сейсмического источника.

Амплитудные характеристики каспийских цунами анализировались в работах [29 – 32]. По полученным оценкам сильные землетрясения создают реальную угрозу возбуждения цунами с катастрофическими последствиями для отдельных участков побережья моря. Как следует из работ [29 – 33], можно прогнозировать сейсмическую генерацию цунами в Каспийском море в среднем один раз в 17 – 18 лет, а цунами большой интенсивности – не чаще одного раза в 60 лет.

Определяющее влияние на характер распространения цунами в Каспийском море оказывают особенности Каспийской котловины: впадины в Среднем и Южном Каспии, разделяющий их Апшеронский порог и обширные мелководные области бассейна, включая всю зону к северу от Мангышлакского порога. На глубины $H \leq 100$ м приходится около 62% всей площади моря [34].

Показано, что для всех зон генерации наблюдается эффект сильного захвата цунами шельфом, что приводит к существенному ослаблению излучения волновой энергии в открытую часть бассейна. При отражении головной волны от ближайшего берега формируются две группы волн, распространяющихся вдоль берега в противоположных направлениях от зоны наката. Наибольшему усилению подвержена вдольбереговая волна, которая направлена в область меньших глубин.

Относительно мелководный Апшеронский порог оказывает существенное влияние на динамику волн цунами. Во-первых, он выступает в роли барьера для волн цунами, распространяющихся в меридиональном направлении, и по этой причине цунами, возбужденные в Среднем Каспии, не являются опасными для Южного Каспия и наоборот. Во-вторых, порог является волноводом для цунами, что приводит к повышенному уровню цунамиопасности на примыкающих к Апшеронскому порогу участках побережья. Волноводные свойства порога демонстрирует рис. 8.

Численный анализ колебаний уровня, сопутствующих цунами, показал, что в большинстве случаев подъемы и понижения уровня моря на ближайших к зонам генерации участках шельфа не превышают по модулю высоты начального смещения поверхности моря. Относительно слабое усиление

волн при распространении к берегу может быть объяснено относительно малым перепадом глубин на разрезе от зоны генерации до ближайшего к очагу участка побережья Каспия.

При магнитуде $M = 7,5$ время распространения головной волны цунами из зон генерации (районов наблюдения исторических цунами, рис. 7) до ближайшего берега составляет 15 – 45 мин, а периоды колебаний уровня лежат в диапазоне 30 – 90 мин. Наименьшие периоды колебаний отмечены на южном участке каспийского шельфа.

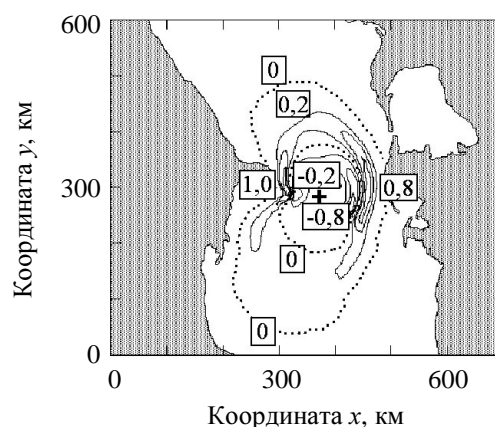


Рис. 8. Волноводное распространение цунами из зоны генерации (+) вдоль Апшеронского порога. Магнитуда подводного землетрясения $M = 7,5$. Изолинии уровня приведены для момента времени $t = 40$ мин.

Для заданных положения и ориентации продольной оси зоны генерации цунами происходит монотонное увеличение высот головных волн с ростом магнитуды землетрясения. При значениях магнитуды $M = 7; 7,5$ и 8 высоты волн на ближайших к зоне генерации участках побережья достигают соответственно значений $0,63; 2,73$ и $7,36$ м. С большой степенью уверенности можно говорить о реальной цунамиопасности для прибрежных районов подводных землетрясениях с магнитудами более $7,5$.

Заключение. Таким образом, в условиях дефицита данных наблюдений о цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях, вычислительный эксперимент становится единственным источником получения новой количественной информации об этом опасном природном явлении в этих бассейнах. Более того, численному прогнозированию отводится центральная роль в оперативном описании сценариев эволюции цунами в морских бассейнах и в определении наиболее уязвимых в условиях чрезвычайной ситуации участков морских побережий, если известны параметры сейсмических источников. По этой причине численное моделирование – неотъемлемый элемент любой региональной системы раннего предупреждения о цунами, использующей существующие в регионе распределенные сети гидрометеорологических и сейсмологических наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *First session of Intergovernmental coordination group for the tsunami early warning and mitigation system in the North-East Atlantic, the Mediterranean and connected seas (ICG/ NEAMTWS)*. Rome, Italy, 21 – 22 November, 2005 // UNESCO, IOC. – 2005. – 67 p.
2. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – 175 с.
3. *Сайт «Tsunami Laboratory»*. [Электронный ресурс]. http://tsun.sssc.ru/tsun_hp.htm (Последнее обращение 23.10.2012).
4. *Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П.* Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России. – Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. – 272 с. [Электронный ресурс]. <http://sakhgu.ru/expert/Pub/Popl/Book/Index.html> (Последнее обращение 23.10.2012).
5. *Сайт «NOAA Center for Tsunami Research»* [Электронный ресурс]. <http://nctr.pmel.noaa.gov/model.html> (Последнее обращение 23.10.2012).
6. *Куркин А.А., Зайцев А.И., Ялчинер А. и др.* Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами // Известия Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и механика. – 2004. – Том 9. – С. 88-100.
7. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Компьютерная система прогноза цунами и ее применение для цунамирайонирования побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – Вып. 24. – С. 225-234.
8. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. и др.* Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – М.: ИФЗ РАН. – 1993. – Вып. 1. – С. 99-108.
9. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
10. *Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J., Lu U.K., Synolakis C.E.* Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech. – 1995. – Vol. 302. – P. 259-285.
11. *Ranguelov B.* Tsunami vulnerability modelling for the Bulgarian Black Sea // Wat. Sci. Tech. – 1995. – Vol. 32, № 7. – P. 47-53.
12. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Известия РАН: Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 86-96.
13. *Altinok Y.* Tsunamis along the coasts of the Black Sea // Book of Abstracts, 2nd Balkan Geophys. Congr. and Exhibition., Istanbul, 5 – 9 July, 1999. – P. 46-47.
14. *Доценко С.Ф.* Оценка уровня цунамиопасности Черного моря // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 1998. – № 4. – С. 19-23.
15. *Yalçiner A., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A.* Tsunami in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Res. – 2004. – vol. 109, C12023, doi: 10.1029/2003JC002113. – 13 pp.
16. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С. 21-31.
17. *Григораш З.К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР. – Ю.-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. – Вып. 29. – С. 271-278.
18. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Спектры черноморских цунами // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 5. – С. 21-30.
19. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 1. – С. 3-15.
20. *Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е.* Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. – 1991. – № 3. – С. 14-19.

21. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Численный анализ распространения и усиления волн цунами сейсмической генерации в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 5. – С. 3-13.
22. Букатов А.Е., Завьялов Д.Д. Эволюция начального смещения свободной поверхности в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 3-11.
23. Никонов А.А. Бывают ли цунами в Каспийском море? // Природа. – 1996. – № 1. – С. 72-73.
24. Пелиновский Е.Н. Предварительные оценки цунамиопасности Каспийского моря // Н. Новгород, 1999. – 24 с. (Препринт № 480 / РАН. ИПФ).
25. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Цунами в Каспийском море: сейсмические источники и особенности распространения // Океанология. – 2000. – Том 40, № 4. – С. 509-518.
26. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Общая характеристика цунами в Каспийском море // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 3. – С. 20-31.
27. Смирнова М.Н., Бражник В.А., Керимов И.А. Использование буровых и геофизических материалов при решении задач сейсмического районирования // ГНТП России «Глобальные изменения природной среды и климата». Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – 1993. – Вып. 1. – С. 139-142.
28. Ambraseys N.N. The Buvin-Zara (Iran) earthquake of September 1962: A field report // Bull. Seism. Soc. America. – 1963. – Vol. 53, № 4. – P. 705-740.
29. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Цунами в Каспийском море: численное моделирование распространения из зон сейсмической генерации // Океанология. – 2001. – Том 41, № 3. – С. 364-369.
30. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Прогностические оценки высот волн цунами в Каспийском море // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 6. – С. 3-13.
31. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Возможные проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // Физика Земли. – 2003. – Том 39, № 4. – С. 49-55.
32. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Расчет интенсивности цунами в Каспийском море с учетом протяженности очагов подводных землетрясений // Физика Земли. – 2004. – Том 40, № 7. – С. 57-64.
33. Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря // Физика Земли. – 1999. – Том 35, № 12. – С. 76-82.
34. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия. – М.: Наука, 1986. – 262 с.

Материал поступил в редакцию 25.10.2012 г.

АНОТАЦІЯ Дано огляд досліджень про цунамі в Чорному, Азовському і Каспійському морях. Описано математичну модель прогнозу поверхневих довгих хвиль, яка найбільш широко застосовується для опису розповсюдження цунамі в обмежених басейнах змінної глибини. Дана характеристика можливостей використання моделі для раннього попередження цунамі. Наведено приклади сценаріїв розвитку цунамі в морях і розподілу максимальних висот хвиль вздовж узбережжя.

ABSTRACT A review of research on the tsunami in The Black Sea, The Sea of Azov and The Caspian Sea. The mathematical model for prediction of surface long waves, the most widely used to describe the propagation of tsunamis in closed basins of variable depth. The characteristic features of the model for early warning tsunami are given. The examples of scenarios development in the seas and tsunami distribution of maximum tsunami wave heights along the coast are presented.