

УДК 519.25

## ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ НА СРЕДИЗЕМНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЕГИПТА

© 2019 г. А. И. Зайцев<sup>1,2,\*</sup>, А. Ю. Бабейко<sup>3,\*\*</sup>, А. А. Куркин<sup>1,\*\*\*</sup>, А. Ялчинер<sup>4,\*\*\*\*</sup>,  
Е. Н. Пелиновский<sup>5-7,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>2</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН  
693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25

<sup>3</sup>Немецкий национальный Центр Наук о Земле  
14473, Потсдам, Telegrafenberg, Германия

<sup>4</sup>Ближневосточный технический университет,  
06800, Анкара, К5 здание No: K5-014, Турция

<sup>5</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>6</sup>Национальный исследовательский университет — Высшая школа экономики  
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

<sup>7</sup>Университет Южного Квинсленда

4350, Darling Heights QLD, West St, Австралия

E-mail: \*aizaytsev@mail.ru, \*\*babeyko@gfz-potsdam.de, \*\*\*aakurkin@gmail.com,

\*\*\*\*yalciner@metu.edu.tr, \*\*\*\*\*pelinovsky@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2019 г.

Принята к печати 29.05.2019 г.

Обсуждаются возможности прогнозирования характеристик цунами для районов с малой базой исторических цунами. Для этого использован метод РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment — вероятностная оценка опасности цунами), в основе которого лежит статистический анализ реальных и прогностических землетрясений, число которых достаточно велико, с последующим расчетом возможных волн цунами. Данный метод использован для оценки долговременной опасности цунами на средиземноморском побережье Египта. Показано, что предсказываемые высоты волн меняются вдоль побережья, что обусловлено неоднородностью топографии прибрежной зоны и особенностями диаграммы излучения цунами в море. Прогнозируемые высоты волн на период 1000 лет изменяются в пределах 0.8–3.4 м.

**Ключевые слова:** цунами, долговременный прогноз, метод РТНА, уравнения мелкой воды, численное моделирование распространения цунами, Средиземное море, Египет.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555594-102>

### ВВЕДЕНИЕ

Собранные каталоги цунами показывают, что в мире в среднем цунами случается примерно один раз в месяц, а катастрофическое событие — примерно раз в год. Только за последние четыре года произошло несколько крупных цунами: 16 сентября 2015 г. в Чили с высотой 10 м, 17 октября 2015 г. на Аляске с высотой до 200 м (оползневое цунами), 13 ноября 2016 г. в Новой Зеландии (5 м), 17 июня 2017 г. в Гренландии (оползневое цунами с высотой до 100 м), 20 июля 2017 г. в Турции и Греции (высота более 2 м), 8 сентября 2017 г.

в Мексике (1–2 м), 16 июля 2018 г. в Испании (метеоцунами с высотой 1.5 м), 28 сентября 2018 г. в Индонезии (11 м), 22 декабря 2018 г. в Индонезии (извержение вулкана Кракатау привело к волне 3 м высотой). Многие из этих событий сопровождались человеческими жертвами. За этот период два цунами, связанные со сходом оползня, произошли в реках России: 1 сентября 2017 г. в Баксане (1 м, погиб человек), декабрь 2018 г. на реке Бурья (40 м высоты). Несмотря на существование международной и национальных служб предупреждения о цунами, ущерб от данного стихийного бедствия весьма велик, что в не последнюю очередь свя-

зано с неточностью долгосрочных оценок высот цунами, необходимых для планирования путей эвакуации населения и строительства защитных сооружений. Первые попытки получения долгосрочных оценок проводились по аналогии с прогнозом ветровых волн, основываясь на наблюдательной статистике прошедших событий. Однако число исторических событий в конкретном пункте никогда не бывает большим (не более 30–50), так что статистика не является репрезентативной. Интересная идея объединить данные наблюдений во многих пунктах, учитывая, что большинство опасных цунами возникают от достаточно протяженных очагов землетрясения, предпринята в [1–3], где предложена так называемая двухпараметрическая схема цунами-районирования. Она была использована как для оценок опасности цунами на Дальнем Востоке в целом [4], так и для побережья Сахалинской области [5].

Тем не менее, использование только исторических данных за период в 100–200 лет (а за больший интервал практически нет количественных данных) вызывает сомнение, поскольку такие ряды не являются стационарными (в отличие от рядов наблюдений ветровых волн даже за 50 лет). Если говорить о процессах, приводящих к цунами (землетрясения, оползни, извержения вулканов), то их период повторяемости оценивается в 1000 лет и более. Хотя сильные события и достаточно редки, их последствия катастрофичны (достаточно упомянуть цунами 2004 г. в Индийском океане, унесшее около 300 тысяч жизней). Поэтому необходимо иметь оценки высот цунами на тысячи лет и использовать их для планирования мероприятий, направленных на снижение ущерба от цунами: сокращение строительства в цунамиопасной зоне, строительство защитных дамб, проектирование безопасных путей отхода и т.п. Такие оценки сейчас получают в рамках метода РТНА, в основе которого лежит статистический анализ реальных и прогностических событий, число которых достаточно велико, с последующим расчетом волн цунами от возможных источников [6, 7]. Этот подход применяется для оценки долговременной цунамиопасности многих стран, включая Россию [8, 9].

В настоящей работе обсуждается ситуация с оценкой опасности цунами для средиземноморского побережья Египта, для которого исторический материал весьма скуден. В п. 1 приведены исторические данные о проявлении цунами на побережье Египта. Краткий обзор имеющихся работ по оценке цунамиопасности

в Египте дан в п. 2. Применение метода РТНА описано в п. 3 и оценки цунамиопасности обсуждаются в п. 4. Полученные результаты суммированы в заключении.

## 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ЦУНАМИ В ЕГИПТЕ

Исторические данные о проявлении цунами на средиземноморском побережье Египта (мы не будем приводить данные о цунами в Красном море) собраны в каталоге [10] за период 4000 лет (2000 лет до нашей эры — 2000 год). Кратко перечислим здесь эти события, цитируя и другие источники:

**1. 1380 г. до н.э.** Извержение вулкана Санторин. Разрушительное цунами достигло Египта. «Вода пришла с севера, поднялся огромный поток и затопил всю страну».

**2. 365 г.** Землетрясение на Крите. Вызвало цунами в Ливии, Александрии и Малой Азии. В Александрии «вода отступила на большое расстояние, унеся корабли. А затем она перелилась через дамбу». Около 700 человек утонуло (по другим данным 5 тысяч). Подробные сведения об этом землетрясении и цунами приведены в статье [11].

**3. 746 г.** Разрушительное землетрясение в Сирии. Волны наблюдались в Ливане и Египте.

**4. 881 г.** Цунами в Палестине и Египте. В Александрии поднялась вода и унесла корабли. Вода поднялась в реке Нил и залила берега.

**5. 1034 г.** Сильное землетрясение на территории от Сирии до Египта. О волнах цунами сообщается в Израиле; скорее всего, они были и в Египте.

**6. 1068 г.** Событие, аналогичное 1034 г.

**7. 1202 г.** Сильное землетрясение в Палестине. В Египте оно ощущалось на большой площади. О цунами сообщается в Сирии, но можно предположить, что оно проявилось в Египте.

**8. 1303 г.** Катастрофическое землетрясение в восточной части Средиземного моря. Его магнитуда оценивается примерно в  $M = 8$ . Много разрушений в Каире. В Александрии подымавшаяся вода унесла французский корабль вглубь суши. На реке Нил вода затопила берега на 15 м. Много людей погибло.

**9. 1759 г.** Цунами в дельте реки Нил [12].

**10. 1863 г.** Разрушительное землетрясение на острове Родос в Эгейском море. Оно ощущалось в Александрии. Сведения о цунами вблизи Египта неопределенные.

**11. 1870 г.** Сильное землетрясение в восточной части Средиземного моря. Ощущалось в Александрии и Каире. В новом порту Александрии наблюдался всплеск воды.

**12. 1886 г.** Очень сильное землетрясение в Ионическом море. Оно ощущалось в Египте и Сирии. Волны цунами наблюдались вплоть до г. Измир (Турция).

**13. 1908 г.** Землетрясение и цунами в Мессине (Италия). Существуют свидетельства, что заметные волны цунами достигли побережья Ливии и западного берега Египта вплоть до Александрии.

Отметим, что сейчас появились прямые доказательства корреляции наблюдаемых слоев морского песка в осадочных породах на побережье Египта с катастрофическими цунами, вызванными землетрясениями 365, 1303 и 1870 гг., которые привели к затоплению в гавани Александрии [13]. Аналогичные следы цунами найдены на средиземноморском побережье Израиля [14–19], и, хотя даты несколько отличаются от приведенных ранее, можно думать, что речь идет об одних и тех же событиях, проявившихся в восточном Средиземноморье.

Инструментальные данные регистрации цунами в Египте отсутствуют, хотя в работе [20] упоминается существование мареограммы цунами в Александрии после разрушительного землетрясения 1956 г. в Эгейском море (магнитуда 7.5). Однако имеется мареограмма этого же цунами в Яффе (Израиль) с максимальной высотой 28 см; она опубликована в статье [21]. Судя по оценкам спектров мареограмм, сделанных в [20], высота волны в Александрии была меньше, так что это цунами можно отнести к незначительному.

В заключение этой краткой сводки стоит сказать, что наиболее сильные цунами на побережье Египта связаны с удаленными событиями, главным образом происходящими в Греции (землетрясения и извержение вулкана).

Итак, всего существует 14 событий цунами за период около 4000 лет, что позволяет дать верхний предел периода повторяемости волн цунами в 300 лет. Видно, однако, что имеющаяся база данных очень неполна и, скорее всего, в ней много пропусков. Тем не менее, ряд событий (1380 г. до н.э., 365, 881, 1303) свидетельствуют о больших цунами в этом районе. По оценкам, данным в каталоге [10], интенсивность цунами сейсмических событий (365, 881 и 1303 годов)

составляет не менее  $I = 3$ , что в соответствии с формулой Соловьева [22, 23]

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H \quad (1)$$

дает высоту цунами  $H$  в 6 и более метров. Даже если считать, что таких событий было всего три за 2000 лет, то получается, что примерно раз в 600–700 лет может быть разрушительное цунами с высотой более 6 м. Если говорить о наиболее сильных землетрясениях и цунами в 365 и 1303 гг., то их повторяемость получается раз в 1000 лет. Очевидно, что опасностью цунами в таких условиях нельзя пренебрегать.

## 2. СДЕЛАННЫЕ РАНЕЕ ОЦЕНКИ ЦУНАМИОПАСНОСТИ В ЕГИПТЕ

В настоящее время опубликовано большое количество статей по цунами в Средиземном море, где изучаются конкретные события и обсуждаются цунамигенные зоны, связанные с сейсмической, оползневой и вулканической активностью. Во многих из них Египет упоминается вскользь, и нужную информацию не всегда легко добыть. Особо отметим обзорную статью [24], в которой обсуждаются все вопросы, связанные с геофизикой волн цунами в Средиземном море. Приведем здесь карту цунамигенных зон в Средиземном море, взятую из работы [25], которая важна для понимания опасности цунами в Египте (рис. 1). Как видно, наиболее цунамигенная зона находится в Греции, она достаточно далека от Египта и экранируется островом Крит. Поэтому волны цунами, приходящие из этой зоны, будут по высоте сравнимы с волнами, приходящими из менее интенсивных, но более близких зон. Наиболее опасные для Египта очаги цунами находятся около Крита с его двух сторон; эти зоны достаточно интенсивны и близки по рас-



**Рис. 1.** Цунамигенные зоны в Средиземном море, опасные для Египта (взято из [25], воспроизведено с разрешения the Coastal Education and Research Foundation, Inc).

стоянию к Египту. Именно там и находились очаги цунами 365 и 1303 гг., о которых мы уже упоминали.

Специальные исследования опасности цунами в Египте фактически еще не проводились. Опубликовано немного статей, где рассматривались цунами именно в Египте. В первой из них, относительно старой работе [26], проведено численное моделирование цунами 1303 г. с оценкой распределения высот цунами вдоль побережья Египта. Мы уже приводили выше описание этого катастрофического события. Автором выбран очаг цунами, локализованный вблизи острова Крит. Магнитуда землетрясения оценивается в  $M \sim 8$ . Не приводя здесь деталей расчетов, выполненных в этой работе, укажем максимальное значение высоты цунами, полученное для восточной части Египетского побережья ( $H = 9$  м), и минимальное — около  $H = 2$  м для его западной части. Непосредственно в Александрии расчетная высота волны невелика ( $H = 2-2.5$  м). Аналогичный расчет этого цунами выполнен в [27] для разных сценариев развития сейсмического процесса. В отличие от работы [26], распределение высот волн здесь обратное, и максимальные высоты (более 7 м) получены для западной части побережья. В восточной части Египта высоты волн около 1–2 м. Уже этот разброс в результатах демонстрирует всю сложность моделирования цунами, когда характеристики землетрясения неизвестны. Для полноты картины отметим также, что высоты цунами в некоторых пунктах Египта (Александрия и Порт-Саид) рассчитаны в работах [12, 28], посвященных оценке опасности цунами для Израиля.

В работе [29] исследовалось возможное цунами, связанное с возникновением *оползня* в дельте реки Нил. В этом районе обнаружены следы многих оползней с объемом до 500 куб. км и толщиной 10–70 м. Авторы выбрали один из таких случаев, предположив объем оползня в 41 куб. км. Рассчитанное распределение высот волн цунами вдоль побережья Египта крайне неравномерно и максимальная высота волна оценивается в 7 м, а скорости течения — в 5 м/с (в ближней зоне). Такое цунами носило бы катастрофические последствия. Отметим, что оно будет распространяться вдоль побережья Египта в виде краевых волн, и, в частности, высота его вблизи границы с Ливией окажется достаточно велика (6 м).

Что же касается цунами *вулканического происхождения*, случившегося в 1380 г. до н.э.

при извержении вулкана Санторин, то геологические следы этого цунами обнаружены во многих местах Восточного Средиземноморья, и, в частности, в Израиле высота цунами достигала 7 м [15]. К сожалению, имеющиеся расчеты волн цунами были ориентированы на проверку механизма генерации волн цунами, поэтому расчетная область находилась внутри Эгейского моря [30, 31], так что пока еще нет надежных оценок волн цунами вулканического происхождения на побережье Египта.

### 3. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОТ ЦУНАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РТНА

Из приведенных ранее данных видно, что как исторические данные, так и результаты моделирования конкретных событий мало пригодны для долговременных оценок цунами на побережье Египта. Именно поэтому мы использовали метод РТНА, в основе которого лежит статистический анализ возможных цунамигенных землетрясений, число которых достаточно велико, с последующим расчетом волн цунами от них [6, 7]. Такой анализ уже выполнен для Средиземного моря в целом [32]. Именно этот анализ будет использован в наших исследованиях.

Для вероятностных оценок в [32] выбраны только цунами сейсмического происхождения, учитывая большой объем данных о возможных землетрясениях. Каталог землетрясений за последние 1000 лет для Средиземного моря приведен в [33]. Он использован в [32] для создания синтетического каталога потенциальных цунамигенных землетрясений на последующие 100 тысяч лет. В нем сохраняются те же распределения магнитуд и механизмов очага, как и в каталогах реальных событий. Синтетический каталог содержит около 85000 землетрясений с магнитудой  $M > 6.5$  на период 100 000 лет. Пространственное распределение землетрясений за период в 10 000 лет показано в статье [32], оно демонстрирует, что очаги цунами полностью покрывают Эгейское море и многие из них расположены близко к Египту.

Моделирование цунами для каждого случая в цитированной работе выполнено в рамках теории мелкой воды с использованием батиметрии GEBCO\_08, переформатированной к разрешению 2 угловые минуты (около 3.6 км). Расчеты ведутся до изобаты в 50–100 м. Последние морские точки маркируются, начиная с Ливии

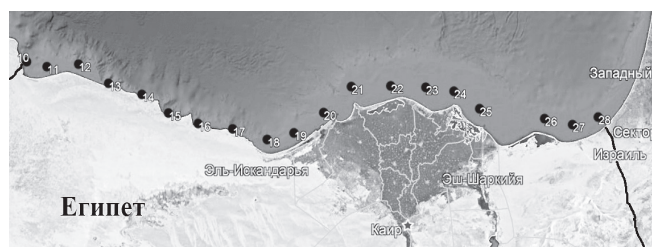


Рис. 2. Карта побережья Египта с маркировкой последних морских точек.

(с Бенгази) и до Израиля (южнее Тель-Авива); всего 30 точек, из них точки 10–28 приходятся на Египетское побережье; они показаны на карте (рис. 2).

Затем высоты волн пересчитываются на берег с помощью известного закона Грина [22]

$$H_R = H_{sea} \left[ \frac{h_{sea}}{h_R} \right]^{1/4}, \quad (2)$$

где  $H_{sea}$  — амплитуда волны в морской точке на глубине  $h_{sea}$ , получаемая из численных расчетов по уравнениям мелкой воды, а  $H_R$  отождествляется с высотой наката волны на берег; величина  $h_R$  берется равной 1 м. Коэффициент усиления волны в береговой зоне при перепаде глубин от 80 до 1 м составляет примерно 3. Значения  $H_R$  и отождествляются с высотами наката волн цунами на побережье.

Далее использован рассчитанный в [32] банк высот наката цунами вдоль побережья Египта. Число рассчитанных высот волн, превышающих 1 мм, в каждой точке находится в пределах 50–40 тысяч. Это достаточно представительный объем данных для получения статистически значимых результатов. Разумеется, использованная батиметрия достаточно груба, также возникают вопросы о правомочности использования формулы Грина (2), однако проведение большого объема расчетов на более точных сетках (около 100 000) требует очень большого времени, поэтому фактически получаемые оценки опасности цунами являются грубыми. Отметим лишь, что некоторые сценарии наиболее опасных цунами пересчитаны нами с помощью метода вложенных сеток; они использовались для оценок опасности цунами в районе АЭС «Эль-Дабаа», сооружаемой российскими специалистами [34]. Они дают более точное распределение высот волн вдоль побережья, но если затем произвести усреднение с пространственным масштабом около 4 км, то получаемые значения оказываются близкими к вероятностным оценкам, используемым в данной работе.

#### 4. ЧАСТОТЫ ПОВТОРЯЕМОСТИ ВЫСОТ ЦУНАМИ ВДОЛЬ ПОБЕРЕЖЬЯ ЕГИПТА

Частота повторяемости цунами (exceedance or cumulative frequency)  $f$  определяется по стандартной формуле, как число событий с высотой, превышающей заданное значение, деленное на временной интервал (в нашем случае 100 000 лет). Рассчитанные частоты повторяемости для нескольких точек побережья (см. рис. 2) показаны на рис. 3 в полулогарифмических координатах.

Для аппроксимации кривых частоты повторяемости применимы методы экстремальной статистики, в частности, подходящей аппроксимацией является экспоненциальная кривая (распределение Гумбеля первого типа)

$$f(H) = f_0 \exp(-H / H_0), \quad (3)$$

где частота повторяемости измеряется в 1/г., а высоты — в метрах. Для нахождения коэффициентов в формуле (3) использован интервал 1–10 м (они даны в подписи на рис. 3). Коэффициент корреляции, как правило, очень высок, например, для точки 17 он равен  $R^2 = 0.985$ . Как видим, параметры распределения меняются от пункта к пункту, и эта изменчивость показана на рис. 4. В западной части побережья (Ливия и запад Египта) частота повторяемости сильных цунами более высокая, чем в восточной, что, по-видимому, обусловлено наличием двух зон генерации цунами в Греции и Италии. Характерные высоты цунами также больше в западной части, чем в восточной. Эта изменчивость связана как с неоднородной топографией прибрежной зоны, так и с диаграммой направленности цунами из очагов.

Для сравнения укажем, что в двухпараметрической схеме цунамирайонирования, применяемой для Дальнего Востока России [4], изменчивость параметра  $f_0$ , характеризующего частоту повторяемости цунамигенных землетрясений, оказывается слабее, чем  $H_0$ , что связано с преимущественно одной зоной генерации цунами, расположенной в Курило-Камчатском желобе. В Египте же накладываются разные зоны генерации цунами, что и приводит к сильной изменчивости частоты повторяемости землетрясений. Любопытно, что эти две характеристики связаны между собой (рис. 5) с хорошим коэффициентом

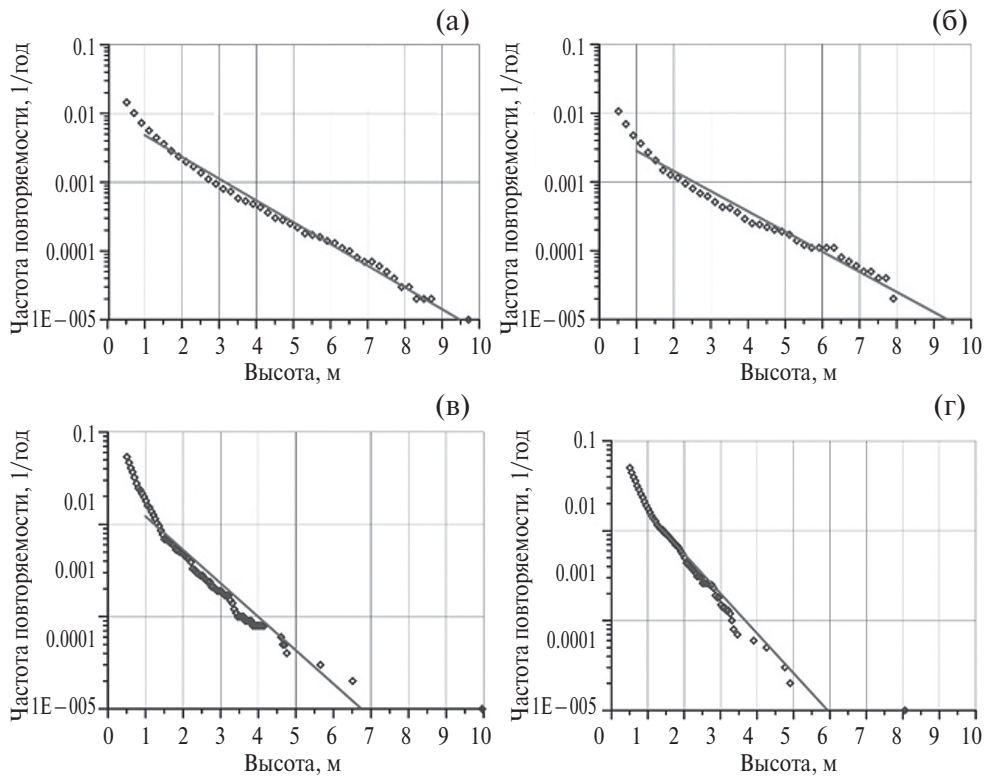


Рис. 3. Частоты повторяемости цунами с высотой 1–10 м: (а) — точка 10 (— - аппроксимирующая кривая (3) ( $f_0 = 0.01$  1/год,  $H_0 = 1.37$  м)); (б) — точка 17 (— - аппроксимирующая кривая (3) ( $f_0 = 0.006$  1/год,  $H_0 = 1.48$  м)); (в) — точка 22 (— - аппроксимирующая кривая (3) ( $f_0 = 0.003$  1/год,  $H_0 = 1.2$  м)); (г) — точка 27 (— - аппроксимирующая кривая (3) ( $f_0 = 0.004$  1/год,  $H_0 = 0.98$  м)).

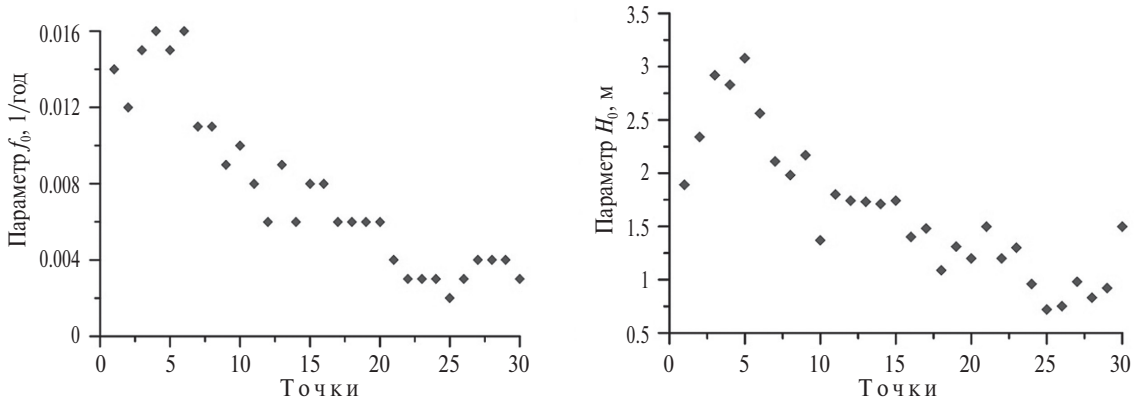


Рис. 4. Изменчивость параметров экспоненциального распределения (3) вдоль побережья Египта.

регрессии ( $R^2 = 0.8$ ), и регрессионная кривая имеет вид

$$f_0 = 0.006H_0 - 0.002. \quad (4)$$

Предполагая, что частота появления цунами описывается пуассоновской статистикой, можно оценить ожидаемую максимальную высоту цунами на Египетском побережье за любой интервал времени [2, 3]

$$H_T = H_0 \ln(f_0 T), \quad (5)$$

где время измеряется в годах. В частности, на рис. 6 показано распределение ожидаемых высот

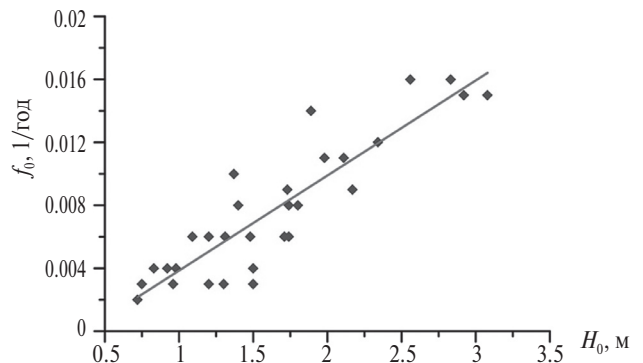


Рис. 5. Связь параметров экспоненциального распределения (3) (— - регрессионная кривая (4)).

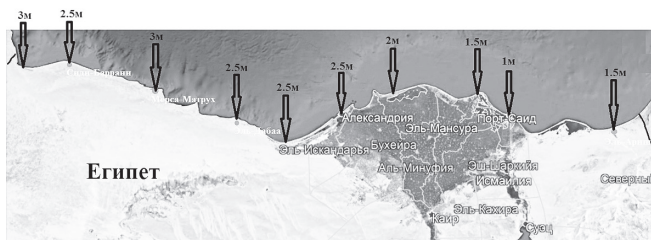


Рис. 6. Распределение ожидаемых высот цунами на период в 1000 лет вдоль побережья Египта согласно выражению (5) и полученным параметрам распределения Гумбеля.

цунами вдоль побережья Египта на период в 1000 лет. В целом, предсказываемые высоты волн лежат в диапазоне 0.8–3.5 м (на рис. 6 показаны значения высот вблизи только населенных пунктов). Среднее значение предсказываемой высоты волны цунами на период в 1000 лет равно  $H_{1000} = 2$  м со среднеквадратичным отклонением в 0.8 м. Как и ожидалось, высоты волн в западной части побережья Египта больше, чем на восточном побережье. В исторических же хрониках обычно отмечается Александрия и другие хорошо заселенные места в восточной части Египта. Судя по описаниям, высоты волн (около 4–6 м) должны превышать рассчитанные значения примерно в два раза. Возможно, такое несоответствие, связано с сильным изменением береговой линии из-за близости устья реки Нил за прошедшие 2000 лет и нуждается в дальнейшем исследовании. Кроме того, необходимо рассчитать карты заливания г. Александрии, где, вероятно, есть зоны фокусировки волновой энергии. Отметим лишь, что прогностические высоты волн в Александрии находятся в согласии с рассчитанными в [26, 27] для сильнейших цунами 365 и 1303 гг. в сущности для той же батиметрии (1–2.5 м). Таким образом, наши расчеты находятся в согласии с грубыми оценками повторяемости цунами, основанными на исторических данных и результатах расчетов наиболее сильных цунами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простой анализ наблюдений цунами в Египте за всю его историю свидетельствует, как минимум, о четырех случаях цунами сейсмического происхождения, из которых два (365 и 1303 гг.) были весьма катастрофическими с высотами волн до 6 м. Грубо повторяемость таких цунами оценивается в 1000 лет. Используя банк прогностических высот цунами в Средиземном море, описанный в [32], нами выполнен вероятностный анализ повторяемости цунами для тридцати пунктов на побережье Египта и при-

легающей территории, часть из них представлена ранее. Показано, что параметры кривых «частота повторяемости – высота» меняются от пункта к пункту, что обусловливается различиями в топографии прибрежной зоны и особенностями излучения цунами в очагах. Используя полученные регрессионные зависимости, можно выполнить расчет возможных высот волн в этих пунктах на любой интервал времени. Результаты расчетов для периода в 1000 лет суммированы в статье, в частности, в среднем высота цунами равна  $H_{1000} = 2 \pm 0.8$  м. Отметим, что прогностические высоты волн в г. Александрия (2.5 м) находятся в согласии с рассчитанными в [26, 27] для сильнейших событий 365 и 1303 гг. (1–2.5 м). Таким образом, наши расчеты находятся в согласии с грубыми оценками повторяемости цунами, основанными на исторических данных, и результатами расчетов наиболее катастрофических цунами.

В заключение следует сказать, что прогностические высоты волн характеризуют средние оценки на интервале примерно 3–4 км. Более точные оценки необходимо сделать для отдельных пунктов с учетом детальной батиметрии морского дна и современной топографии суши. Кроме того, необходимо учитывать вариации параметров прогностических землетрясений, добавляющих неопределенность в прогностические высоты; такие работы сейчас делаются для Средиземного моря [35]. Наконец, необходим детальный анализ цунами оползневоего и вулканического происхождения, который пока отсутствует.

**Источники финансирования.** Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задания № 5.4568.2017/6.7 и № 5.5176.2017/8.9), а также при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и грантов РФФИ (17-05-00067 и 18-0580018).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Go Ch.N., Kaistrenko V.M., Simonov K.V. A two-parameter scheme for tsunami hazard zoning // Marine Geodesy. 1985. V. 9. № 44. P. 469–476.
2. Kaistrenko V. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast // Pure and Applied Geophysics. 2011. V. 168. P. 2065–2069.
3. Kaistrenko V. Tsunami recurrence function: structure, methods of creation, and application for tsunami hazard estimates // Pure and Applied Geophysics. 2014. V. 171. P. 3527–3538.

4. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности Тихоокеанского побережья СССР // Тихоокеанский ежегодник. 1988. С. 9–17.
5. Кайстренко В.М., Клячко М.А., Храмушин В.Н., Золотухин Д.Е. Оценка цунамиопасности и построение карт цунамирайонирования для побережья Сахалинской области. Проблема нормативов // Строительная индустрия Сахалина. 2014. № 19. С. 38–43.
6. Geist E.L., Parsons T. Probabilistic analysis of tsunami hazards // Natural Hazards. 2006. V. 37. P. 277–314.
7. Grezio A., Babeyko A., Baptista M.A., Behrens J., Costa A., Davies G., Geist E.L., Glimsdal S., González F.I., Griffin J., Harbitz C.B., LeVeque R.J., Lorito S., Løvholt F., Omira R., Mueller Ch., Paris R., Parsons T., Polet J., Power W., Selva J., Sørensen M.B., Thio H.K. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple sources and global applications // Reviews of Geophysics. 2017. V. 55. P. 1158–1198.
8. Кихтенко В.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Модели, алгоритмы и технологии построения обзорных карт вероятностного цунамирайонирования Дальневосточного побережья России в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 55–72.
9. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 5. С. 578–590.
10. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С., Соловьева О.Н., Щетников Н.А. Цунами в Средиземном море 2000 г. до нашей эры. М.: Межведомственный геофизический комитет, 1997. 139 с.
11. Pararas-Carayannis G. The earthquake and tsunami of July 21, 365 AD in the Eastern Mediterranean Sea – Review of impact on the ancient world – Assessment of recurrence and future impact // Science of Tsunami Hazards. 2011. V. 30. P. 253–292.
12. Salamon A., Rockwell Th., Ward S.N., Guidoboni E., Comastri A. Tsunami hazard evaluation of the Eastern Mediterranean: historical analysis and selected modeling // Bulletin of the Seismological Society of America. 2007. V. 97. P. 705–724.
13. Salama A., Meghraoui M., El Gabry M., Maouche S., Hussein H., Korrat I. Paleotsunami deposits along the coast of Egypt correlate with historical earthquake records of eastern Mediterranean // Geophysical Research Abstracts. 2017. V. 19. P. EGU2017–4148–1.
14. Reinhardt E.G., Goodman B.N., Boyce J.I., Lopez G., van Hengstum P., Rink W.J., Mart Y., Raban A. The tsunami of 13 December A.D. 115 and the destruction of Herod the Great's harbor at Caesarea Maritima, Israel // Geology. 2006. V. 34. № 12. P. 1061–1064.
15. Goodman-Tchernov B.N., Dey H.W., Reinhardt E.G., McCoy F., Mart Y. Tsunami waves generated by the Santorini eruption reached Eastern Mediterranean shores // Geology. 2009. V. 37. P. 943–946.
16. Dey H., Goodman-Tchernov B., Sharvit J. Archaeological evidence for the tsunami of January 18, A.D. 749: a chapter in the history of Early Islamic Qaysariyah (Caesarea Maritima) // Journal of Roman Archaeology. 2014. V. 27. P. 357–373.
17. Goodman-Tchernov B.N., Austin Jr. J.A. Deterioration of Israel's Caesarea Maritima's ancient harbor linked to repeated tsunami events identified in geophysical mapping of offshore stratigraphy // Journal of Archaeological Science: Reports. 2015. V. 3. P. 444–454.
18. Hoffmann N., Master D., Goodman-Tchernov B. Possible tsunami inundation identified amongst 4–5th century BCE archaeological deposits at Tel Ashkelon, Israel // Marine Geology. 2018. V. 396. P. 150–159.
19. Tyuleneva N., Braun Y., Katz T., Suchkov I., Goodman-Tchernov B. A new chalcolithic-era tsunami event identified in the offshore sedimentary record of Jisr al-Zarka (Israel) // Marine Geology. 2018. V. 396. P. 67–78.
20. Van Dorn W.G. Tide gage response to tsunamis. Pt. II: other oceans and smaller seas // Journal of Physical Oceanography. 1987. V. 17. P. 1507–1516.
21. Beisel S., Chubarov L., Didenkulova I., Kit E., Levin A., Pelinovsky E., Shokin Y., Sladkevich M. The 1956 Greek tsunami recorded at Yafo, Israel, and its numerical modeling // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2009. V. 114. Iss. 9. P. C09002.
22. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
23. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
24. Papadopoulos G.A., Gràcia E., Urgeles R., Sallares V., De Martini P.M., Pantosti D., González M., Yalciner A.C., Mascle J., Sakellariou D., Salamon A., Tinti S., Karastathis V., Fokaefs A., Camerlenghi A., Novikova T., Papageorgiou A. Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts // Marine Geology. 2014. V. 354. P. 81–109.
25. Finkl C.W., Pelinovsky E., Cathcart R.B. A review of potential tsunami impacts to the Suez Canal // Journal of Coastal Research. 2012. V. 28. № 4. P. 745–759.
26. Hamouda A. Numerical computations of 1303 tsunamigenic propagation towards Alexandria, Egyptian Coast // Journal of African Earth Sciences. 2006. V. 44. P. 37–44.
27. Lobkovsky L., Mazova R., Tyuntyaev S., Remizov I. Features and problems with historical great earthquakes and tsunamis in the Mediterranean Sea // Science of Tsunami Hazards. 2016. V. 35. Iss. 3. P. 167–188.
28. Tobias J., Stiassnie M. Synthetic tsunamis along the Israeli coast // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012. V. 370. P. 1677–1686.
29. Yalciner A.C., Zaytsev A., Aytore B., Insel I., Heidarzadeh M., Kian R., Imamura F. A possible submarine landslide and associated tsunami at the Northwest



- Nile Delta, Mediterranean Sea // *Oceanography*. 2014. V. 27. № 2. P. 68–75.
30. Novikova T., Papadopoulos G.A., McCoy F.W. Modeling of tsunami generated by the giant Late Bronze Age eruption of Thera, South Aegean Sea, Greece. *Geophysical Journal International*. 2011. V. 186. P. 665–680.
31. Nomikou P., Druitt T.H., Hübscher C., Mather T.A., Pualatto M., Kalnins L.M., Kelfoun K., Papanikolaou D., Bejelou K., Lampridou D., Pyle D.M., Carey S., Watts A.B., Weiß B., Parks M.M. Post-eruptive flooding of Santorini caldera and implications for tsunami generation // *Nature Communications*. 2016. V. 7. P. 13332.
32. Sorensen M.B., Spada M., Babeyko A., Wiemer S., Grünthal G. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012. V. 117. P. B01305.
33. Grünthal G., Wahlström R. The European-Mediterranean earthquake catalogue (EMEC) for the last millennium // *Journal of Seismology*. 2012. V. 16. P. 535–570.
34. Зайцев А.И., Дмитриев С.М., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Вероятностная оценка опасности цунами на побережье Египта в районе возводимой АЭС «Эль-Дабба» // *Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), сер. «Математическое моделирование физических процессов»*. 2019. № 2. С. 81–89.
35. Molinari I., Tonini R., Lorito S., Piatanesi A., Romano F., Melini D., Hoechner A., González Vida J.M., Maciás J., Castro M.J., de la Asunción M. Fast evaluation of tsunami scenarios: uncertainty assessment for a Mediterranean Sea database // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016. V. 16. P. 2593–2602.

## Tsunami Hazard Assessment at Mediterranean Coast of Egypt

A. I. Zaytsev<sup>1,2,\*</sup>, A. Yu. Babeyko<sup>3,\*\*</sup>, A. A. Kurkin<sup>1,\*\*\*</sup>, A. Yalciner<sup>4,\*\*\*\*</sup>, E. N. Pelinovsky<sup>5-7,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

<sup>2</sup>*Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of RAS  
Gorky St., 25, Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia*

<sup>3</sup>*GFZ German Research Centre for Geosciences  
Telegrafenberg, Potsdam, 14473, Germany*

<sup>4</sup>*Middle East Technical University*

*K5 Building No:K5-014, Ankara, 06800, Turkey*

<sup>5</sup>*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the RAS  
Ul'yanov St. 46, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

<sup>6</sup>*National Research University – Higher School of Economics  
Myasnitskaya St., 20, 101000, Moscow, Russia*

<sup>7</sup>*University of Southern Queensland*

*4350, Darling Heights QLD, West St, Australia*

*E-mail: \*aizaytsev@mail.ru, \*\*babeyko@gfz-potsdam.de, \*\*\*aakurkin@gmail.com,  
\*\*\*\*yalciner@metu.edu.tr, \*\*\*\*\*pelinovsky@gmail.com*

Received: 20.03.2019

Accepted: 29.05.2019

Possibilities of forecasting of a tsunami characteristics for areas with small base of historical tsunami are discussed. The PTHA method (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), which cornerstone the statistical analysis of real and predictive earthquakes which number is rather big, with the subsequent calculation of waves of a Tsunami from possible earthquakes is for this purpose used. This method for assessment of long-term tsunami danger on the Mediterranean coast of Egypt is used. It is shown that the predicted wave heights change along the coast that is caused by heterogeneity of topography of a coastal zone and features of the chart of radiation of a tsunami in the sea. The predicted wave heights for 1000 years change within 0.8–3.4 m.

**Keywords:** tsunami, long-term forecast, PTHA method, shallow-water equations, numerical modelling of tsunami propagation, Mediterranean, Egypt.