

## ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Куликов Е.А.<sup>1</sup>, Медведева А.Ю.<sup>1</sup>, Файн И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, Москва, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: kulikove@gmail.com*

<sup>2</sup> *Институт океанских наук, Сидни, V8L 5T5, Канада*

Статья поступила в редакцию 10.03.2019, одобрена к печати 13.12.2019

В статье представлена оценка опасности цунами для побережья Каспийского моря, в частности для Апшеронского п-ова. В связи с высокой социально-экономической нагрузкой на побережье этого региона для объектов электроэнергетики и нефтедобычи необходимо учитывать риски даже для таких исключительно редких природных явлений, как цунами. Землетрясение с  $M = 8 \pm 0.2$  может произойти во всем регионе Каспийского моря, включая сушу, один раз в 216 лет, тогда как для акватории период повторяемости подобного события составляет 1620 лет. В статье представлены результаты оценки опасности цунами на основе детерминистского подхода для Апшеронского п-ова. Этот подход к оценке цунамиопасности произвольного участка побережья состоит в выборе сильнейших наблюдаемых (или гипотетических) событий цунами из ближней окрестности участка и из дальней зоны, последующей оценке параметров для модельных источников и, наконец, численного моделирования процессов генерации и распространения цунами от этих источников. Было получено, что при распространении волн цунами с севера на побережье Апшеронского п-ова их высота может достигать для отдельных участков 3–4 м с дальностью затопления 500–1500 м.

**Ключевые слова:** Каспийское море, цунами, численная модель, накат волны, землетрясение, сейсмичность, цунамиопасность, TUNAMI

### Введение

Социально-экономическое развитие стран Каспийского региона в значительной степени связывают с разработкой месторождений нефти и газа, рыбным промыслом и морским транспортным сообщением в акватории Каспийского моря. Из-за повышенных требований к обеспечению безопасности населения, экологической и промышленной безопасности региона, его прибрежной и морской инфраструктуры особое значение при хозяйственном освоении приобретают научные исследования опасных природных явлений в том числе таких как землетрясения и цунами. При этом наиболее «чувствительной» отраслью с точки зрения экологической безопасности в Каспийском море является добыча полезных ископаемых. Объекты ТЭК на шельфе с учетом их высокой стоимости и вероятного аварийного воздействия на окружающую среду требуют серьезной оценки возможных рисков. Пример аварии в Мексиканском заливе на буровой платформе «Deerwater Horizon», произошедшей 20 апреля 2010 г., подтверждает это. Трагедия унесла жизни 11 человек, серьезно

пострадало побережье Мексиканского залива, был нанесен огромный ущерб окружающей среде. Современный подход к анализу рисков экологических катастроф и технических аварий предполагает оценку вероятности возникновения экстремальных природных воздействий редкой повторяемости. Сегодня она является необходимым этапом изыскательских работ при проектировании и строительстве в прибрежной области и в зоне морского шельфа. В зависимости от типа объекта строительства (портовые сооружения, буровые платформы, трубопроводы, транспортные терминалы и др.) требования к такого рода оценкам могут сильно отличаться. Наиболее жесткие критерии безопасности сформулированы для объектов атомной промышленности. Например, согласно требованиям Общих положений обеспечения безопасности атомных станций НП–064–17 (см. НП–064–17), при проектировании и строительстве АЭС подлежат учету все природные воздействия с частотой возникновения более  $10^{-4}$  в год. В г. Актау (Казахстан) функционировала в 1972–1997 гг. Мангышлакская АЭС. На данный момент реактор находится в стадии вывода из эксплуатации, однако периодически в прессе проскальзывают сообщения о строительстве вблизи нового. Высокая сейсмическая активность – это один из наиболее опасных факторов, приводящих к техногенным катастрофам: например, самая сильная ядерная катастрофа в истории человечества – это авария на атомной электростанции «Фукусима», возникшая в результате сильнейшего землетрясения и цунами вблизи о-ва Хонсю 11 марта 2011 г. и возможная из-за недооценки возможной высоты цунами. Таким образом, изучение и оценка вероятности цунами в Каспии является актуальной и важнейшей задачей.

К редким опасным событиям относятся волны цунами, возникающие в результате сильных подводных землетрясений, схода оползней, вулканической деятельности и др. Известно, что цунами приобретает наиболее разрушительный характер вблизи берега и на мелководье. При этом воздействие волны может заключаться в факторе внезапного повышения уровня моря, приводящего к затоплению береговой зоны и возникновению сильных течений, создающих напор воды, превышающий предельные экстремальные нагрузки на береговые сооружения и морские конструкции.

В настоящей работе обсуждается проблема оценки цунамиопасности на побережье Каспия и рассматривается сценарный подход, основанный на численном моделировании генерации и распространения волн цунами.

### **Цунами в Каспийском море**

Каспийское море – это регион с относительно высокой сейсмической активностью, определяемой геотектоническими процессами. Его можно условно разделить на северную, центральную и южную части, две последних отделены от Северного Каспия Челекен-Апшеронским порогом, которому присуща высокая сейсмическая активность (Куликов и др., 2014а). Это зона субдукции, где происходит погружение южной части Каспия (Альпийских структур) под северную

Скифско-Туранскую плиту (Kadirov, Gadirov, 2014). Это проявляется в глубоких мантийных землетрясениях с магнитудами  $M = 4.5-6.5$ . Другой важнейший процесс – это меридиональное прогибание Каспийской депрессии из-за ее несогласного простирания по отношению к ориентации структур Альпийско-Гималайской складчатости. Этот процесс обуславливает возникновение уже более сильных и менее глубоких землетрясений с магнитудами более 6.5. Подробно расположение линеаментов, разломов и детальное описание сейсмичности региона представлено в (Стогний, Стогний, 2017; Гатинский и др., 2018; Slavina et al., 2018; Dotsenko et al., 2002; Уломов и др., 1999). В статье (Доценко и др., 2003) установлена феноменологическая связь районов возникновения цунами с областями повышенной сейсмичности в пределах Центрального Каспия. В результате математического моделирования распространения цунами в рамках лучевой модели установлено явление сильного захвата цунами шельфовой зоной для случаев возникновения сильных землетрясений в прибрежной зоне (Доценко и др., 2003). Это объясняет локальный характер проявления цунами, подтверждаемый описательной информацией по историческим цунами.

Наиболее сильные землетрясения, произошедшие в Каспийском регионе, – это: Красноводское (Туркмения) – 08.07.1895 г. с  $M = 8 \pm 0.2$  (по макросейсмическим данным) и Рудбарское (Иран) 20.06.1990 г. с  $M_w = 7.4$  (USGS). Также мощные землетрясения, произошедшие на суше и не затронувшие водную толщу, в данном районе – это Туркменские землетрясения 06.12.2000 г. с  $M_w = 7$  и 01.05.1929 г. с  $M_w = 7.2$ , Казанджикское 04.11.1946 г. с  $M_w = 6.9$  (USGS). Моделирование очагов Рудбарского и Красноводского землетрясений и связанных с ними цунами было проведено в исследовании (Pérgañez, Cortés, 2018), максимальные высоты волн составили 1.5 м для случая Красноводска и всего 3 см для северного Ирана, поскольку очаг располагался на суше, глубина источника составила 18.4 км. Механизм Рудбарского землетрясения детально описан в (Salaree, Okal, 2015). Землетрясения южного Каспия были детально изучены в статье (Jackson et al., 2002).

В настоящее время есть сведения о 14-ти исторических цунами или случаях аномальных колебаний уровня моря (высота волн не превышала 1–2 м) (Доценко и др., 2000, 2001; Никонов, 1996; Пелиновский, 1999; Смирнова и др., 1993; Соловьева и др., 2004). В 743, 918 гг. в районе Дербента было отмечено погружение в море участка берега с крепостной стеной. В 957 г. также в районе Дербента наблюдался отлив со смещением уреза воды на 150 м от обычного положения. 26.04.1868 г. в районе Баку были зафиксированы кратковременные подъемы уровня моря на 0.45 м; 31.12.1902 г. в том же районе после катастрофического землетрясения на суше, поразившего г. Шемаху и его окрестности, возникло аномальное волнение, приведшее в движение суда на рейде. 26.04.1960 г. вблизи Баку уровень моря понижался и повышался более чем на 1 м продолжительностью 2–3 ч и менее. У о. Обливной 09.03.1876 г. с судна были отмечены аномальные колебания моря при полном штиле после сильного подводного гула. В Красноводском заливе 27.06.1895 г. в результате землетрясения уровень воды сильно поднялся, произошло

затопление северной и западной частей Узун-Ада, волны большой высоты привели к затоплению построек и пристани. Несколько домов снесло в море, разрушен нефтепровод. 16.09.1989 г. также в заливе Красноводский и у банки Ливанова были зафиксированы аномальные колебания уровня, вызвавшие сильную качку судов и паррома, приведшие к затруднениям в швартовке судов. 09.05.1933 г. у Куули-Маяк уровень моря поднялся на 1.35 м за 10 минут, волной снесены были в море лодки и рыболовные снасти. 12.04.1939 г. у банки Ливанова на расстоянии 15 миль от берега отмечено прохождение одиночной волны большой высоты. В том же районе: 06.03.1986 г. зафиксированы с сейнера и 45 рыболовецких судов аномальные колебания уровня моря с амплитудой 2–3 см в течение 1–1.5 мин в эпицентральной зоне землетрясения (Доценко и др., 2003). Инструментальные записи аномальных колебаний уровня моря имеются только для землетрясения 1962 г. (01.09.1962,  $M_w = 7$ ), полученные с помощью берегового самописца у иранского побережья Каспия.

Согласно исследованию (Уломов, 2008), наибольшая магнитуда возможных в исследуемом районе землетрясений достигает 8, в то же время магнитуда 6.8 (Доценко и др., 2003) является минимально необходимой для возбуждения волн цунами в Каспийском море. По базе данных USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>), максимальная магнитуда землетрясений с 1900 г. непосредственно для акватории Каспийского моря составила 6.8, с расположением очага в 10 км к югу от Баку (25.11.2000 40.245°с.ш., 49.946°в.д.).

Согласно базе данных СМТ (<https://www.globalcmt.org/>), максимальная  $M_w$  для Каспийского моря с 1979 г. также составляет 6.8. Для среднего Каспия максимальные магнитуды колеблются в пределах 5.1–5.7. Для Апшеронского порога – это 6.5.

Адекватная количественная оценка цунамиопасности населенных морских побережий является одной из наиболее актуальных теоретических и практических задач в области наук о Земле. Как показывает пример цунами в Тохоку 2011 г. в Японии, недооценка этой опасности чревата самыми тяжелыми последствиями для населения, экономики и экологии. Современные методы расчета максимальных высот волн цунами заданной повторяемости зачастую основываются на статистике известных событий цунами, включая инструментальные измерения, исторические данные, устные свидетельства очевидцев. Для сейсмически активных регионов, таких как Камчатка, Курильские о-ва, Япония, Алеутские острова и др., оценки цунамиопасности (карты цунамирайонирования) опираются на многолетние архивы наблюдений и в некоторых случаях на обнаруженные геологические следы (отложения цунами), связанные с накатом волн цунами на побережье. Однако в районах, где возникновение волн цунами – редкое событие, например, в Каспийском и Черном морях, применение методик, использующих статистику наблюденных событий, практически невозможно. В то же время повышенные требования по безопасности, предъявляемые к проектированию и строительству объектов ТЭК или АЭС, приводят к необходимости учитывать в расчетах опасности цунами даже исключительно редкие природные явления, способные вызвать катастрофические последствия. Для решения этой проблемы можно использовать вероятностный метод

оценки цунамиопасности, развиваемый в последние годы и основанный на разработке модели сейсмичности региона и создании с помощью метода Монте-Карло виртуального каталога землетрясений и цунами, моделирующего процесс возникновения этих событий на протяжении многих тысяч лет.

Детерминистский подход к оценке цунамиопасности произвольного участка побережья состоит в выборе сильнейших наблюдаемых (или гипотетических) событий цунами из ближней окрестности участка и из дальней зоны, последующей оценке параметров модельных источников и, наконец, численным моделированием процессов генерации и распространения цунами от этих источников. В результате удается рассчитать максимальные заплески цунами на побережье для выбранного исторического (или гипотетического) события. Детерминистский метод хорошо подходит при поиске так называемого «наихудшего сценария» для выбранного участка побережья, но при таком подходе практически невозможно получить вероятностные оценки цунамиопасности с различной повторяемостью.

Для побережья Каспийского моря опубликовано несколько исследований, посвященных оценке цунамиопасности, обусловленной сейсмическими источниками. В статье (Пелиновский, 1999) были использованы эмпирические данные для Тихого океана, на основании которых было показано, что высоты каспийских цунами могут достигать 0.5–2.6 м. Амплитудные характеристики каспийских цунами от гипотетических сейсмических источников анализировались в работах (Доценко и др. 2000, 2003). В (Куликов и др., 2014а) представлены результаты численного моделирования волн цунами, вызванных гипотетическим сейсмическим источником, расположенным в Каспийской котловине. Расчеты волнового поля цунами, возникающих в центральной части Каспия, позволили оценить максимальные высоты волн вдоль морского побережья стран СНГ (России, Азербайджана, Казахстана и Туркменистана). Выполненные авторами численные эксперименты с учетом повторяемости сильных землетрясений в регионе показали, что экстремальные высоты волн цунами могут достигать на отдельных участках побережья ~10 м для событий, соответствующих протяженным (до ~200 км) очагам землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 8$  и периодом повторяемости  $T \sim 1600$  лет. Для менее протяженных (до ~50 км) очагов землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 7$  (период повторяемости ~ 200 лет) высоты волн составляют до 3 м. По оценкам (Куликов и др., 2014а), землетрясение с  $M=8\pm 0.2$  может произойти во всем регионе Каспийского моря, включая сушу, один раз в 216 лет, тогда как для акватории период повторяемости подобного события составляет 1620 лет.

### **Сейсмичность и вероятные источники цунами в Каспийском море**

Как следует из работы (Уломов и др., 1999), в пределах Центрального Каспия и прилегающих районов Восточного Кавказа, Копетдага и Эльбурса землетрясения с магнитудой  $M = 8$  могут происходить в среднем один раз в 130 лет, с магнитудой  $M = 7.5$  – один раз в 60 лет, с магнитудой  $M = 7.0$  – один раз в 25 лет и, наконец, с



магнитудой  $M = 6.5$  – один раз в 10 лет. В более поздней работе (Уломов, 2003) для  $M = 8$  период повторения землетрясений уточнен и составляет 220 лет, в то время как для событий с  $M = 7.5$ , 7.0 и 6.5 он сохранился почти неизменным: соответственно, 70, 25 и 10 лет. Землетрясения с пороговой магнитудой для возбуждения цунами  $M = 6.8$  (Доценко и др., 2000) могут возникать один раз в 15 лет в обрамлении Южного Каспия и один раз примерно в 130 лет на его акватории.

К потенциально возможным зонам генерации каспийских цунами естественно отнести те морские и прибрежные участки суши, где уровень сейсмической активности наиболее высок. На рис. 1 приведена карта сейсмичности региона. Выделены основные зоны сеймотектонических разломов (рис. 1а): 1 – Главный Кавказский надвиг; 2 – Челекен-Апшеронский порог, 3 – Исак-Челекенская зона разломов, 4 – Араксинский глубинный разлом, 5 – зона разломов Эльбруса. Возникновение землетрясений непосредственно под морским дном возможно прежде всего для зон 1, 2 и 3. Зона разлома Кавказского надвига (1) приурочена к западному борту Дербентской впадины, глубина которой достигает 790 м.

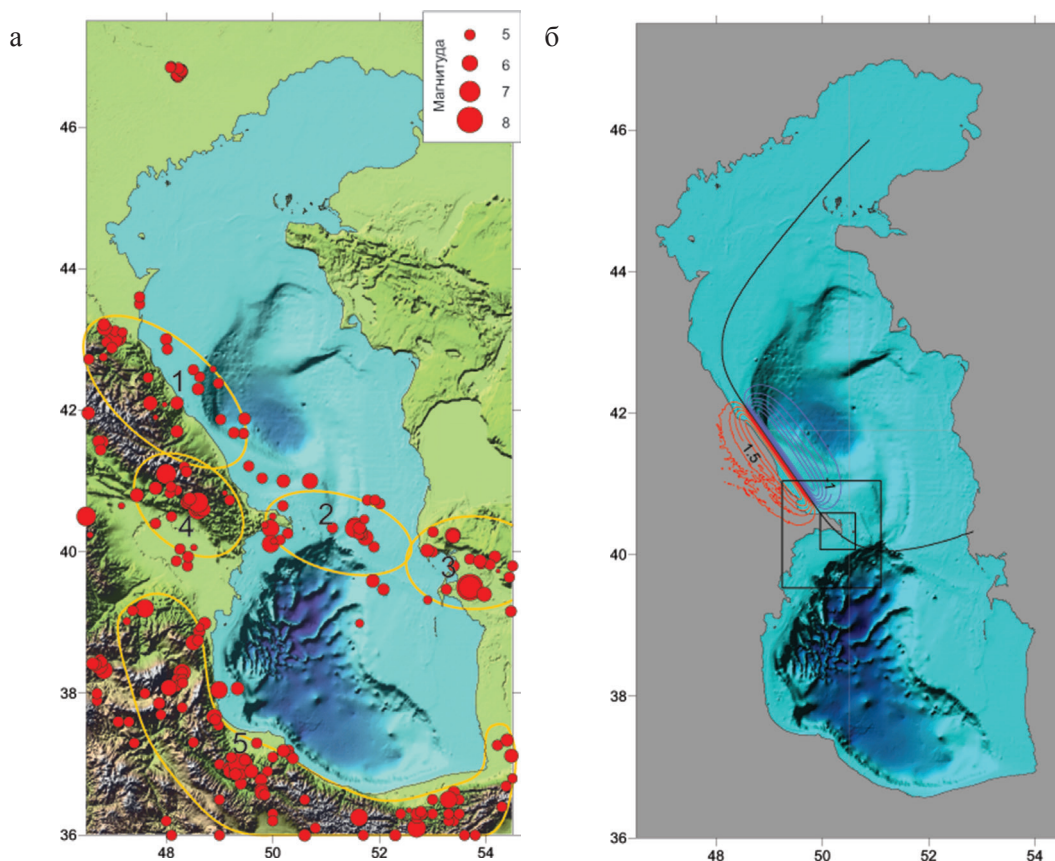


Рис. 1. (а). Карта сейсмичности Каспийского региона. Желтыми овальными линиями выделены основные сейсмоактивные зоны: 1 – Главный Кавказский надвиг; 2 – Челекен-Апшеронский порог, 3 – Исак-Челекенская зона разломов, 4 – Араксинский глубинный разлом, 5 – зона разломов Эльбруса. (б). Карта рельефа морского дна Каспийского моря. Источник цунами показан в виде изолиний вертикальных косейсмических смещений дна (изолинии проведены с шагом 0.5 м). Прямоугольники показывают границы расчетных областей с пространственным разрешением данных батиметрии 1'' и 6''.

Отметим, что наиболее эффективное возбуждение цунами происходит на глубокой воде, когда в движение приводится большая водная масса и образуется мощная морская волна. Зона Челекен-Апшеронского порога (2) целиком расположена в морской части региона. Она непосредственно примыкает к северному борту Южно-Каспийской впадины. Расположение сейсмических очагов и глубина моря способствует эффективной генерации цунами. Исак-Челекенская зона разломов (3) захватывает мелководный участок морского дна в восточной части Каспия. Как правило, цунами, возбуждаемое в неглубоком месте, имеет локальное проявление – волна при выходе на «глубокую воду» существенно уменьшает свою амплитуду. Таким было цунами от Краснодарского землетрясения 1895 г.: сейсмический толчок вызвал локальные колебания уровня моря в зоне, непосредственно прилегающей к эпицентру. Южная сейсмическая зона (зона разломов Эльбруса) расположена преимущественно на материковой части региона. Известно, что гидродинамическое воздействие очагов землетрясений проявляется лишь для событий, у которых зона значимых постсейсмических смещений поверхности земли распространяется и на морскую прибрежную область. Например, во время Рудбарского землетрясения 1990 г. согласно (Salaree, Okal, 2015) величина остаточных смещений морского дна была мала и могла вызвать волну цунами высотой всего несколько см. При этом наблюдаемые колебания уровня достигали 2 м, что, по мнению авторов статьи объясняется возникновением подводного оползня, вызвавшего локальное возмущение поверхности моря.

### **Численная модель генерации и распространения волн цунами**

В настоящее время широко применяется несколько численных подходов к реализации уравнений движения волн цунами в океане, например, TUNAMI (Imamura, 1995), MOST (Titov, Gonzalez, 1997), NAMI-DANCE (Yalciner et al., 2006). Используемая в данной работе модель является разновидностью TUNAMI – в ней реализована конечно-разностная аппроксимация уравнений мелкой воды в полных потоках в сферической системе координат (Лобковский и др., 2009; Куликов и др., 2014б). Здесь и далее под TUNAMI мы фактически подразумеваем целое семейство программных пакетов, основанных на едином подходе. Топография дна задавалась с разрешением 30 угловых секунд (") по данным GEBCO (<https://www.gebco.net/>). Для расчета наката волны на сухой берег использовались сглаженные данные NASA SRTM3 с разрешением 1" (<https://earthdata.nasa.gov/>).

В численной модели применялась технология вложенных сеток (Fine et al., 2018): первая, основная сетка, охватывает все море с горизонтальным разрешением 30", вторая – промежуточная с шагом 6" и, наконец, сетка для расчета наката волны на берег с разрешением 1", что составляет приблизительно 30 м. При генерации сеток батиметрии с разрешением 1" и 6" оцифровывались данные с навигационных карт 1:50000. На рисунке рис. 1б прямоугольниками отмечены области расчета для вложенных сеток 6" и 1" в районе Апшеронского п-ова.

Основным объектом изучения цунамиопасности был выбран район побережья восточной части Апшеронского побережья. Эта часть полуострова имеет относительно низкую населенность (около 100 тыс. чел.), по сравнению с юго-западным участком берега, где расположен город Баку. Однако, напротив острова Пираллахи располагается нефтеперерабатывающий завод SOCAR Refinery. Воздействие волн цунами может вызвать разрушение нефтяных терминалов, разлив нефтепродуктов, пожары и пр. С точки зрения потенциальной угрозы наиболее опасными представляются цунамигенные сейсмические очаги, расположенные к югу от полуострова. Сценарный детерминистский подход предполагает оценку цунамиопасности на основе численного расчета значений заплесков цунами на побережье, вызванных очагом с параметрами, приводящими к наибольшим высотам волн. «Эталонный» источник определяется на основе анализа сеймотектонических условий исследуемого региона и распределения сейсмической активности. Прежде всего, он определяется сейсмическим потенциалом соответствующей тектонической зоны, геометрией разлома, механизмом очага (сдвиги, взброс, сбросы) и др.

В данном исследовании был выполнен ряд численных экспериментов для выявления наиболее опасного сейсмического источника (в зоне разлома Главного Кавказского надвига) с использованием хорошо зарекомендовавшей себя модели конечного разрыва (Okada, 1985). Для оценки геометрических размеров очага нами использовались эмпирические соотношения из известной работы (Wells, Coppersmith, 1994), связывающие длину  $L$ , ширину  $W$  и площадь  $S$  плоскости разрыва в очаге, а также величину средней подвижки по разрыву  $D$  и максимальной подвижки  $D_{\max}$  с магнитудой землетрясения  $M_W$ .

Каждое модельное землетрясение было охарактеризовано 9-ю параметрами очага, задаваемого моделью конечного разрыва (Okada, 1985): магнитуда, координаты и глубина центра площадки разрыва, ширина и длина области разрыва, угол по простиранию (Strike, °), угол падения (Dip, °), угол скольжения (Rake, °), смещение (величина скольжения, м). Этих параметров достаточно для выполнения расчетов остаточных вертикальных смещений морского дна для модели источника в виде прямоугольной площадки разрыва с заданным положением и ориентацией в пространстве. Результат выбора «эталонного» очага представлен в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели конечного разрыва очага землетрясения, использованные в данной работе

Магнитуда, $M_W$	°с.ш.	°в.д.	Глубина очага, км	Strike, $\phi$ (°)	Dip, $\delta$ (°)	Rake, $\lambda$ (°)	Смещение, (м)	Длина, $L$ (км)	Ширина, $W$ (км)
8	41.42	49.23	30	325	86	-90	2.6	190	35

На рис. 1б показаны изолинии смещений дна, соответствующие модели конечного разрыва (см. табл.1). Максимальное смещение (отрицательное) достигает 3 м. Однако в гидродинамической модели, как и в работах (Лобковский и др., 2009; Куликов и др., 2014а), при задании начальной деформации уровня моря над очагом цунами учитывалась «негидростатическая поправка» (Файн, Куликов, 2011).



Расчеты распространения волн цунами выполнялись для двух моделей – без наката (на сетке с шагом 6") и с учетом выхода волны на сухой берег (на сетке с шагом 1"). На рис. 2 приведены результаты расчета с учетом наката волны. Хорошо видно, что максимальные значения высоты волны наблюдаются на северной части побережья полуострова и достигают 3 м.

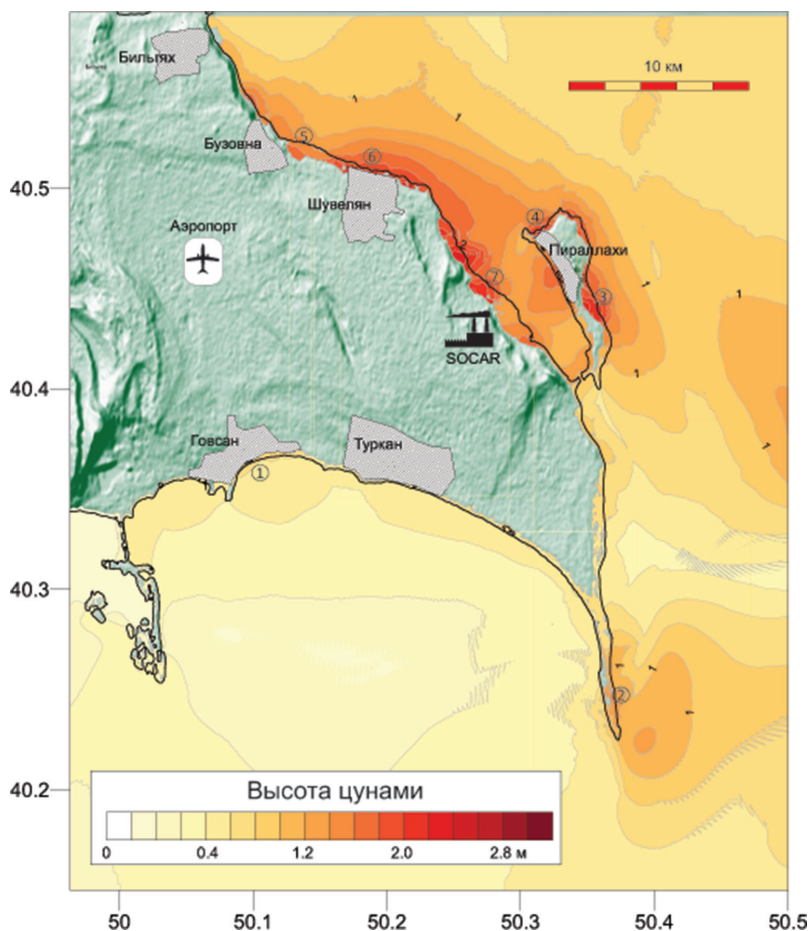


Рис. 2. Результаты расчета высот цунами на сетке с горизонтальным шагом 1" и с учетом наката волны на берег. Сплошной черной линией показана линия берега. Цифры в кружках соответствуют номерам в табл. 2, на соответствующих участках побережья.

Отметим, что в районе завода SOCAR Refinery наблюдаются экстремальные значения высоты цунами и дальности наката (~1500 м). В табл. 2 приведены значения высот цунами и дальность наката волны на берег. Для сравнения указаны высоты волн, рассчитанные по модели с шагом 6" (без наката). Практически везде высоты цунами с учетом наката оказались существенно выше. Это объясняется динамическим эффектом движения волны вверх по наклонному берегу. За счет инерции волна достигает более высоких отметок, по сравнению с медленным увеличением уровня моря. Специфическая конфигурация берега, которая представляет собой пространство между северным побережьем Апшеронского п-ова и о. Пираллахи и является бухтой или узостью также способствует увеличению высоты волны, приходящей с севера.

Таблица 2. Значения высот цунами в нескольких пунктах побережья Апшеронского п-ова по расчетам с использованием двух численных моделей – Модель 1 (сетка с шагом 6") и Модель 2 (сетка с шагом 1") с учетом наката на берег. Под высотой (м) подразумевается высота волны на сухом берегу

№	Название	°в.д.	°с.ш.	Модель 1 (шаг 6")	Модель 2 (шаг 1")	
					Высота, м	Дальность затопления, м
1	Говсан	50.1	40.36	0.6	0.8	800
2	Мыс (Апшеронский нац. парк)	50.38	40.25	0.9	1.5	330
3	Пираллахи (восток)	50.36	40.44	1.4	2.5	1030
4	Пираллахи (север)	50.31	40.48	1.9	2.5	500
5	Бузовна	50.14	40.52	1.5	1.8	1040
6	Шувелян	50.19	40.51	1.8	2.3	360
7	Нефтезавод SOCAR Refinery	50.28	40.45	2.0	2.3	1500

### Заключение

Изложенные результаты исследований – это первый этап оценки цунамиопасности, который выполняется авторами с учетом локальных свойств батиметрии и рельефа береговой зоны. Известные опубликованные оценки цунамиопасности (Доценко и др., 2003; Куликов и др., 2014б; Salaree, Okal, 2015, Perri  ez, Cortés, 2018) дают общее представление о распределении возможных экстремальных высот цунами вдоль побережья. Так называемое «локальное» цунамирайонирование с горизонтальным разрешением равным или меньшим 1" является довольно трудоемкой и дорогостоящей процедурой. Очевидно, что такого рода анализ целесообразно выполнять для участков побережья с высокой плотностью населения или включающих объекты, потенциально подверженные опасности разрушения в результате воздействия волн цунами. В данной работе на примере побережья Апшеронского п-ова продемонстрирована эффективность численной модели со вложенными сетками и показано, что для многих участков побережья учет наката волны приводит к значительно более высоким оценкам значений высот цунами (иногда на 50–70% выше). В результате наката волн цунами могут затопляться обширные участки побережья с глубиной проникновения до 1500 м (в зоне завода SOCAR Refinery).

В данной работе мы учитывали только одну сейсмическую зону – главный Кавказский надвиг. Однако для Апшеронского п-ова не меньшую опасность могут представлять сейсмические очаги, расположенные в зоне Челекен-Апшеронского порога. Особенно это касается южной части побережья, включая Баку.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН (тема № 0149-2019-0005) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-01018).

## Литература

- Всеобщая батиметрическая карта Мирового океана // <https://www.gebco.net/> (дата обращения 01.04.2018).
- Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В., Соловьёв А.А.* Современные тектонические движения и землетрясения в северной части Каспийского горнопромышленного региона // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2018. Т. 16. № 1–2. С. 13. DOI:10.24411/2227-9490-2018-11071.
- Глобальная база данных тензорных моментов // <https://www.globalcmt.org/> (дата обращения 01.05.2018).
- Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Цунами в Каспийском море: сейсмические источники и особенности распространения // Океанология. 2000. Т. 40. № 4. С. 509–518.
- Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Цунами в Каспийском море: численное моделирование распространения из зон сейсмической генерации // Морск. Гидрофиз. журн. 2001. № 6. С. 3–13.
- Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Возможные проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // Физика Земли. 2003. № 4. С. 49–55.
- Куликов Е.А., Кузин И.П., Яковенко О.И.* Цунами в центральной части Каспийского моря // Океанология. 2014а. Т. 54. № 4. С. 473–473.
- Куликов Е.А., Файн И.В., Яковенко О.И.* Численное моделирование рассеяния длинных поверхностных волн на примере Японского цунами 2011 г. // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2014б. Т. 50, № 5. С. 567–577.
- Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А., Иващенко А.И., Файн И.В., Томсон Р.Е., Ивельская Т.Н., Богданов Г.С.* Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 4. № 2. С. 181–197.
- Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства // <https://earthdata.nasa.gov/> (дата обращения 01.04.2018).
- Никонов А.А.* Бывают ли цунами в Каспийском море? // Природа. 1996. № 1. С. 72–73.
- НП–064–17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии» (НП–064–17). М.: 2017. 65 с.
- Пелиновский Е.Н.* Предварительные оценки цунамиопасности Каспийского моря. Препринт № 480. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. 24 с.
- 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. № 1. С. 139–142.
- Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Яковенко О.И., Харламов А.А.* Цунами в Каспийском море: Препринт № 1. М.: ИО РАН, 2004. 51 с.
- Стогний Г.А., Стогний В.В.* Сейсмичность Большого Кавказа с позиции блоковой делимости земной коры // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. № 2. С. 86–95.
- Уломов В.И.* Трехмерная модель динамики литосферы, структуры сейсмичности и изменений уровня Каспийского моря // Физика Земли. 2003. № 5. С. 5–17.
- Уломов В.И.* Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата.

- Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. 2008. Т. 1. С. 127–146.
- Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря // Физика Земли. 1999. № 12. С. 76–82.
- Файн И.В., Куликов Е.А. Расчет смещений поверхности океана в очаге цунами, вызываемых мгновенной вертикальной подвижкой дна при подводном землетрясении // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. №. 2. С. 111–118.
- Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Levin B.V., Solovieva O.N. Tsunamis in the Caspian Sea: historical events, regional seismicity and numerical modeling // Proc. Int. Workshop “Local Tsunami Warning and Mitigation, Russia. 2002. P. 23–31.
- Fine I.V., Thomson R.E., Lupton L.M., Mundschutz S. Numerical modelling of an Alaska 1964-type tsunami at the Canadian Coast Guard Base in Victoria, British Columbia // Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 2018. No. 323. P. 28.
- Imamura F. Review of tsunami simulation with a finite difference method // Long\_Wave Runup Models. Eds. H. Yeh et al. NY.: World Scientific, River Edge, 1995. P. 43–87.
- Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the south Caspian basin // Geophys. J. Int. 2002. Vol. 148. No. 2. P. 214–245.
- Kadirov F.A., Gadirov A.H. A gravity model of the deep structure of South Caspian basin along submeridional profile Alborz-Absheron Sill // Global Planet. Change. 2014. Vol. 114. P. 66–74.
- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. Vol. 75. No. 4. P. 1135–1154.
- Periáñez R., Cortés C. A modelling study on tsunami propagation in the Caspian Sea // Pure Appl. Geophys. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2057-9>.
- Salaree A., Okal E.A. Field survey and modelling of the Caspian Sea tsunami of 1990 June 20 // Geophys. J. Int. 2015. Vol. 201. No. 2. P. 621–639.
- Slavina L.B., Kuchay M.S., Likhodeev D.V., Abdullaeva R.R. Estimation of stress/strain state of tectonic structures using V P/V S Ratios: A case study of seismically active zones of the Greater Caucasus, Kura Depression, Transcaucasia, and the Western Caspian Region // Seismic Instruments. 2018. Vol. 54. No. 1. P. 78–100.
- Titov V.V., Gonzalez F.I. Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model // US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory. 1997. P. 1–11.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seism. Soc. America. 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974–1002.
- USGS. Программа рисков землетрясений // <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения 15.04.2018).
- Yalciner A.C., Pelinovsky E., Zaytsev A., Kurkin A., Ozer C., Karaku H. Nami Dance Manual // Middle East Technical University. Civil Engineering Department. Ocean Engineering Research Center. Ankara: 2006. <http://namidance.ce.metu.edu.tr/pdf/NAMIDANCE-version-5-9-manual.pdf>.

## TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT IN THE CASPIAN SEA

**Е.А. Kulikov<sup>1</sup>, А.Yu. Medvedeva<sup>1</sup>, I.V. Fine<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia

<sup>2</sup> Institute of Ocean Sciences, Sydney, V8L 5T5, Canada  
e-mail: [kulikove@gmail.com](mailto:kulikove@gmail.com)

Submitted 10.03.2019, accepted 13.12.2019

The article describes the tsunami hazard assessment for the coast of the Caspian Sea, in particular for the Absheron Peninsula. Due to the high socio-economic load on the coast of this region by electric power and oil production industries requirements, it is necessary to take into account risks even for such extremely rare natural phenomena like tsunamis. An earthquake with  $M = 8 \pm 0.2$  can occur throughout the Caspian Sea region, including land, once every 216 years, while for the water area the frequency of occurrence of such an event is 1620 years. The article presents the results of a tsunami hazard assessment based on a deterministic approach for the Absheron Peninsula. This approach of the tsunami hazard assessing of an arbitrary part of the coast consists of selecting of the strongest observed (or hypothetical) tsunami event from a neighborhood and from a distant zone, of the subsequent estimation of parameters for model sources and, finally, of the numerical modeling of tsunami generation and propagation from these sources. It was obtained that with the propagation of tsunami waves from the north to the coast of the Absheron Peninsula, its height can reach 3–4 m for some parts of the coast with run-up 500–1500 m.

**Keywords:** Caspian Sea, tsunami, numerical model, wave run-up, earthquake, seismicity, tsunami hazard, TUNAMI

### References

- Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Levin B.V., and Solov'eva O.N. Tsunami v Kaspiiskom more: seismicheskie istochniki i osobennosti rasprostraneniya. *Okeanologiya* (Tsunami in the Caspian Sea: seismic sources and generation features). *Okeanologiya*, 2000, Vol. 40, No. 4, pp. 509–518.
- Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Levin B.V., and Solov'eva O.N. Tsunami v Kaspiiskom more: chislennoe modelirovanie rasprostraneniya iz zon seismicheskoi generatsii (General characteristics of the tsunami in the Caspian Sea). *Morsk. Gidrofiz. zhurn.*, 2001, No. 6, pp. 3–13.
- Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Levin B.V., and Solov'eva O.N. Vozmozhnye proyavleniya tsunami ot seismicheskikh istochnikov v Kaspiiskom more (Possible tsunami implications of seismic sources in the Caspian Sea). *Fizika Zemli*, 2003, No. 4, pp. 49–55.
- Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Levin B.V., and Solovieva O.N. Tsunamis in the Caspian Sea: historical events, regional seismicity and numerical modeling. *Proc. Int. Workshop "Local Tsunami Warning and Mitigation, Russia*, 2002, pp. 23–31.
- Fine I.V. and Kulikov E.A. Raschet smeshchenii poverkhnosti okeana v ochage tsunami, vyzyvaemykh mgnovЕННОй vertikal'noi podvizhkoй dna pri podvodnom zemletryaseniі (Calculation of the ocean surface displacements in the tsunami source caused by the instantaneous vertical movement of the bottom in an underwater earthquake). *Vychislitelnyye tekhnologii*, 2011, Vol. 16, No. 2, pp. 111–118.
- Fine I.V., Thomson R.E., Lupton L.M., and Mundschutz S. Numerical modelling of an Alaska



- 1964-type tsunami at the Canadian Coast Guard Base in Victoria, British Columbia. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.*, 2018, No. 323, pp. 28.
- Gatinskii Yu.G., Prokhorova T.V., Rundkvist D.V., and Solov'ev A.A. Sovremennye tektonicheskie dvizheniya i zemletryaseniya v severnoi chasti Kaspiiskogo gornopromyshlennogo regiona. (Up-to-date tectonic movements and earthquakes in the Northern part of the Caspian mining region). *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i Vremya*, 2018, Vol. 16, No. 1–2.
- <https://earthdata.nasa.gov/> (last accessed in 01.04.2018)
- <https://www.gebco.net/> (last accessed in 01.04.2018)
- <https://www.globalcmt.org/> (last accessed in 01.05.2018)
- Imamura F. Review of tsunami simulation with a finite difference method. *Long Wave Runup Models*. Eds. H. Yeh et al. NY.: World Scientific, River Edge, 1995, pp. 43–87.
- Jackson J., Priestley K., Allen M., and Berberian M. Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophys. J. Int.*, 2002, Vol. 148, No. 2, pp. 214–245.
- Kadirov F.A. and Gadirov A.H. A gravity model of the deep structure of South Caspian basin along submeridional profile Alborz-Absheron Sill. *Global Planet. Change*, 2014, Vol. 114, pp. 66–74.
- Kulikov E.A., Fine I.V., and Yakovenko O.I. Chislennoe modelirovanie rasseyaniya dlinnykh poverkhnostnykh voln na primere Yaponskogo tsunami 2011 g. (Numerical modeling of the long surface waves scattering for the 2011 Japan tsunami: Case study). *Izvestiya RAN. Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 2014b, Vol. 50, No. 5, pp. 567–577.
- Kulikov E.A., Kuzin I.P., and Yakovenko O.I. Tsunami v tsentral'noi chasti Kaspiiskogo morya. Okeanologiya (Tsunamis in the central part of the Caspian Sea). *Okeanologiya*, 2014a, Vol. 54, No. 4, pp. 473–473.
- Lobkovskii L.I., Rabinovich A.B., Kulikov E.A., Ivashchenko A.I., Fine I.V., Tomson R.E., Ivel'skaya T.N., and Bogdanov G.S. Kuril'skie zemletryaseniya i tsunami 15 noyabrya 2006 g. i 13 yanvarya 2007 g. (nablyudeniya, analiz i chislennoe modelirovanie) (Kuril earthquakes and tsunami of 15 November 2006 and 13 January 2007 (measurements, analysis, and numerical modeling). *Okeanologiya*, 2009. Vol. 4, No. 2, pp. 181–197.
- Nikonov A.A. Byvayut li tsunami v Kaspiiskom more? (Are there tsunamis, in the Caspian Sea?). *Priroda*, 1996, No. 1. pp. 72–73.
- NP-064-17. (NP-064-17. Federal norms and rules in the field of use of nuclear power “Accounting for external impacts with natural and anthropogenic origin on the objects of use of nuclear power” (NP-064-17)). Moscow: 2017, 65 p.
- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. America*, 1985, Vol. 75, No. 4, pp. 1135–1154.
- Pelinovskii E.N. Predvaritel'nye otsenki tsunamiopasnosti Kaspiiskogo morya. Preprint № 480. (Previous tsunami hazard assessment of the Caspian Sea. Preprint № 480). Nijnij Novgorod: IPF RAN, 1999, 24 p.
- Periáñez R. and Cortés C. A modelling study on tsunami propagation in the Caspian Sea. *Pure Appl. Geophys.*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2057-9>.
- Salaree A. and Okal E.A. Field survey and modelling of the Caspian Sea tsunami of 1990 June 20. *Geophys. J. Int.*, 2015, Vol. 201, No. 2, pp. 621–639.
- Slavina L.B., Kuchay M.S., Likhodeev D.V., and Abdullaeva R.R. Estimation of stress/strain state of tectonic structures using V P/V S Ratios: A case study of seismically active zones of the Greater Caucasus, Kura Depression, Transcaucasia, and the Western Caspian Region. *Seismic Instruments*, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 78–100.

- Smirnova M.N., Brazhnik V.A., and Kerimov I.A.* Ispol'zovanie burovykh i geofizicheskikh materialov pri reshenii zadach seismicheskogo raionirovaniya (The use of drilling and geophysical materials in solving problems of the seismic zoning). *GNTP Rossii "Globalnyye izmeneniya prirodnoy sredy i klimata"*. *Seysmichnost i seysmicheskoye rayonirovaniye Severnoy Evrazii*, 1993, No. 1, pp. 139–142.
- Solov'eva O.N., Dotsenko S.F., Kuzin I.P., Yakovenko O.I., and Kharlamov A.A.* Tsunami v Kaspiiskom more: Preprint № 1 (Tsunami in the Caspian Sea: Preprint № 1). Moscow: IO RAN, 2004, 51 p.
- Stognii G.A. and Stognii V.V.* Seismichnost' Bol'shogo Kavkaza s pozitsii blokovo delimosti zemnoi kory (The seismicity of the Greater Caucasus from the position of block divisibility of the Earth's crust). *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tse ntrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, 2017, No. 2, pp. 86–95.
- Titov V.V. and Gonzalez F.I.* Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory, 1997, pp. 1–11.
- Ulomov V.I.* Trekhmernaya model' dinamiki litosfery, struktury sejsmichnosti i izmenenij urovnya Kaspijskogo moraya (Three-dimensional model of the dynamics of the lithosphere, the structure of seismicity and changes in the level of the Caspian Sea). *Fizika Zemli*, 2003, No. 5, pp. 5–17.
- Ulomov V.I.* Vyyavlenie potentsial'nykh ochagov i dolgosrochnyi prognoz sil'nykh zemletrasenii na Severnom Kavkaze (Identification of the potential sources and long-term forecast of the strong earthquakes in the North Caucasus). *Izmeneniye okruzhayushchey sredy i klimata. Prirodnyye i svyazannyye s nimi tekhnogennyye katastrofy*, 2008, Vol. 1, pp. 127–146.
- Ulomov V.I., Polyakova T.P., and Medvedeva N.S.* Dinamika sejsmichnosti bassejna Kaspijskogo morya (Dynamics of the seismicity of the Caspian Sea basin). *Fizika Zemli*, 1999, No. 12, pp. 76–82.
- USGS. <https://earthquake.usgs.gov/> (last accessed in 15.04.2018)
- Wells D.L. and Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. America*, 1994, Vol. 84, No. 4, pp. 974–1002.
- Yalciner A.C., Pelinovsky E., Zaytsev A., Kurkin A., Ozer C., and Karaku H.* Nami Dance Manual. Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ocean Engineering Research Center, Ankara, 2006, <http://namidance.ce.metu.edu.tr/pdf/NAMIDANCE-version-5-9-manual.pdf>.