

УДК 551.465

## ЦУНАМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

© 2014 г. Е. А. Куликов, И. П. Кузин, О. И. Яковенко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: kulikove@ocean.ru

Поступила в редакцию 15.10.2012 г., после доработки 06.03.2013 г.

В работе приводится краткая характеристика геотектоники региона Каспийского моря и сейсмичности центральной части бассейна. На основе анализа сейсмичности выделены наиболее вероятные зоны генерации цунами. Выполнен краткий обзор исторических сведений о цунами в районе Каспийского моря. Для оценки цунамиопасности был использован метод численного гидродинамического моделирования, с учетом реальной топографии дна Каспийского моря. Расчеты волнового поля возможных цунами, возникающих в центральной части Каспия, позволили оценить максимальные высоты волн вдоль морского побережья стран СНГ (России, Азербайджана, Казахстана и Туркменистана). Выполненные численные эксперименты по моделированию распространения цунами с учетом повторяемости сильных землетрясений в регионе показали, что экстремальные высоты волн могут достигать на отдельных участках побережья ~10 м для событий, соответствующих протяженным (до ~200 км) очагам землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 8$  с периодом повторяемости  $T \approx 1600$  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.

DOI: 10.7868/S003015741403006X

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие инфраструктуры нефте- и газодобычи в акватории Каспийского моря является одной из потенциальных угроз экологии региона. Другой возможный источник опасности — возникновение аварийной ситуации на атомной энергетической установке (АЭУ), расположенной на восточном побережье в районе Актау. Вероятные нефтяные загрязнения, выбросы радиоактивных материалов и пр. представляют угрозу не только природным ресурсам Каспия, но также здоровью и жизни прибрежного населения. В свою очередь высокая сейсмическая активность является одним из наиболее опасных факторов, приводящих к техногенным катастрофам. Яркий пример — авария на атомной электростанции “Фукусима”, возникшая в результате сильнейшего землетрясения и цунами вблизи о-ва Хонсю 11 марта 2011 г.

Следует отметить, что сейсмичность каспийского региона исследована достаточно подробно (см., например, [26]), при этом проявление цунами в Каспийском море и степень риска для побережья остаются недостаточно изученными. Исторические данные о возникновении цунами малочисленны в силу локального проявления волн, редкой повторяемости событий и практически полного отсутствия инструментальных измерений. В настоящее время есть сведения о 14-ти ис-

торических цунами или случаях аномальных колебаний уровня моря [10].

Известно, что волны цунами возникают в результате сейсмотектонических подвижек дна (остаточных смещений) в зоне сейсмического очага. Быстрое вытеснение значительных объемов воды в источнике приводит к возникновению поверхностных гравитационных волн *цунами*, распространяющихся далеко от области генерации. Данные наблюдений свидетельствуют, что остаточные смещения дна образуются в результате сильных мелкофокусных землетрясений с магнитудой более 6. Каталоги землетрясений указывают, что для Каспийского моря преобладающая глубина очагов землетрясения  $h$  составляет 15–20 км, в то время как тихоокеанские цунамигенные землетрясения возникают на глубинах 30–50 км.

Кроме сейсмотектонических источников цунами возможна генерация волн и в результате подводных оползней, вызванных землетрясением, а в отдельных случаях — самопроизвольно. В статье [32] рассмотрена возможность генерации оползневых цунами в средней части Каспия. Следует отметить, что вопрос о возникновении подводных оползней требует отдельного исследования.

По историческим сведениям землетрясения с магнитудой  $M = 6.8$  на акватории Каспийского моря вплоть до XX в. не отмечались. В течение периода 1901–1985 гг. произошло несколько землетрясений с  $M = 6.2–6.6$  (1911, 1935, 1961 и 1963 гг.).

Все эти землетрясения – мантийные с глубинами очагов 46–90 км [15]. И только в 1986 и 1989 гг. возникли два сильных коровых землетрясения с  $M = 6.2–6.3$  на глубинах 25–30 км в восточной части Апшеронского порога [4, 5]. В 2000 г. на западном фланге порога произошло также коровое землетрясение (глубина очага – около 20 км) с  $M = 6.4$ . Предполагаемая интенсивность сотрясений в эпицентрах упомянутых землетрясений, согласно последним работам, должна быть не менее 8 баллов.

В данной работе на основе анализа сейсмичности и численного гидродинамического районирования выполнена оценка цунамиопасности в центральной части Каспия.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕКТониКИ РЕГИОНА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Структура Каспийской впадины сформирована различными элементами, возраст которых уменьшается в южном направлении. Самая северная часть депрессии Каспийского моря относится к Русской платформе, которая с юга ограничена Скифско-Туранской плитой. Центральная и южная части депрессии входят в состав Альпийской складчатой системы. Все эти структурные регионы разделены глубинными разломами [12] (рис. 1).

Особенности тектоники Каспийской депрессии обусловлены взаимодействием двух геотектонических факторов. Первый фактор – это проявление реликтового процесса субдукции Альпийских структур в центральной части депрессии (зона Апшеронского порога) под эпигерцинскую Скифско-Туранскую плиту, что выражается в виде мантийных землетрясений с магнитудами  $M = 4.5–6.5$ , возникающих на глубинах 50–90 км вдоль линии контакта альпийских и эпигерцинских структур [31].

Второй фактор – это геотектонический процесс поперечного меридионального прогибания Каспийской депрессии, обуславливающий ее несогласное простираие по отношению к субширотной ориентации структур Альпийско-Гималайского складчатого пояса. Видимо, эта особенность геотектонической обстановки на границах Каспийской депрессии и структур Кавказа и Копетдага обуславливала возникновение сильнейших землетрясений в Шемахинском тектоническом узле в 1668 и 1902 гг. ( $M = 7.0–7.5$ ) и Краснодарского землетрясения в 1895 г. ( $M = 8 \pm 0.2$ ) в структурах Балхана-Копетдага [15].

По глубинному строению регион Каспийского моря отчетливо разделяется на северную, центральную и южную части. Зона раздела, часто именуемая Челекен-Апшеронским порогом, от-

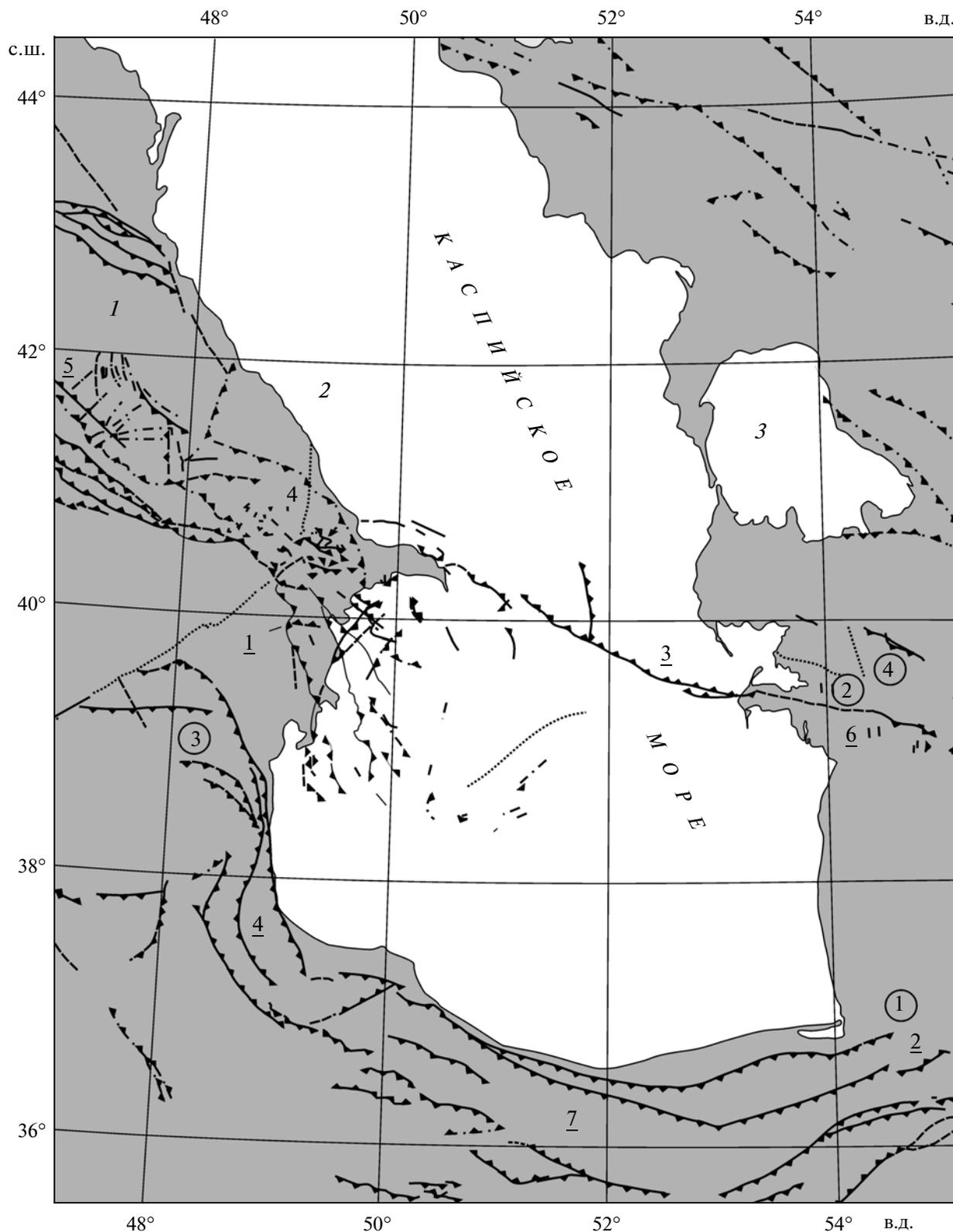
мечается узкой полосой высокой сейсмической активности, максимальными градиентами изостатических аномалий силы тяжести и аномалий магнитного поля, повышенным тепловым потоком.

Лежащая к северу от Челекен-Апшеронского порога область платформы имеет типично континентальную земную кору, состоящую из тонкого осадочного слоя мощностью 2–3 км, “гранитного” слоя мощностью около 10 км и “базальтового” слоя мощностью 15–20 км, и характеризуется положительными аномалиями силы тяжести. Подошва земной коры (граница Мохо) плавно погружается под структуры Кавказа и Копетдага на глубины 45–50 км [1, 2].

При переходе через Челекен-Апшеронский порог с севера на юг кровля консолидированной коры испытывает резкое погружение с глубин 2–3 км до глубины 20 км и более. К югу от порога, в Южно-Каспийской впадине “гранитный” слой полностью исчезает, и земная кора приобретает типичные признаки коры океанического типа. Она состоит здесь из необычайно мощной осадочной толщи (более 20 км), подстилаемой “базальтовым” слоем мощностью 10–15 км, и характеризуется большими отрицательными аномалиями силы тяжести. В районе Челекен-Апшеронского порога осадочная толща разбита многочисленными разломами и смята в интенсивные складки.

В пределах Копетдагского тектонического узла наблюдается сочетание антиклинальных зон и прогибов. В одной из его структур, Келькорском прогибе, произошло сильнейшее в регионе Краснодарское землетрясение 1895 г. ( $M = 8.2$ ,  $h = 55$  км), к зонам Балханских разломов тяготеют очаги Казанджикского землетрясения 1946 г. ( $M = 7.0$ ) и Большебалханского (Небитдагского) землетрясения 2002 г. ( $M = 7.2–7.4$ ).

Ввиду отсутствия контрастных зон контакта крупных геотектонических единиц Альпийского пояса в пределах акватории Каспия, его сейсмический потенциал должен быть более низким, чем для пограничных зон у западного и восточного побережий моря. Тем не менее, можно ожидать возникновения достаточно сильных землетрясений в области пересечения Апшеронского порога и Восточно-Каспийской флексуры, например, землетрясений типа 1986 и 1989 гг. ( $M = 6.2–6.3$ ), и даже более сильных ( $M \sim 7.0$ ). Это соображение основано на большой протяженности стыкующихся зон Апшеронского порога и Восточно-Каспийской флексуры (до 300 км). В свою очередь такие сильные землетрясения способны вызвать цунами на акватории Каспийского моря.



**Рис. 1.** Расположение тектонических областей, структур и разломов в Каспийском регионе: 1 – Дагестанский клин; 2 – Дербентский прогиб; 3 – залив Кара-Богаз-Гол; 4 – юго-восточный Кавказ.

Тектонические структуры: ① – Горганский прогиб; ② – Келькорский прогиб; ③ – Талышская дуга; ④ – Большой Балхан.

Разломы: 1 – Араксинский глубинный разлом; 2 – Аладагский; 3 – Апшеронский; 4 – Ардебильский; 5 – главный Кавказский надвиг; 6 – Исак-Челекенская зона разломов; 7 – зона разломов Эльбурса.

**Таблица 1.** Расчетные средние периоды повторяемости землетрясений разных магнитуд в акватории Каспийского моря и окружающих регионах, вычисленные по графикам повторяемости из работы [24]

Магнитуда	Средний период повторяемости $T$ , лет	
	весь регион	акватория Каспия
$6.0 \pm 0.2$	2.6	24 (~15)
$6.5 \pm 0.2$	7.8	68 (~30)
$7.0 \pm 0.2$	24 (~15)	195
$7.5 \pm 0.2$	72 (~55)	560
$8.0 \pm 0.2$	216 (~330)	1620
$8.5 \pm 0.2$	655	—

Примечание. В скобках указаны наблюдаемые значения средних периодов повторяемости для тех диапазонов магнитуд, где данные наблюдений заметно отклоняются от прямой зависимости  $\lg N = 4.135 - 0.918 M_S$ .

### СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАСПИЯ, ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ОЧАГОВ

Регион Каспийского моря и его окружения относится к сейсмически активным зонам. Информация о сильных прибрежных землетрясениях Кавказского региона ( $M \geq 5-6$ ) известна с VII в., а по Туркменскому побережью — с конца XIX в. [15].

Первые достоверные сведения о землетрясениях под дном Каспийского моря существуют с 1911 г., когда к северу от Апшеронского п-ова было зарегистрировано мантийное землетрясение ( $h \sim 50$  км) с  $M = 6.4$ . Оно вызвало на побережье сотрясение интенсивностью до 6 баллов [15]. В течение последующих лет под дном моря были зарегистрированы десятки землетрясений, большинство из которых возникало в земной коре (глубины в пределах от 5–15 до 35 км). Кроме того, известны мантийные толчки на глубинах 40–90 км. Необходимо отметить, что в целом большинство коровых землетрясений имели меньшую магнитуду ( $M \leq 5.3$ ), чем мантийные ( $M = 4.3-6.6$ ). Однако в течение 3-х лет (с 1986 по 1989 гг.) произошли два сильных коровых землетрясения с  $M = 6.2-6.3$ . Первое из них вызвало сотрясение в 5–6 баллов по шкале MSK–64 вдоль побережий Кавказа и Туркменистана и 7–8 баллов на о-ве Нефтяные Камни на эпицентральной расстоянии 40 км [4]. Второе землетрясение более сильно проявилось на Туркменском побережье (6–7 баллов в Красноводске) и менее сильно на Кавказском побережье и вблизи него (4–6 баллов в Баку и на о-ве Нефтяные Камни) [5]. В конце ноября 2000 г. в северо-западной части Апшеронского порога возникло землетрясение с  $M = 6.4$  на глубине около 20 км, которое проявилось в Баку с интенсивностью 6–7 баллов и вызвало повреждение некоторых зданий [18]. Можно

предполагать, что для этих землетрясений макросейсмический эффект в эпицентре был не менее 8 баллов.

В декабре 2000 г. в Западной Туркмении произошло одно из сильнейших землетрясений XX века в этом регионе — Небитдагское ( $M = 7.2-7.5$  по разным оценкам). Его очаг располагался в нижней части земной коры (глубины 30–40 км). Интенсивность сотрясений в эпицентре достигала 8.5–9.0 баллов. В пределах эпицентральной зоны Небитдагского землетрясения за 120 лет (1880–2000 гг.) произошло по крайней мере 11 сейсмических событий с  $M = 3.7-4.8$ , которые вызывали сотрясения интенсивностью от 5 до 6–7 баллов.

Согласно имеющимся инструментальным данным, очаги землетрясений Центрального Каспия возникают на глубинах от 0 до 80 км [15]. При этом абсолютный максимум землетрясений приходится на глубины 10–15 км, некоторое возрастание числа толчков наблюдается на глубинах 30–35 км.

В работе [24] Уломов даны средние расчетные периоды землетрясений для Каспийского моря (табл. 1). Амплитудные характеристики каспийских цунами анализировались в работах [9, 10] при возможных землетрясениях с  $M < 6.5$  в пределах круговых зон сейсмической генерации, а для землетрясений с  $M \geq 6.5$  учитывалась протяженность очагов [11]. По полученным оценкам сильные землетрясения создают реальную угрозу возбуждения цунами с катастрофическими последствиями для отдельных участков побережья моря.

### НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ ЗОНЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЦУНАМИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

К потенциально возможным зонам генерации каспийских цунами естественно отнести те районы моря и прибрежные участки суши, где уровень сейсмической активности наиболее высок. На основе данных о землетрясениях за период 1931–1982 гг., взятых из работы Панахи и Каспарова [16], выполнено районирование Каспийской котловины по уровню сейсмической активности.

Установлено, что в бассейне Каспийского моря существует семь локальных зон повышенной сейсмической активности (см. работу Соловьевой и др. [23]), указанные на рис. 2. Самая крупная из них S6 (мористый край зоны) совпадает с крайним восточным участком Терско-Каспийского глубинного разлома [4] и характеризуется высокой повторяемостью сильных землетрясений. Меньшая по площади область расположена в пределах Апшеронского порога на подводном участке упомянутого разлома (S5). Для всей области порога характерна высокая повторяемость сильных землетрясений. Именно здесь, в непосредственной близости от этой высокосейсмичной

зоны, расположены эпицентры двух наиболее сильных подводных землетрясений последнего времени, произошедших 6 марта 1986 г. и 16 сентября 1989 г. [4, 5].

В западной части акватории Каспийского моря можно выделить четыре зоны наивысшей сейсмической активности, две из которых (S1 и S2) располагаются в районе западного края Скифско-Туранской платформы, а две (S3 и S4) – в области моря севернее Апшеронского п-ова (рис. 2).

На восточном побережье моря в районе залива Кара-Богаз-Гол также существует небольшая по площади зона S7 максимальных значений сейсмической активности.

Участки акватории в пределах средней и южной частей Каспийского моря со средней сейсмической активностью более обширны. Они расположены в районах Краснодарского п-ова, Апшеронского порога, западного побережья Среднего Каспия, к северу от Апшеронского п-ова, в Южно-Апшеронской области и юго-западном углу Каспийской впадины. Отметим, что сейсмоактивная зона S к югу от Апшеронского п-ова представляет интерес с точки зрения интерпретации исторических цунами. Центральная часть Южно-Каспийской впадины характеризуется низкой сейсмической активностью.

Именно эти районы можно отнести к возможным зонам сейсмической генерации цунами в Каспийском море [7, 8].

Период повторения землетрясений с  $M = 6.8$ , способных возбудить цунами на акватории Среднего и Южного Каспия, составляет 60 лет. Величина периода повторения цунамигенных землетрясений с  $M = 6.8$  в регионе Среднего и Южного Каспия колеблется по разным оценкам от 20 до 60 лет, причем последняя оценка более реалистична, поскольку она соответствует минимальным “заимствованиям” землетрясений из районов Кавказа и Копетдага и не использует данные по Северному Ирану.

Цунами 743, 918 и 957 гг. наблюдались в непосредственной близости от зоны S2. Районы проявления цунами 1876, 1939, 1986 и 1989 гг. практически совпадают с зонами наивысшей сейсмической активности S и S5. События 1868, 1902 и 1960 гг. наблюдались в области, экранированной от зон S3 и S4 Апшеронским п-овом. Однако нельзя исключить возможность прихода волн из зон S3, S4 и S к южному побережью Апшеронского п-ова в результате захвата длинных волн шельфом и их вдольберегового распространения.

Наконец, наиболее вероятное положение сейсмического источника генерации цунами при Краснодарском землетрясении 1895 г. – зона S6. Не исключено, что аномальные колебания уровня в районе Куули-Маяк (1993 г.) и в Краснодарском заливе при землетрясении 1986 г. с эпицентром

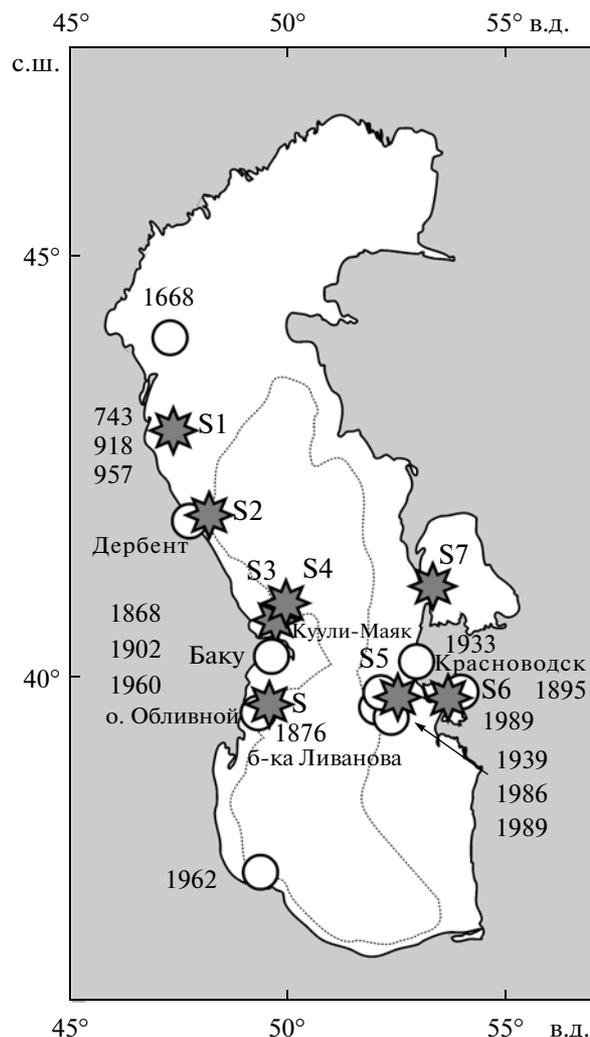


Рис. 2. Районы Каспийского моря, в которых наблюдались исторические цунами или аномальные колебания моря (светлые кружки) и зоны повышенной сейсмической активности Каспийского моря (S1, ... S7) по данным работы [16] (звездочки). S – Южно-Апшеронская зона повышенной сейсмической активности. Цифрами на рисунке указаны годы соответствующих событий.

тром в зоне S5 связаны с вдольбереговым распространением цунами и резонансной генерацией высокочастотных сейш в Краснодарском заливе.

Принимая во внимание качественный характер связи предполагаемых зон возникновения цунами с сейсмичностью в работе [16], ее нельзя считать серьезным обоснованием для прогноза и изучения цунами. При решении проблемы оценки цунамиопасности акваторий Южного и Центрального Каспия следует опираться на современную сеймотектоническую информацию. Основываясь на предпосылке, что цунами в Каспийском море могут возбуждаться коровыми землетрясениями с  $M = 6.8$  [7, 8], следует рассматривать как

**Таблица 2.** Расчетные параметры разрыва в очаге для землетрясений разных магнитуд, вычисленные по соотношениям из работы [33]

$M_S$	$L$ , км	$W$ , км	$S$ , км <sup>2</sup>	$D_{av}$ , м	$D_{max}$ , м
6.0	12.5 ± 4.5	8 ± 3	95 ± 55	0.2 ± 0.2	0.3 ± 0.3
6.5	25 ± 9	11.5 ± 4	265 ± 155	0.5 ± 0.4	0.7 ± 0.7
7.0	50 ± 18	17 ± 6	760 ± 440	1.1 ± 1.0	1.9 ± 1.9
7.5	100 ± 36	25 ± 9	2160 ± 1250	2.4 ± 2.2	4.9 ± 4.9
8.0	190 ± 72	35 ± 13	6160 ± 3580	5.2 ± 4.9	12.6 ± 12.6
8.5	380 ± 140	50 ± 18	17580 ± 10200	11.6 ± 10.8	32.4 ± 32.4

потенциальные источники цунами все зоны с  $M \geq 7$ . В Центральном Каспии таких зон три: две зоны в пределах Терско-Каспийского прогиба в западной части к северу от Апшеронского п-ова и более крупный линеймент Западного Копетдага с  $M = 8$  на востоке.

В осадочной толще Южно-Каспийского бассейна выделяются слои пониженной скорости сейсмических волн на глубинах 7–12 км и 15–20 км, указывающие на высокую пористость осадков и благоприятные условия для накопления флюидов. В верхнем из этих слоев располагается большинство очагов грязевого вулканизма, распространенного в пределах Южно-Каспийского бассейна и Челекен-Апшеронского порога [1]. Пониженные сейсмические скорости в осадочной толще, вероятно, указывают на продолжающееся интенсивное сокращение и довольно быстрое погружение консолидированной земной коры в направлении ЮЗ–СВ, которое не сопровождается необходимыми увеличением плотности осадков, что приводит к наблюдаемому нарушению изостатического равновесия в литосфере Южно-Каспийского бассейна. В пользу такой геодинамической интерпретации свидетельствует и довольно высокая подкоровая сейсмическая активность, наблюдаемая в области Челекен-Апшеронского порога.

Для оценки исходных параметров волн цунами, которые могут генерироваться сейсмическими источниками в акватории Каспийского моря, можно использовать известные соотношения из работы [33], разработанные для тектонически активных регионов земного шара с коровой сейсмичностью. Они позволяют оценить протяженность разрыва в очаге  $L$ , ширину плоскости разрыва  $W$  и площадь разрыва  $S$ , а также величины среднего  $D_{av}$  и максимального  $D_{max}$  остаточного смещения в очаге по моментной магнитуде землетрясения  $M_W$ :

$$\lg L = 0.59 M_W - 2.44 \pm 0.16 (L - \text{в км}),$$

$$\lg W = 0.32 M_W - 1.01 \pm 0.15 (W - \text{в км}),$$

$$\lg S = 0.91 M_W - 3.49 \pm 0.24 (S - \text{в км}^2),$$

$$\lg D_{av} = 0.69 M_W - 4.80 \pm 0.36 (D_{av} - \text{в м}),$$

$$\lg D_{max} = 0.82 M_W - 5.46 \pm 0.42 (D_{max} - \text{в м}).$$

В диапазоне магнитуд 6.0–8.0 различия в значениях  $M_W$  и  $M_S$  лежат в пределах стандартной ошибки определения магнитуд ( $\pm 0.2$ ) поэтому в приведенных соотношениях можно использовать с допустимой погрешностью магнитуду  $M_S$  вместо  $M_W$ . В табл. 2 приведены оценки параметров разрыва в очаге, полученные по этим соотношениям, для землетрясений с магнитудами  $M_S$ , указанными в первом столбце табл. 1.

Приведенные в табл. 2 значения среднего и максимального смещения по разрыву в очаге относятся к плоскости разрыва и в общем случае имеют как горизонтальную, так и вертикальную компоненты. Для генерации цунами существенна лишь вертикальная компонента остаточного смещения морского дна, поэтому для ее оценки необходимо задать, кроме магнитуды  $M_S$ , еще и ориентацию плоскости разрыва в очаге, т.е. механизм очага. Зная механизм очага (или задавая его из тектонических соображений) и пользуясь табл. 1 и 2, можно рассчитать вертикальную компоненту остаточного смещения морского дна в очаге и использовать это значение для моделирования генерации волн цунами.

Анализ тектонической обстановки в рассматриваемом регионе и данных об исторических землетрясениях позволяет предположить, что основную опасность в смысле генерации цунами в акватории Каспийского моря могут представлять сейсмические источники двух типов:

1. Протяженные (до ~ 200 км) очаги землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 8$ , связанные с субдукцией литосферы Южно-Каспийского бассейна под Скифско-Туранскую плиту, которые могут возникнуть в области Челекен-Апшеронского порога и несколько севернее него.

2. Менее протяженные (до ~ 50 км) очаги землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 7$ , связанные со смещениями по субвертикальным разломам в консолидированной коре нависающей Скифско-Туранской плиты.

Присутствие подобных разломов в районе Челекен-Апшеронского порога, ориентированных

вдоль береговой линии Каспия, можно предполагать, исходя из геофизических и сейсмологических данных, например, по концентрации эпицентров исторических землетрясений. Согласно табл. 2, величина среднего смещения по разрыву может составлять  $D_{av} \approx 1$  м, а согласно табл. 1, средний период повторяемости таких событий –  $T \approx 200$  лет (25%).

### КРАТКИЙ ОБЗОР ИСТОРИЧЕСКИХ СВЕДЕНИЙ О ЦУНАМИ В РАЙОНЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Природные явления, сходные с цунами, изучены недостаточно в силу их локального проявления, редкой повторяемости и практически полного отсутствия инструментальных измерений аномальных колебаний уровня моря. Как указывалось во введении, в настоящее время есть исторические свидетельства о 14-ти случаях цунами или подобных им аномальных колебаний уровня моря [7, 14, 17, 19, 23]. К сожалению, достоверность некоторых данных вызывает сомнения. Из инструментальных наблюдений только для события 1962 г. существует запись колебаний уровня у иранского побережья Каспия, полученная с помощью берегового самописца [28]. По данным визуальных наблюдений, высоты известных исторических цунами не превышали 1–2 м.

Пелиновский в работе [17] использовал эмпирические данные для Тихого океана, на основании которых показал, что высоты каспийских цунами могут достигать 0.5–2.6 м. При этом в статье [7] оценено пороговое значение магнитуды  $M$  цунамигенных землетрясений Каспийского региона как 6.8. Эта величина несколько ниже значения  $M = 7.2$ , являющегося пороговым для Тихого океана [20]. Одним из объяснений такого различия может быть разная глубина типичных очагов в регионах, поскольку от этого параметра зависит интенсивность волн цунами. Так, в пределах Курило-Камчатской зоны средняя глубина очагов цунамигенных землетрясений составляет 50 км, что обуславливает возникновение цунами только при землетрясениях с  $M \geq 7.2$  [20, 21]. В Средиземном море очаги землетрясений, в том числе и сильных, приурочены к верхней части земной коры (глубины 10–15 км), и здесь цунамигенными становятся землетрясения с  $M = 6.8 \pm 0.15$  [22].

Согласно имеющимся данным из приведенных выше источников, средняя глубина залегания очага в Каспийском регионе составляет 10–15 км. Следовательно, как и в Средиземном море, здесь возможно возникновение цунами при землетрясениях с  $M = 6.8 \pm 0.15$ . Можно предполагать, что известные в настоящее время случаи проявления цунами охватывают лишь малую часть произошедших на Каспии природных явлений этого типа. Здесь мы упомянем наиболее яркое собы-

тие из известных 14-ти, районы проявления которых и годы событий представлены на рис. 2.

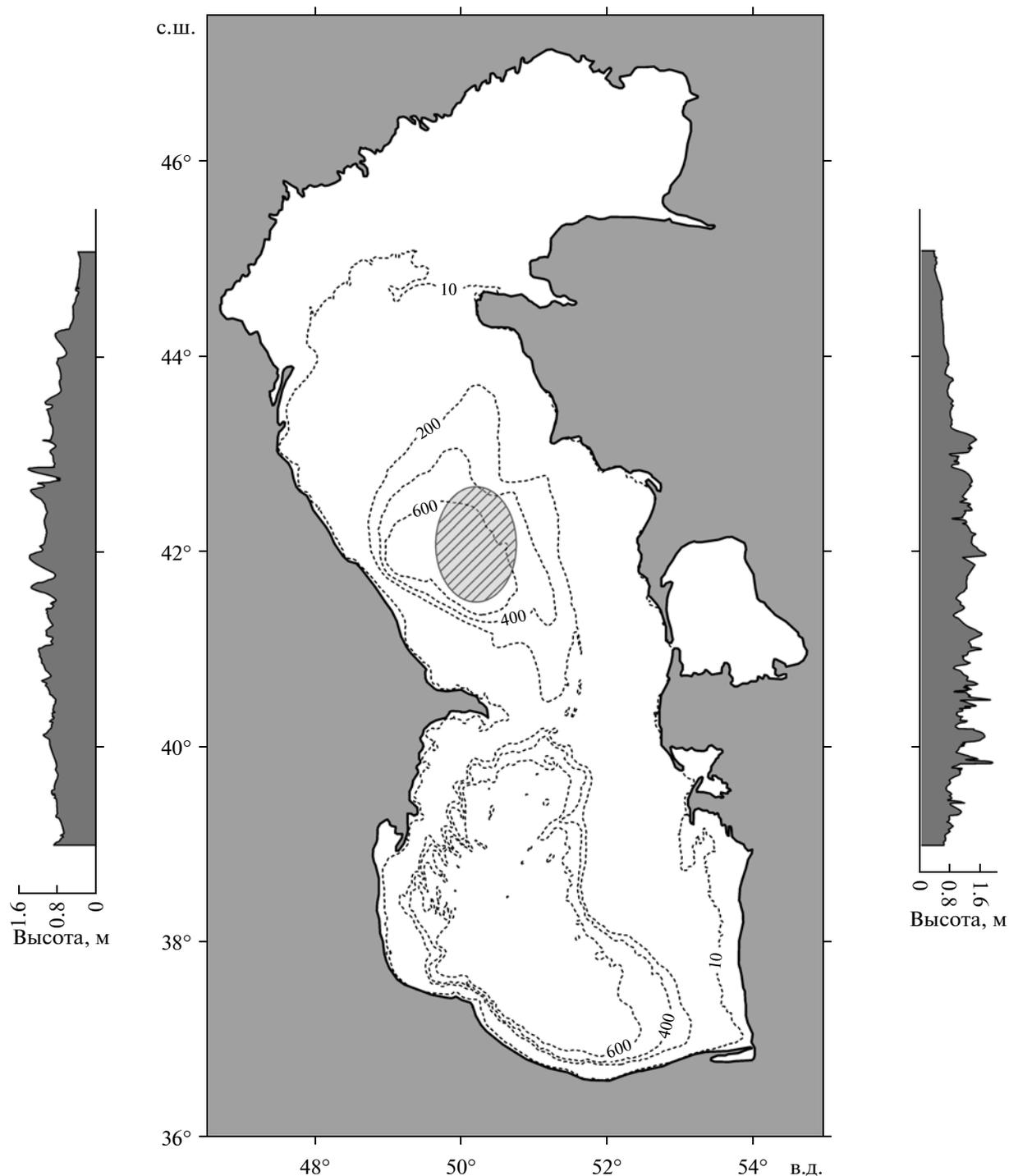
**1895 г., 8 июля** (27 июня по ст.с.). Сильнейшее известное Каспийское (Красноводское) землетрясение с эпицентром вблизи г. Красноводска ( $39.5^\circ$  с.ш.,  $53.7^\circ$  в.д.,  $M = 8.2$ ,  $h = 60$  км) [6, 15]. По другим данным, эпицентр землетрясения располагался под одноименным заливом ( $39.8^\circ$  с.ш.,  $53.5^\circ$  в.д.) [27]. При этом сотрясения охватили большую площадь, в Красноводске землетрясение проявилось с интенсивностью 9 баллов [15, 27].

По описанию очевидцев, землетрясение сопровождалось затоплением берега моря. Сразу после него северная и западная части п-ова Узун-Ада быстро покрылись водой, залившей постройки и образовавшей трясину. С моря хлынули огромные волны и затопили здания и пристани, на улицах в грунте образовались трещины до 3 аршин (2.1 м) шириной, из которых ключом била вода. Много зданий было разрушено. Несколько домов снесло в море; разорвались трубы нефтепроводов. Это описание говорит в пользу предположения об эпицентре под заливом, а не под тыловой частью п-ова Челекен. Вода в заливе при сильном волнении высоко поднялась и дошла до полотна железной дороги [3, 13].

Можно заключить, что исторические данные наблюдений подтверждают случаи проявления волн цунами в Каспийском море и нельзя исключать возможность их возникновения и в будущем. Хотя известные к настоящему времени события не носили катастрофического характера, некоторые из них сопровождалось ощутимыми негативными экономическими последствиями для региона. Повторяемость этого природного явления в регионе сравнительно невелика. Цунами отмечены преимущественно в Среднем Каспии и в зоне Апшеронского порога, которые отнесены к районам повышенной сейсмической активности моря [16, 24, 26]. Цунами генерировались источниками землетрясений, расположенных как в море, так и на суше. По немногочисленным визуальным наблюдениям, высоты исторических цунами не превысили 1–2 м.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Численное моделирование динамики цунами стало стандартным приемом в исследовании цунами и при оценке цунамиопасности отдельных участков побережья. Современные численные методы в гидродинамике составляют мощную компьютерную технологию, которая доказала способность создавать точные модели исторических цунами при условии учета полевых наблюдений и инструментальных данных. Моделирование воз-



**Рис. 3.** Пример расчета максимальных значений высоты цунами. Модельный источник (заштрихованная область) располагался в Каспийской котловине. Слева и справа представлены графики распределения высот волны на изобате 10 м.

можного цунами с источником, расположенным в акватории Каспия, выполнялось с помощью численной модели, основанной на явной разностной схеме. Расчетная область была ограничена прямоугольником  $36^{\circ}$ – $47.5^{\circ}$  с.ш.,  $46.5^{\circ}$ – $55^{\circ}$  в.д. В качестве основного массива глубин использовалась база данных батиметрии ЕТОРО–6.2 с 30-секунд-

ным пространственным разрешением (по широте и долготе).

Для расчетов использовалась модель, являющаяся разновидностью хорошо известной программы TUNAMI для численного расчета распространения волн цунами [30], в которой реализована конечно-разностная аппроксимация линейных

**Таблица 3.** Высоты волны цунами в основных пунктах каспийского побережья СНГ, рассчитанные исходя из 25, 5 и 1% риска выхода за рамки интервального прогноза (50 лет)

Город	Широта	Долгота	Высота волны 25%, м	Высота волны 5%, м	Высота волны 1%, м
Туркменбаши	40.02	52.97	0.96	3.65	5.00
Актау	43.65	51.15	0.74	2.82	3.85
Форт-Шевченко	44.52	50.27	0.48	1.83	2.50
Махачкала	42.98	47.48	1.00	3.80	5.20
Каспийск	42.88	47.63	0.96	3.65	5.00
Избербаш	42.57	47.87	1.10	4.18	5.72
Дербент	42.07	48.30	1.32	5.02	6.87
Сумгаит	40.59	49.64	1.26	4.79	6.56
Баку	40.37	49.84	0.95	3.61	4.94

уравнений мелкой воды в координатах, соответствующих меркаторской проекции [29]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial (V \cos \varphi)}{\partial y} \right] = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} g \vec{\nabla} \zeta, \quad (3)$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_0$  – текущая и “средняя” широта,  $x, y$  – зональная и меридиональная координаты,  $\mathbf{U} = (U, V)$  – вектор горизонтального потока жидкости, интегрированный по глубине ( $h$ ),  $\zeta$  – отклонение свободной поверхности,  $g$  – ускорение свободного падения,  $t$  – время. Решается задачи Коши, т.е. предполагается, что в начальный момент  $t = 0$  жидкость находится в состоянии покоя и задано начальное отклонение свободной поверхности океана  $\zeta_0(x, y)$ . На береговой границе  $G$  задается условие непротекания:

$$U_n = 0 \text{ на } G. \quad (4)$$

Шаг по времени был выбран равным 2 с, что примерно соответствует 1/3 величины, задаваемой условием устойчивости Куранта. Как обычно принято в таких моделях, оценка высоты волны цунами выполнялась на 10-метровой изобате. Накат волны и расчет заплеска представляет собой отдельную сложную проблему, которая может быть решена только в рамках локального цунами-районирования, когда на основе нелинейной модели наката и подробной карты батиметрии необходимо рассчитать набегание волны на сухой берег.

В данной работе в качестве источника был выбран вариант, при котором начальное смещение поверхности моря представляет вытянутый купол эллипсоидной формы, в нем высота смещения уменьшается при удалении от центра как

$D = e^{-\frac{(\Delta x - a)^2}{a^2} - \frac{(\Delta y - b)^2}{b^2}}$ , где  $\Delta x, \Delta y$  – горизонтальные смещения относительно центра эллипсоида,  $a$  и  $b$  – параметры эллипса. Фактически при расчетах

максимальное смещение принималось равным 1 метру. Учитывая линейность использованной модели, перерасчет на большие амплитуды смещения дна не представляет труда.

На рис. 3 приведен пример расчета максимальных высот волны цунами в акватории Каспия. При этом источник эллипсоидной формы располагался в Каспийской котловине. Видно, что в отдельных точках побережья высота цунами достигала 1.5 м.у

Численные расчеты, выполненные в рамках данного исследования, использовались для вычисления значений высот цунами в отдельных пунктах побережья, взятые как абсолютный максимум из всех возможных максимальных значений высоты волны, рассчитанных для различных источников. Были использованы 20 пробных источников, расположенных в зоне максимальной сейсмичности (Апшеронский порог).

### ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ДЛЯ ОСНОВНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ СНГ ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЯ

Ввиду недостаточности статистики наблюдений о проявлении цунами на побережье Каспия, оценка цунамиопасности выполнялась на основе анализа данных о повторяемости сильных землетрясений, приведенных в табл. 1, и эмпирических соотношений между магнитудой землетрясения и параметрами источника цунами (табл. 2). Выполненные численные эксперименты по моделированию распространения цунами показали, что экстремальные высоты волн могут достигать на отдельных участках побережья ~10 м для событий, соответствующих протяженным (до ~200 км) очагам землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 8$  с периодом повторяемости  $T \approx 1600$  лет. Для менее протяженных (до ~50 км) очагов землетрясений с магнитудой  $M_S \sim 7$  высоты волн могут достигать 3 м.

Исходя из 5% и 1% риска выхода за рамки интервального прогноза, магнитуда землетрясения (50 лет) составляет соответственно  $M_{5\%} = 7.8$  и  $M_{1\%} = 8.0$ . Оценка среднего остаточного смещения при этом равна  $D_{5\%} = 3.8$  м,  $D_{1\%} = 5.5$  м. Результаты численного моделирования сведены в табл. 3, где приведены 25%, 5% и 1% высоты волн для основных пунктов побережья Каспия.

В данной работе оценка цунамиопасности выполнялась на основе анализа сейсмичности региона. Поэтому по аналогии с понятием сейсмического потенциала можно говорить о “максимальной” высоте цунами на побережье. Согласно исследованию [25], предельная магнитуда сейсмического толчка в Каспийском регионе не может превосходить  $M = 8.0$ . То есть фактически оценка 1% риска фактически характеризует максимально возможные высоты цунами на побережье.

### ВЫВОДЫ

Выполненный анализ данных наблюдений и результаты численного моделирования показали, что Каспийское море относится к районам с умеренной цунамиопасностью. Наиболее вероятной зоной генерации волн, угрожающих населенным пунктам СНГ, является область Апшеронского порога, где отмечается максимальный уровень сейсмичности. Согласно отрывочным историческим свидетельствам, на побережье Каспия наблюдались волны с высотой до 2 м. К сожалению, по этим неполным данным невозможно выполнить адекватный статистический анализ и оценить вероятностные характеристики проявления цунами на побережье. Принимая во внимание характер сейсмичности и результаты численного моделирования, в данном исследовании сделан вывод об относительно высоком уровне цунамиопасности на побережье Каспийского моря. По нашей оценке, максимальные высоты волн могут достигать величины порядка 10 м на отдельных участках побережья, при этом цунами с высотой 3 м могут возникать на Каспии с повторяемостью около 200 лет.

Следует отметить, что в работе не рассматривались возможные источники, расположенные в южной части Каспия и непосредственно угрожающие побережью Ирана. В свою очередь северная часть Каспия хорошо защищена обширным мелководьем, препятствующим распространению длинных волн типа цунами, соответственно расчеты высот волн там не выполнялись. Таким образом, представленные выводы о цунамиопасности касаются центральной части Каспийского побережья: России, Азербайджана, Казахстана и Туркменистана.

Изложенные выводы о цунамиопасности носят предварительный характер. Они основаны на

линейной гидродинамической модели распространения цунами, которая не может адекватно описывать процессы распространения волны по мелководью и наката ее на берег. Фактически приведенные расчетные значения высоты цунами относятся лишь к 10-метровой изобате. Таким образом, результаты моделирования могут рассматриваться как приближительная оценка уровня цунамиопасности. Очевидно, что более точное локальное цунамирайонирование должно выполняться с помощью нелинейных гидродинамических моделей основанных на подробных данных о рельефе прибрежных областей, с учетом параметров шероховатости дна, возможного обрушения волн и пр.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 12–05–00733 и Министерства образования и науки (договор № 11.G34.31.0007).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранова Е.П., Косминская И.П., Павленкова Н.И. Результаты переинтерпретации материалов ГСЗ по южному Каспию // Геофизический журн. 1990. Т. 12. № 5. С. 60–67.
2. Гальперин Е.И., Косминская И.П., Кракшина Р.М. Основные характеристики глубинных волн, зарегистрированных при глубинном сейсмическом зондировании в центральной части Каспийского моря // Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в СССР. М.: Гостоптехиздат, 1962. С. 227–250.
3. Голинский Г.Л. Западная Туркмения. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. С. 489–494.
4. Голинский Г.Л., Кондорская Н.В., Захарова А.И. и др. Каспийское землетрясение 6 марта 1986 г. // Землетрясения в СССР в 1986 году. М.: Наука, 1989. С. 58–77.
5. Голинский Г.Л., Мурадов Ч.М., Петрова Н.В. и др. Каспийское землетрясение 16 сентября 1989 г. // Землетрясения в СССР в 1989 году. М.: Наука, 1993. С. 44–61.
6. Голинский Г.Л., Эсенов Э.М. О Кучанском землетрясении 1893 г. // Материалы из ИСТАРХ ЦГА ТССР, фонды ИФЗиА, Ашхабад, 1968.
7. 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.
8. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Общая характеристика цунами в Каспийском море // Морск. гидрофиз. журн. 2000. № 3. С. 364–369.
9. 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. Т. 41. № 3. С. 364–369.
10. 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.

11. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Особенности проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // Изв. РАН, Физика Земли. 2003. Т. 39. № 4. С. 308–314.
12. Иванова Т.П., Трифонов В.Г. Сейсмотектоника и современные колебания уровня Каспийского моря // Геотектоника. 2002. № 2. С. 27–42.
13. Ивановский И.К. Красноводское землетрясение 27 июня 1895 г. // Изв. Русского географического общества. 1899. Приложение II. 35 с.
14. Никонов А.А. Бывают ли цунами в Каспийском море? // Природа. 1996. № 1. С. 72–73.
15. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 536 с.
16. Панахи Б.М., Каспаров В.А. Вопросы сейсмического режима Каспийского моря // Изв. АН Азербайджанской ССР. 1988. № 1. С. 91–98.
17. Пелиновский Е.Н. Предварительные оценки цунамиопасности Каспийского моря. Препринт № 480. ИПФ РАН: Н. Новгород, 1999. 24 с.
18. Сейсмологический бюллетень (ежегодный) за 21–30 ноября 2000 г. Обнинск: Геофизическая служба РАН. Центральная опытно-методическая экспедиция. 2000.
19. Смирнова М.Н., Бражник В.А., Керимов И.А. Использование буровых и геофизических материалов при решении задач сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 139–142.
20. Соловьев С.Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Волны цунами. Южно-Сахалинск: Труды СахКНИИ, 1972. Вып. 29. С. 7–47.
21. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР. 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. 136 с.
22. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С., и др. Цунами в Средиземном море. 2000 г. до н.э.–1991 г. М.: Научный мир, 1997. 139 с.
23. Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., и др. Цунами в Каспийском море. Препринт. М.: ИО РАН, 2004. 51 с.
24. Уломов В.И. Трехмерная модель динамики литосферы, структуры сейсмичности и изменений уровня Каспийского моря // Физика Земли. 2003. № 5. С. 5–17.
25. 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. Сейсмические процессы и катастрофы / Отв. ред. акад. Глико А.О. Т. 1: М.: ИФЗ РАН, 2008. 404 с.
26. Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря // Физика Земли. 1999. № 12. С. 76–82.
27. Шебалин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 54 с.
28. Ambraseys N.N. The Buyin-Zara (Iran) earthquake of September 1962: A field report // Bull. Seism. Soc. America. 1963. V. 53. № 4. P. 705–740.
29. Fine I.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E. et al. The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929, preliminary analysis and numerical study // Marine Geology. 2005. V. 215. P. 45–57.
30. Imamura F. Review of tsunami simulation with a finite difference method // Long-Wave Runup Models / Eds. Yeh H. et al. NY.: World Scientific, River Edge, 1995. P. 43–87.
31. Jackson F., Priestley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian basin // Geophys. J. Intern. 2002. V. 148. P. 214–245.
32. Soltanpour M., Rastgoftar E. Study of tsunami attacks on neighboring countries of Caspian Sea caused by a probable submarine landslide / Proceedings of the 11-th International Coastal Symposium, Szezecin, Poland // J. Coastal Res. 2011. Special Issue № 64. P. 1195–1199.
33. Wells D.L., Coppersmith K.L. New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84. P. 974–1002.

## Tsunamis in the Central Part of the Caspian Sea

E. A. Kulikov, I. P. Kuzin, O. I. Yakovenko

The paper describes the geotectonics of the Caspian Sea basin and the seismicity of its central part. The seismicity analysis enables us to identify the most probable zones of tsunami generation. We also present a brief review of historical records of tsunamis in the Caspian Sea. In order to estimate the tsunami risk we used the method of numerical hydrodynamic modeling, taking into account the real topography of the Caspian Sea. Computation of the wave field for the possible tsunamis occurring in the central part of the Caspian Sea allowed us to estimate the maximum expected heights of the waves along the coast of the CIS countries (Russia, Azerbaijan, Kazakhstan and Turkmenistan). On the basis of the earthquake statistics in the region and the results of numerical experiments, we showed that the extreme wave heights can reach 10 m in certain parts of the coast. Such extreme events correspond to prolonged (up to ~200 km) seismic sources with  $M_S \sim 8$  and recurrence period  $T \approx 1600$  years. For shorter sources (< 50 km) with earthquake magnitudes  $M_S \sim 7$  and recurrence period of 200 years tsunami wave heights are expected to be up to 3 m.