

Цунамиопасность Крымского побережья Черного моря и Керченского пролива при катастрофических цунамигенных землетрясениях, близких по локализации к историческому Ялтинскому землетрясению 12 сентября 1927 года

Е. А. Баранова¹, Р. Х. Мазова^{1, 2, *}

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

*E-mail: raissamazova@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.06.2019 г., после доработки – 01.12.2019 г.

Цель. Основной целью данной работы является получение оценки цунамиопасности для района расположения недавно построенного Крымского моста в Керченском проливе, поскольку до настоящего времени при численном моделировании цунамигенных землетрясений в акватории Черного моря фактически не рассматривалась цунамиопасность для Керченского пролива, если не считать часть акватории на входе в него.

Методы и результаты. Для оценок цунамиопасности Керченского пролива и особенно района расположения построенного Крымского моста в представленной работе рассматривается как историческое цунамигенное катастрофическое землетрясение на юго-востоке Крымского п-ова, произошедшее 12 сентября 1927 г., так и возможные сильные землетрясения с близкими к указанному магнитудами и локализациями очага. Используя имеющиеся данные по локализации землетрясения 12 сентября 1927 г. и его интенсивности, был смоделирован источник этого землетрясения и проведено, в рамках нелинейных уравнений мелкой воды, численное моделирование генерации и распространения волн цунами от одноблочного и двублочного сейсмических источников по акватории Черного моря вдоль Крымского п-ова, на входе в Керченский пролив и в его акватории. Аналогично были смоделированы сейсмические источники близкой локализации для двух возможных цунамигенных землетрясений на юго-востоке Крымского п-ова.

Выводы. Для всех рассмотренных сценариев проведено численное моделирование генерации и распространения волн цунами по рассматриваемым участкам акватории, построены гistogramмы распределения максимальных высот заплесков волн вдоль побережий Крымского полуострова и Керченского пролива. Показано, что в районе западных опор Крымского моста высоты волн цунами для всех сценариев не превышают 0,3–0,5 м, а в районе восточных опор размах возможных высот волн лежит в диапазоне 0,6–1,95 м. Проведено сравнение с данными, полученными другими авторами, по высотам волн в ряде пунктов Черноморского побережья вблизи Крымского п-ова и на входе в Керченский пролив.

Ключевые слова: очаг землетрясения, численное моделирование, генерация волн цунами, гistogramмы максимальных высот волн цунами, Крым, Керченский пролив.

Для цитирования: Баранова Е. А., Мазова Р. Х. Цунамиопасность Крымского побережья Черного моря и Керченского пролива при катастрофических цунамигенных землетрясениях, близких по локализации к историческому Ялтинскому землетрясению 12 сентября 1927 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 123–138. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-123-138

Tsunami Hazard for the Crimean Coast of the Black Sea and the Kerch Strait at the Catastrophic Tsunamigenic Earthquakes, the Locations of which are Close to that of the Historical Yalta Earthquake on September 12, 1927

E. A. Baranova¹, R. Kh. Mazova^{1, 2,*}

¹Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia
*e-mail: raissamazova@yandex.ru

Purpose. The main purpose of the work is to assess a possible tsunami hazard for the region of location of the Crimean Bridge constructed across the Kerch Strait, since up to present, numerical simulations of the tsunamigenic earthquakes in the Black Sea have never taken the Kerch Strait region (except for the water area at the strait entrance) into consideration as a possible object for a tsunami hazard.

Methods and Results. To assess a tsunami hazard for the Kerch Strait and, particularly, for the region of location of the constructed Crimean Bridge, the present paper considers the historical catastrophic tsunamigenic earthquake in the southeastern part of the Crimea Peninsula on September 12, 1927 as well as possible strong earthquakes, the source locations and magnitudes of which can be close to those of the above-mentioned one. The available data on localization and intensity of the earthquake on September 12, 1927 allowed to model the source of such an earthquake. Besides, within the framework of the non-linear shallow water equations, simulated were the tsunami generation and the tsunami waves' propagation from the single- and two-block seismic sources in the Black Sea along the Crimea Peninsula, at the Kerch Strait entrance and in its water area. The seismic sources of close localization were similarly simulated for two possible tsunamigenic earthquakes in the southeastern part of the Crimea Peninsula.

Conclusions. For all the considered scenarios, generation and propagation of the tsunami waves over the water area regions under study were numerically simulated, the histograms of distribution of the wave run-up maximum heights along the Crimea Peninsula and the Kerch Strait coasts were constructed. It is shown that for all the scenarios, in the region of the Crimean Bridge western pillars the tsunami wave heights do not exceed 0.3–0.5 m, whereas in the region of its eastern pillars, possible wave heights are within the range 0.6–1.95 m. The results represented in the paper are compared with the available data on the wave heights in a number of settlements of the Crimea Peninsula coast and at the Kerch Strait entrance, obtained by the other authors.

Keywords: earthquake source, numerical simulation, generation of tsunami waves, histogram of tsunami wave maximum heights, Crimea, Kerch Strait.

For citation: Baranova, E.A. and Mazova, R.Kh., 2020. Tsunami Hazard for the Crimean Coast of the Black Sea and the Kerch Strait at the Catastrophic Tsunamigenic Earthquakes, the Locations of which are Close to that of the Historical Yalta Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(2), pp. 110-125. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-110-125

Введение

Ночью 12 сентября 1927 г. на побережье Крымского п-ова произошло катастрофическое цунамигенное землетрясение с магнитудой, лежащей в интервале $M = 7-8$ (см., напр., [1–6]). Его центр находился под морским дном, южнее Ялты, и был вытянут вдоль побережья, приблизительные координаты эпицентра $44,4^\circ$ с. ш., $34,5^\circ$ в. д. Это землетрясение стало настоящей катастрофой в Крыму: по данным исследователей, были погибшие (более шестидесяти человек), раненые и пострадавшие (более семисот человек), а также огромные разрушения. Землетрясение ощущалось за пределами полуострова. В Ялте и ее окрестностях магнитуда землетрясения достигала 8, в Севастополе, Симферополе и Алуште 7, в Феодосии и Евпатории 6, в Керчи магнитуда была близка к 5 [1–4].

В архиве Ялты есть воспоминания очевидцев данного события: «...Необычное при абсолютно спокойной погоде волнение в виде небольшой зыби, внешне похожего на «кипение моря», заставило даже самых смелых (рыбаков) вернуться на побережье. В полночь по всему побережью завывали собаки. Через 15 минут громкий гул прервал завывание, земля содрогнулась. В домах лопались стекла, падала штукатурка, трещали полы и потолки, гремели железные листы на крышах, падали каменные стены домов. Из открытых окон слышались крики людей. После первого толчка, который длился не более 10 секунд, последовал второй. Люди стали выбегать из своих домов, в которых трещали стены, падала мебель, рухнули балконы и карнизы, сразу же в городе погас свет. Продолжающиеся удары стихии, рушащиеся здания, стоны раненых, вызвали чрезвычайную панику...» [3]. В горах произошли оползни и сели, следы которых, как и на горе Демерджи, в горах близ Судака, находят и через 90 лет. До полудня 12 сентября 1927 г. произошло 27 сильных толчков. Всего за несколько дней было зарегистрировано более 200 толчков. Наиболее мощные подземные толчки привели к разрушению прибрежной полосы суши от Алушты до Севастополя. В районе Ялты пострадали практически все каменные здания. Общий ущерб Южного берега Крыма был оценен примерно в 50 млн. рублей [4]. Афтершоки этого землетрясения, произошедшего в Крыму в ночь с 11 на 12 сентября, оставили без крова 48% жителей южнобережных сел и селений*.

Оценкам сейсмической и цунамиопасности Черного моря, как российско-го, так и других побережий данной акватории посвящено множество работ (см., напр., [7–18]). Однако, несмотря на предложенные методы аналитических оценок и модели для численного моделирования генерации и распространения волн цунами, вопрос о возможной опасности черноморских цунами остается актуальным, в частности, в связи с эксплуатацией недавно построенного Крымского моста через Керченский пролив.

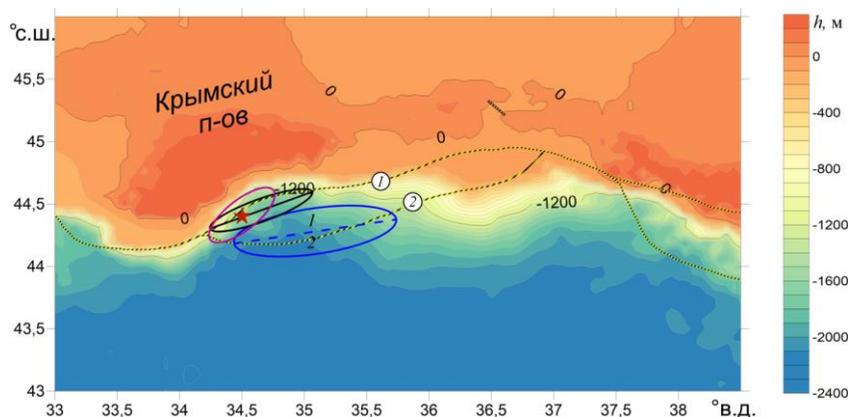
В настоящей работе рассматривается цунамиопасность района Керченского пролива и недавно построенного Крымского моста при возможном повторении катастрофического землетрясения, подобного произошедшему 12 сентября 1927 г., на юго-востоке Крымского п-ова с близкой к историческому землетрясению локализацией очага. Сложные геологические условия – сейсмичность, тектонический разлом, слабые грунты [19–21] требуют наиболее детального анализа всех возможных событий, влияющих на сейсмо- и цунамиустойчивость недавно построенного уникального сооружения. В связи с этим в работе детально рассматривается возможность повторения исторического катастрофического события 12 сентября 1927 г. с численным моделированием очагов землетрясения различной конфигурации при сохранении локализации очага на юго-востоке Крымского полуострова.

Постановка задачи

В работе проанализированы три возможных сценария распространения цунами для выбранных локализаций источников. Согласно Сценарию 1, для

*Сидоренко А. В. Геология СССР. Том VIII. Крым. Часть I. Геологическое описание. Изд-во «Недра», 1969. 576 с.

моделирования источника цунами был выбран сейсмический очаг эллиптической формы, расположенный, в соответствии с историческими данными, южнее Ялты и вытянутый вдоль побережья с приблизительными координатами эпицентра $44,4^\circ$ с. ш., $34,5^\circ$ в. д. (см., напр., [1, 5, 6]) (показан фиолетовым цветом на рис. 1). Рассматривалось землетрясение с магнитудой $M = 7$. Согласно Сценарию 2, с локализацией очага на этом же разломе было рассмотрено гипотетическое землетрясение с магнитудой $M = 7,5$, очаг состоял из двух полуэллиптических блоков, причем линия разделения блоков пересеклась с линией разлома земной коры (черная линия на рис. 1).



Р и с. 1. Район Крымского п-ова и Керченского пролива на батиметрической карте Черного моря. Черно-желтые кривые – линии разломов в северо-восточной части Черного моря, эллипсы – локализация моделируемых очагов землетрясений, красная звездочка – эпицентр исторического землетрясения 1927 г.

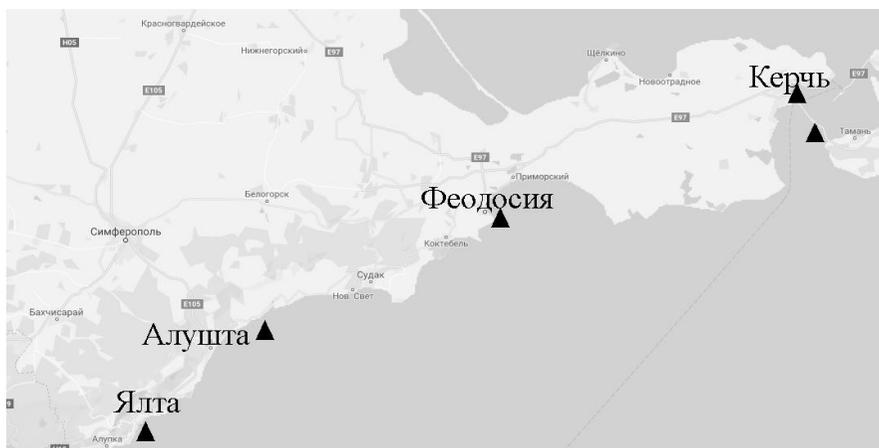
Fig. 1. The regions of the Crimean Peninsula and the Kerch Strait on the bathymetric map of the Black Sea. Black-yellow curves indicate the fault lines in the northeastern Black Sea, ellipses – localization of the simulated earthquake source, red asterisk – localization of the historical earthquake (1927) epicenter

Гипотетический очаг землетрясения с магнитудой $M = 8$, расположенный в дальней зоне активных разломов земной коры вблизи Крымского п-ова, рассмотрен нами в Сценарии 3. Аналогично Сценарию 2 очаг землетрясения представляет собой эллипс, разделенный на два блока линией, совпадающей с большей осью эллипса. Локализация очага для Сценария 3 показана синей линией на рис. 1.

Для детального изучения волновых характеристик при рассмотрении данных сценариев в районе западных и восточных опор Крымского моста и в некоторых пунктах вдоль побережья Крыма были выставлены виртуальные мареографы (рис. 2), которые регистрировали изменение уровня воды вблизи моста на трехметровой изобате.

С использованием формул Wells [22] и *Iida*** были получены размеры очагов и оценочное смещение в них земной коры при рассматриваемых магнитудах землетрясений (см., напр, [13, 15]). Полученные данные приведены в табл. 1. У блочных очагов (сценарии 2 и 3) нумерация блоков обозначена цифрами 1 и 2 соответственно (рис. 1).

**Вольцингер Н. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 271 с.



Р и с. 2. Локализация виртуальных мареографов (▲) вдоль Крымского полуострова и в Керченском проливе

F i g. 2. Localization of the virtual tide gauges (▲) along the Crimean Peninsula and in the Kerch Strait

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Параметры моделируемых очагов землетрясений
Parameters of the simulated earthquake sources

Номер сценария / Scenario number	Магнитуда / Magnitude	Длина, км (полуось) / Length, km (semi-axis)	Ширина, км (полуось) / Width, km (semi-axis)	Высота подъема, м / Rise height, m		Время подъема, с / Rise time, s	
1	7,0	34	12	1		30	
2	7,5	48,5	18	блок 1 / block 1	блок 2 / block 2	блок 1 / block 1	блок 2 / block 2
				-1,0	2,5	30	30
3	8,0	73,0	20	блок 1 / block 1	блок 2 / block 2	блок 1 / block 1	блок 2 / block 2
				-1,5	4,5	30	30

Численное моделирование исторического цунамигенного землетрясения в Крыму 12 сентября 1927 г. с $M = 7$ и очагом, локализованным в зоне разломов земной коры вблизи Крымского п-ова (Сценарий 1)

Для описания процесса генерации и распространения волны, вызванной движениями блоков-клавиш в сейсмическом источнике, была использована нелинейная система уравнений мелкой воды в двумерной постановке (см., напр., [13, 15]). При численном описании генерации и распространения волны цунами по акватории использовалась схема, построенная по аналогии с разностной схемой *Sielecki* [23]. Вводится расчетная сетка с пространственными интервалами Δx , Δy и с шагом по времени Δt (см., напр., [23]). В расчетах, представленных в данной работе, использовалась батиметрия Черного моря, пространственный шаг в которой составил приблизительно 900 м. В последней мористой точке на глубине 3 м поставлено условие полного от-

ражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смещения волнового уровня.

Для моделирования источника цунами исторического Ялтинского землетрясения был рассмотрен сейсмический источник, параметры которого соответствуют данным землетрясения 12 сентября 1927 г. Расположение сейсмического очага для этого сценария приведено на рис. 3, *a*. Эпицентр, согласно историческим данным, располагался на линии *I* разлома (показан фиолетовой линией на рис. 1). При реализации Сценария *I* блок эллиптической формы поднимался на высоту 1 м за 30 с (табл. 1).

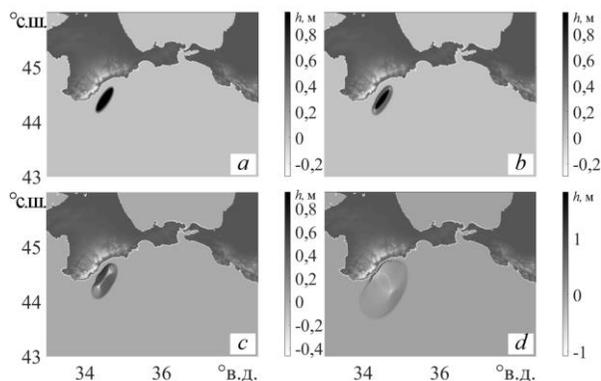
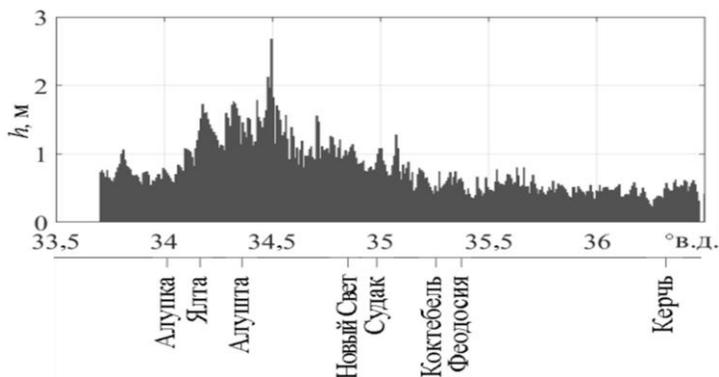


Рис. 3. Генерация очага цунами и положение фронтов волн цунами в акватории Черного моря по Сценарию *I* ($M=7$) для четырех моментов времени: *a* – $t=30$ с; *b* – $t=1$ мин; *c* – $t=2$ мин; *d* – $t=7$ мин
Fig. 3. Generation of tsunami source and position of the tsunami wave fronts in the Black Sea water area, Scenario *I* ($M=7$) for 4 time moments: *a*) $t=30$ s; *b*) $t=1$ min; *c*) $t=2$ min; *d*) $t=7$ min

Хорошо видно (рис. 3), что к берегу идет волна возвышения дугообразной формы, которая достигает побережья Крыма через 7 мин после начала генерации волны цунами. Максимальная высота волны при приближении к берегу (до 0,8 м) наблюдается в районе Алушты (рис. 3, *c*).

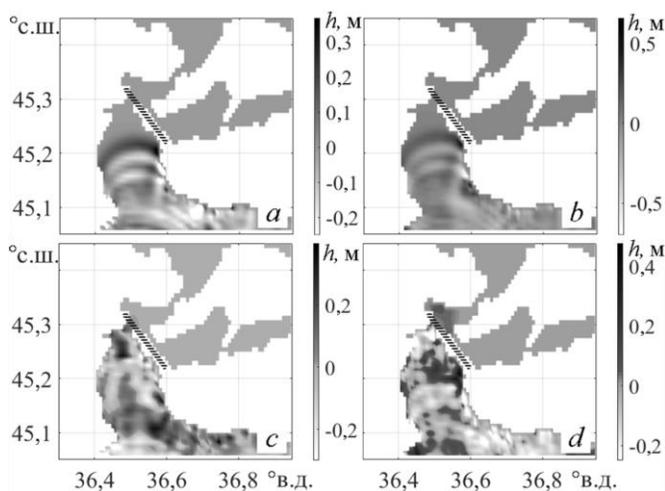
На рис. 4 приведена гистограмма распределения максимальных высот волн цунами вдоль Крымского п-ова при данном моделировании для магнитуды землетрясения $M=7$. Хорошо видно, что пик высоты для Сценария *I* составил 2,7 м вблизи Алушты. Наибольшие высоты наблюдаются на отрезке $34,2^{\circ}$ – $34,6^{\circ}$ в. д., в районе Ялты и Алушты, которые, по историческим данным, сильно пострадали. Далее по побережью от Коктебеля до Керчи (расположенной у входа в акваторию Керченского пролива) высоты волн не превышают 0,8 м.

При подходе к Керченскому проливу высоты волн значительно уменьшаются и в среднем не превышают 0,4 м. В начале распространения волны в акватории Керченского пролива ее передний фронт имеет форму дуги. При движении волны в проливе ее высота уменьшается, и передний фронт подходит к восточным опорам Крымского моста с высотой примерно 30 см (рис. 5, *d*), к западным опорам – с высотой примерно 20 см (рис. 5, *c*). Через 2 ч после начала распространения волна проходит Крымский мост и продолжает движение в сторону Азовского моря.



Р и с. 4. 2D-гистограмма распределения максимальных высот волн на трехметровой изобате у побережья Крыма по Сценарию 1 ($M = 7$)

F i g. 4. 2D histogram of distribution of the wave maximum heights on the 3-meter isobath nearby the Crimean coast, Scenario 1 ($M = 7$)



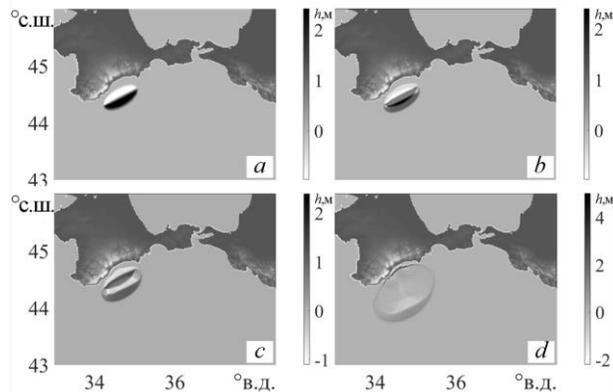
Р и с. 5. Положение фронтов волн цунами в акватории Керченского пролива по Сценарию 1 ($M = 7$): *a* – при $t = 1$ ч 35 мин; *b* – при $t = 1$ ч 40 мин; *c* – при $t = 2$ ч; *d* – при $t = 2$ ч 20 мин. Темная линия – схематическое изображение положения моста

F i g. 5. Position of the tsunami wave fronts in the Kerch Strait water area, Scenario 1 ($M = 7$): *a*) $t = 1$ h 35 min; *b*) $t = 1$ h 40 min; *c*) $t = 2$ hrs; *d*) $t = 2$ hrs 20 min. Dark line denotes schematic location of the bridge

Численное моделирование цунами с гипотетическим очагом землетрясения ($M = 7,5$), локализованным в зоне разломов земной коры вблизи Крымского п-ова (Сценарий 2)

При реализации Сценария 2 был использован модельный сейсмический эллиптический очаг (черная линия на рис. 1), разделенный на две части по большей оси эллипса, которая совпадает с линией 1 разлома земной коры. Первым начинает движение блок (рис. 1), ориентированный в сторону берега. Движение происходит за 30 с (табл. 1), в течение этого времени блок равно-

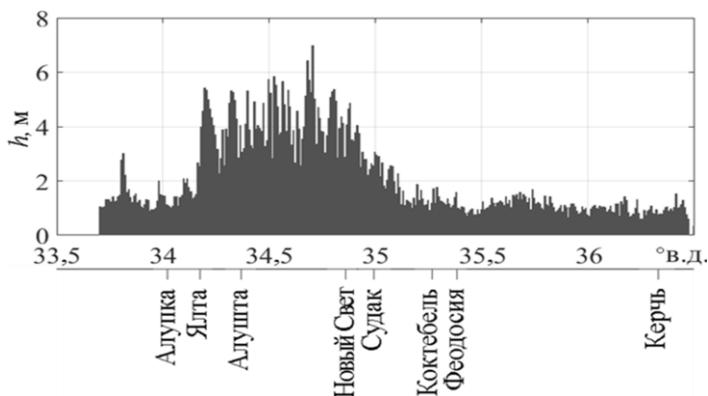
мерно опускался вниз на 1 м. Одновременно с этим движением второй блок, ориентированный к морю, поднимался на высоту 2,5 м также за 30 с. На рис. 6 можно видеть генерацию очага цунами при реализации Сценария 2 и распространение фронтов волн от данного очага.



Р и с. 6. Генерация очага цунами и положение фронтов волн цунами в акватории Черного моря по Сценарию 2 ($M = 7,5$) для четырех моментов времени: $a - t = 30$ с; $b - t = 1$ мин; $c - t = 2$ мин; $d - t = 7$ мин

Fig. 6. Generation of tsunami source and position of the tsunami wave fronts in the Black Sea water area, Scenario 2 ($M = 7.5$) for 4 time moments: $a) t = 30$ s; $b) t = 1$ min; $c) t = 2$ min; $d) t = 7$ min

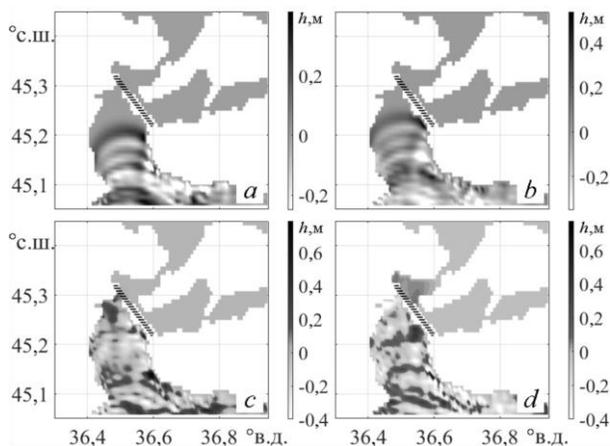
Отметим, (рис. 6, b, c), что, в отличие от предыдущего сценария, цунами начинается с отката волны от берега (волна понижения) с вертикальной составляющей до 0,5 м (рис. 6, d). Следующая волна идет к берегу с высотой до 2–3 м. На рис. 7 хорошо видно, что для этого сценария наибольшие высоты наблюдались в интервале $34,2^\circ - 34,9^\circ$ в. д., между Ялтой и Судак, причем высота максимального подъема составила 7 м. Однако дальнейшее распределение по берегу, как и в Сценарии 1 ($M = 7$), происходило равномерно, со средней высотой 1 м.



Р и с. 7. 2D-гистограмма распределения максимальных высот волн на трехметровой изобате у побережья Крыма по Сценарию 2 ($M = 7,5$)

Fig. 7. 2D histogram of distribution of the wave maximum heights on the 3-meter isobath near the Crimean coast, Scenario 2 ($M = 7.5$)

На рис. 8 приведены результаты численного моделирования распространения волн цунами в Керченском проливе. Здесь высота волны по сравнению с высотами в акватории Черного моря была значительно ниже – не более 30 см. Передний фронт дугообразной формы через 1 ч 40 мин (рис. 8, *b*) достигает Крымского моста с высотой волны ~20 см. В следующие моменты времени высота подъема воды вблизи Крымского моста не превышает 20–25 см.



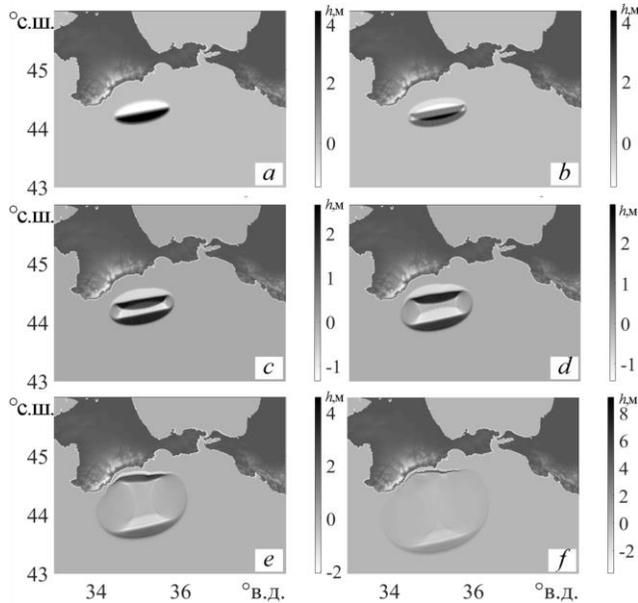
Р и с. 8. Положение фронтов волн цунами в акватории Керченского пролива по Сценарию 2: *a* – при $t = 1$ ч 35 мин; *b* – при $t = 1$ ч 40 мин; *c* – при $t = 2$ ч; *d* – при $t = 2$ ч 20 мин. Темная линия – схематическое изображение положения моста

F i g. 8. Position of the tsunami wave fronts in the Kerch Strait water area, Scenario 2: *a*) $t = 1$ h 35 min; *b*) $t = 1$ h 40 min; *c*) $t = 2$ hrs; *d*) $t = 2$ hrs 20 min. Dark line denotes schematic location of the bridge

Численное моделирование цунами с гипотетическим очагом землетрясения ($M = 8$), локализованным в зоне разломов земной коры вблизи Крымского п-ова (Сценарий 3)

Для реализации Сценария 3 был выбран сейсмический очаг землетрясения (показан синей линией на рис. 1) с магнитудой $M = 8$ и локализацией на линии 2 разлома земной коры (рис. 1). Движение блоков начиналось одновременно: за 30 с блок, ориентированный к берегу, опускался на 1,5 м, а блок, ориентированный к морю, в течение 30 с поднимался на 4,5 м.

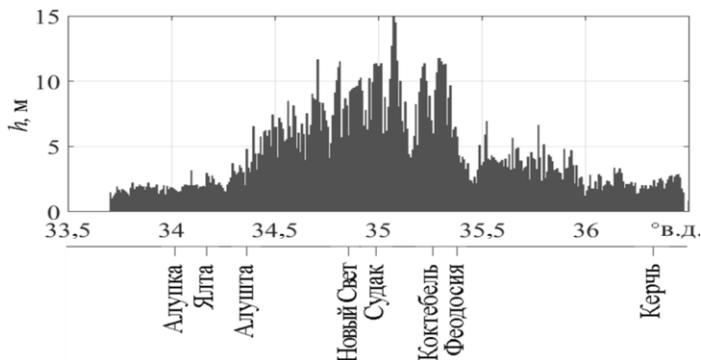
На рис. 9 показаны этапы эволюции волн цунами в акватории Черного моря для данного сценария: рис. 9, *a, b* демонстрирует начало распространения волн после окончания движения блоков сейсмического очага; на рис. 9, *c, d* видно, что волна, которая движется от очага к берегу в северном направлении, является «волной понижения», т. е. цунами в данном участке акватории начнется с отката волны от берега; согласно рис. 9, *f*, волна достигает побережья Крыма примерно за 10 мин, при этом передний фронт приблизительно -2 м.



Р и с. 9. Генерация очага цунами и положение фронтов волн цунами в акватории Черного моря по Сценарию 3 ($M = 8$) для 6 моментов времени: *a* – $t = 30$ с; *b* – $t = 1$ мин; *c* – $t = 2$ мин; *d* – $t = 3$ мин; *e* – $t = 7$ мин; *f* – $t = 10$ мин

F i g. 9. Generation of tsunami source and position of the tsunami wave fronts in the Black Sea water area, Scenario 3 ($M = 8$) for 6 time moments: *a*) $t = 30$ s; *b*) $t = 1$ min; *c*) $t = 2$ min; *d*) $t = 3$ min; *e*) $t = 7$ min; *f*) $t = 10$ min

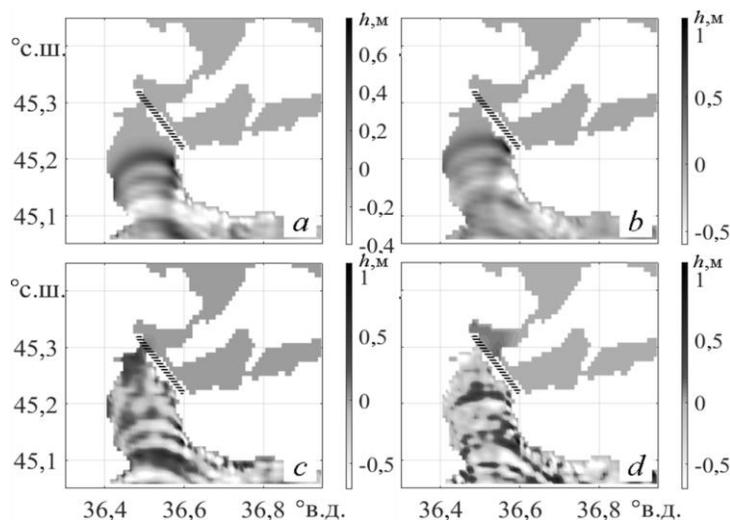
На рис. 10 хорошо видно, что максимальные высоты волн находятся в интервале $34,7^{\circ}$ – $35,45^{\circ}$ в. д. (между Алуштой и Феодосией), высота подъема уровня моря здесь достигала 6–8 м, что превышает аналогичные показатели в двух предыдущих сценариях на 1–3 м. На остальной части изобаты высота волны не превышала 2–3 м. Максимальное значение высоты волны цунами, до 15 м, приходится на район Судака.



Р и с. 10. 2D- гистограмма распределения максимальных высот волн на трехметровой изобате у Крымского побережья по Сценарию 3 ($M = 8$)

F i g. 10. 2D histogram of distribution of the wave maximum heights on the 3-meter isobath near the Crimean coast, Scenario 3 ($M = 8$)

На рис. 11 показана эволюция волн цунами в акватории Керченского пролива согласно Сценарию 3. Хорошо видно, что волна дугообразной формы с высотой около 0,5 м сначала достигает восточных опор моста в районе косы Тузла. Она подходит к Крымскому мосту через 1 ч 25 мин после начала генерации (рис. 11, *a*). Через 10 мин передний фронт достигает западных опор моста, при этом он имеет высоту 30 см. Далее волна практически не проходит в северном направлении дальше косы Чушка, основные колебания заметны в южной половине Керченского пролива.



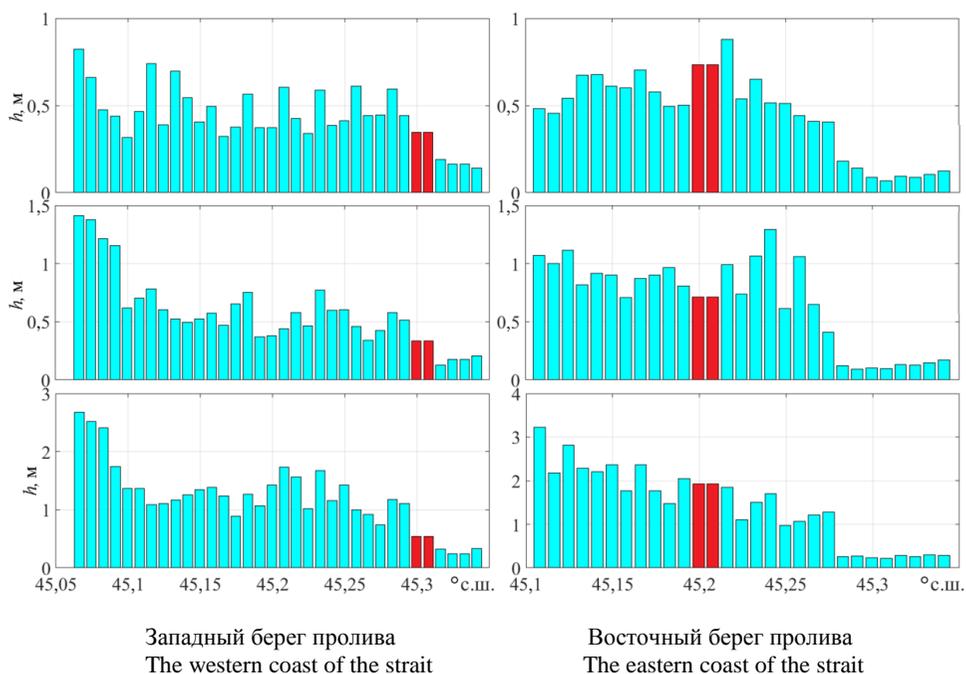
Р и с. 11. Положение фронтов волн цунами в акватории Керченского пролива по Сценарию 3: *a* – при $t = 1$ ч 25 мин; *b* – при $t = 1$ ч 30 мин; *c* – при $t = 1$ ч 35 мин; *d* – при $t = 1$ ч 40 мин. Темная линия – схематическое изображение положения моста

F i g. 11. Position of the tsunami wave fronts in the Kerch Strait water area, Scenario 3: *a*) $t = 1$ h 25 min; *b*) $t = 1$ h 30 min; *c*) $t = 1$ h 35 min; *d*) $t = 1$ h 40 min. Dark line denotes schematic location of the bridge

Анализ результатов численного моделирования цунами при сильных и катастрофических землетрясениях в акватории Черного моря с очагами, локализованными вблизи Крымского п-ова

На рис. 12 приведены гистограммы распределения максимальных высот волн цунами для восточного и западного побережий Керченского пролива. Красным цветом отмечено географическое местоположение опор Крымского моста в проекции (срез по долготе). Следует отметить, что в рассмотренных сценариях возникновения и распространения волн цунами с ростом магнитуды сейсмического очага растет и уровень подъема воды на трехметровых изобатах в Керченском проливе. Как можно заметить, при реализации Сценария 1 максимальная высота подъема уровня воды у западных и восточных опор моста составила 0,32 и 0,65 м соответственно (верхняя часть рис. 12). В целом в акватории пролива высота составляла немногим меньше 1 м. По Сценарию 2 максимальная высота подъема уровня моря в районе западных опор моста составила 35 см (средняя часть рис. 12), в районе восточных

опор – 0,7 м. Также можно отметить, что на входе в Керченский пролив со стороны Черного моря высоты волн на трехметровой изобате достигали 1,5 м. При реализации Сценария 3 с гипотетическим блочным очагом и $M = 8$ максимальные высоты волн цунами в районе западных опор моста составили 0,5 м, в районе восточных – 1,95 м; наибольшая высота для данного сценария 3,2 м (нижняя часть рис. 12).

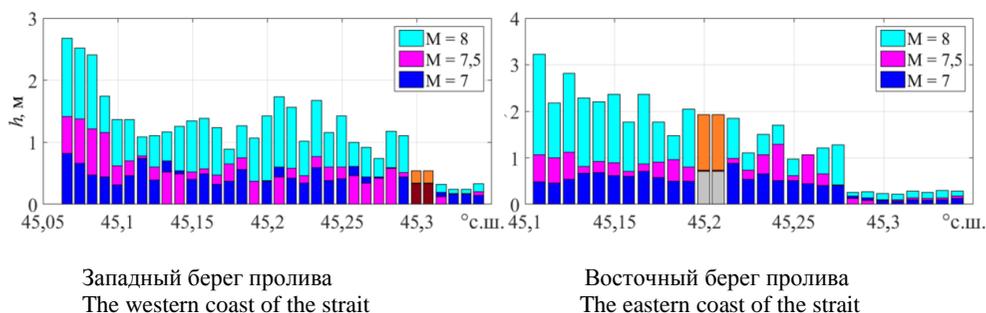


Р и с. 12. Гистограммы распределения максимальных высот волн цунами на трехметровой изобате вдоль побережья Керченского пролива вблизи Крымского моста по Сценарию 1 ($M = 7$) – сверху, по Сценарию 2 ($M = 7,5$) – в середине, по Сценарию 3 ($M = 8$) – внизу. Район расположения западных и восточных опор Крымского моста показан красным цветом

F i g. 12. Histograms of distribution the tsunami wave maximum heights on the 3-meter isobath along the Kerch Strait coast near the Crimean Bridge, Scenario 1 ($M = 7$) – above, Scenario 2 ($M = 7.5$) – in the middle, Scenario 3 ($M = 8$) – below. Red color indicates locations of the Crimean Bridge western and eastern pillars

На рис. 13 приведена обобщенная гистограмма для всех трех сценариев, из которой можно видеть, что в районе западных опор моста высоты волн цунами для всех сценариев не превосходят 0,3–0,5 м (коричневым цветом выделено значение максимальной высоты подъема уровня моря у западных и восточных опор моста для Сценария 1, серым – для Сценария 2, оранжевым – для Сценария 3), а в районе восточных опор размах возможных высот волн лежит в диапазоне 0,6–1,95 м. Эти данные приведены в табл. 2.

Сравнение трех сценариев показало, что максимальные высоты волн в акватории Керченского пролива наблюдались при реализации Сценария 3 ($M = 8$), они в среднем на 1–1,2 м были выше, чем аналогичные значения в двух других сценариях.



Р и с. 13. Сравнительные гистограммы распределения максимальных высот волн цунами вдоль побережья Керченского пролива для трех сценариев. Коричневым цветом показан район расположения западных и восточных опор Крымского моста по Сценарию 1 ($M = 7$), серым – по Сценарию 2 ($M = 7,5$), оранжевым – по Сценарию 3 ($M = 8$)

F i g. 13. Comparative histograms of distribution of the tsunami wave maximum heights along the Kerch Strait coast for 3 scenarios. Brown color shows locations of the Crimean Bridge western and eastern pillars, Scenario 1 ($M = 7$), grey color – Scenario 2 ($M = 7.5$), orange color – Scenario 3 ($M = 8$)

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Максимальные значения высоты волн у опор Крымского моста
Wave height maximum values at the Crimean Bridge pillars

Номер сценария / Scenario number	Максимальный подъем / Maximum rise	
	западные опоры / western pillars	восточные опоры / eastern pillars
1	0,32 м	0,65 м
2	0,35 м	0,70 м
3	0,50 м	1,95 м

Обсуждение

Целью данной работы было получение волновых характеристик в акватории Керченского пролива от очагов землетрясения, локализованных на юго-востоке Крымского п-ова, для чего были рассмотрены три сценария. При сравнении работы [13], выполненной нами ранее для гипотетических очагов землетрясений, локализованных перед входом в Керченский пролив, и настоящей работы, в которой рассматриваются сейсмические очаги, локализованные на юго-западе Крымского п-ова, показано, что при землетрясениях с одинаковыми магнитудами высоты волн в проливе, в частности в районе Крымского моста, имеют существенно различные значения. Так, например, максимальная высота волны у восточных опор Крымского моста, согласно работе [13], составила 1,5 м, а, согласно приведенным в данной работе расчетам, высота волны цунами от очага, локализованного на юго-западе Крымского п-ова, у восточных опор моста составляет 0,5 м. Однако при возмож-

ном катастрофическом землетрясении с магнитудой $M = 8$ и с сейсмическим очагом, локализованным в зоне активных разломов земной коры Крымского п-ова, в Керченском проливе возможная максимальная высота волны в районе западных опор моста составляет около 0,5 м, в районе восточных опор – до 1,9 м.

Численное моделирование исторического землетрясения 12 сентября 1927 г. у побережья Крыма было также проведено в работах [8, 9, 11]. Расчеты в них проводились для сходных форм очага землетрясения при магнитуде $M = 7$. Поскольку в работах [8, 11] детально рассматривалось побережье в районе Крымского п-ова и северо-восточной части Черного моря, а целью представленной здесь работы была оценка волновых характеристик в акватории Керченского пролива, где нами были выставлены виртуальные мареографы, то для сравнения в работах [8] и [11] мы смогли найти только несколько пунктов на побережье Крыма и только один пункт на входе в Керченский пролив (Керчь). Сравнение результатов моделирования цунами, полученных в указанных работах, и численного моделирования, проведенного в данной работе при реализации Сценария 1 и магнитуде $M = 7$ с сейсмическим очагом эллиптического типа, локализованным в соответствии с историческими данными о землетрясении, приведено в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Сравнение значений максимального подъема уровня моря вблизи населенных пунктов, расположенных на Крымском побережье и в районе Керченского пролива, по Сценарию 1 и согласно работам [8, 11]
Comparison of the values of the sea level maximum rise near the settlements on the Crimean and the Kerch Strait coasts (Scenario 1 and articles [8, 11])

Береговой пункт / Coastal settlement	Сценарий 1 / Scenario 1	Работа [8] / Article [8]	Работа [11] / Article [11]
Алупка / Alupka	0,90 м	0,4 м	0,7 м
Ялта / Yalta	1,30 м	1,5 м	1,0 м
Судак / Sudak	1,00 м	0,4 м	0,6 м
Феодосия / Feodosiya	0,40 м	0,5 м	0,4 м
Керчь / Kerch	0,32 м	–	0,4 м

Можно видеть, что для всех пунктов, приведенных в табл. 3, расчеты достаточно близки, хотя для Керчи удалось привести сравнение только с данными работы [11].

Заключение

Как следует из приведенного в данной работе расчета, при сильном землетрясении с магнитудой $M = 7$, моделирующем события 12 сентября 1927 г. у Крымского побережья, высота подъема уровня моря в районе Ялты и Алупки может достигать 2,5–2,7 м. При той же локализации очага, но большей магнитуде землетрясения ($M = 7,5$) и другой форме очага (блочный очаг, состоящий из двух полуэллипсов) высота подъема воды между Судакком и Кок-

тебелем может достигать 7 м. Катастрофическое землетрясение с магнитудой $M = 8$ (Сценарий 3) рассматривалось как гипотетическое событие с очагом (близким по локализации к историческому землетрясению 12 сентября 1927 г.), расположенным в зоне активных разломов земной коры рассматриваемой акватории. Для этого сценария найденные оценки максимальных высот волн достигали 15 м, причем наибольшие значения получены для акватории Черного моря между Алуштой и Феодосией.

Результаты численного моделирования также показали, что в районе западных опор Крымского моста высоты волн цунами для всех сценариев не превышают 0,3–0,5 м, а в районе восточных опор размах возможных высот волн лежит в диапазоне 0,6–1,95 м.

Приведенные сценарии гипотетических цунамигенных землетрясений в северо-восточной части Черного моря показывают, что в случае повторения события 12 сентября 1927 г. при большей магнитуде землетрясения инфраструктура Керченского пролива и в том числе сам мост могут подвергнуться атаке волн цунами достаточно большой высоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А. А. Крымские землетрясения 1927 года: неизвестные явления на море // Природа. 2002. № 9. С. 13–20. <https://priroda.ras.ru/pdf/2002-09.pdf>. (дата обращения: 13.10.19).
2. Неделькин Е. В. К вопросу о последствиях Крымского землетрясения 11 сентября 1927 года на территории Севастопольского района автономной Крымской ССР // Причерноморье. История, политика, культура. 2019. Вып. 28. С. 57–66. doi:10.5281/zenodo.3476029
3. Опасные природные явления в Крыму / Л. А. Багрова [и др.] // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9, вып. 2, ч. 1. С. 115–126. <http://geopolitika.cfuv.ru/wp-content/uploads/2016/11/013bagr2.pdf>. (дата обращения: 13.10.19).
4. Ким А. Ю., Пассада А. А. Строительство сейсмостойких домов в Крыму после Крымского землетрясения // Student Research: сборник статей Международного научно-практического конкурса в 2 ч. Ч. 1. Пенза : Наука и Просвещение, 2018. С. 52–55.
5. Nikonov A. A., Gusiakov V. K., Fleifel L. D. Assessment of the Tsunami Hazard on the Russian Coast based on a New Catalogue of Tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59, iss. 2. P. 193–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>
6. Tsunami Hazard in the Black Sea and the Azov Sea: A New Tsunami Catalogue / G. A. Papadopoulos [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. V. 11, iss. 3. P. 945–963. doi:10.5194/nhess-11-945-2011
7. Григораш З. К. Распространение цунами 1927 года в Черном море // Труды Морского гидрофизического института. М. : АН СССР, 1959. Т. XVIII. С. 113–116.
8. Доценко С. Ф., Ингеров А. В. Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 1. С. 3–15.
9. Доценко С. Ф., Ингеров А. В. Численный анализ распространения и усиления волн цунами на северо-западном шельфе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 11–20.
10. Доценко С. Ф. Численное моделирование цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях как необходимый элемент региональных систем раннего предупреждения о цунами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 2. С. 287–300.

11. *Базыкина А. Ю., Михайличенко С. Ю., Фомин В. В.* Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г. // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
12. *Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н.* Прогноз высот волн цунами на Российском побережье Черного моря // Океанология. 2011. Т. 51, № 6. С. 965–973.
13. Численное моделирование распространения черноморских и азовоморских цунами через Керченский пролив / Л. И. Лобковский [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 111–122. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-111-122
14. *Isvoranu D., Badescu V.* Hydrodynamics of Tsunamis Generated by Asteroid Impact in the Black Sea // Open Physics. 2012. Vol. 10, No. 2. P. 429–446. doi:10.2478/s11534-012-0012-4
15. *Mazova R. Kh., Tresvyatskaya E. A.* Numerical modeling of the generation of long waves by a dynamic seismic source and their propagation in the Black Sea // Russian Journal of Earth Science. 2006. Vol. 8, no. 6. ES6003. doi:10.2205/2006ES000212
16. Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Black Sea Area / I. A. Moldovan [et al.] // Romanian Journal of Physics. 2017. Vol. 62, iss. 5–6. 809. URL: https://www.nipne.ro/rjp/2017_62_5-6/RomJPhys.62.809.pdf (date of access: 13.03.2020).
17. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental, and numerical data / A. Yalciner [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12023. doi:10.1029/2003JC002113
18. *Schiermeier Q.* Tsunamis: a long-term threat // Nature. 2005. Vol. 433. 7021. <https://doi.org/10.1038/433004a>
19. *Винокуров Н. И., Корженков А. М., Родкин М. В.* К оценке сейсмической опасности района Керченского пролива по данным археосейсмологии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 2. С. 51–66.
20. *Никонов А. А.* Признаки молодой тектонической активности в зоне Южно-Азовского и Керченского разломов // Геотектоника. 1994. № 5. С. 16–27.
21. *Гориков А. И., Соловьев А. А., Жарких Ю. И.* Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 21–27. doi:10.7868/S0203030617060025
22. *Wells D. L., Coppersmith K. J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84, No. 4. P. 974–1002. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.211.744&rep=rep1&type=pdf> (date of access: 13.03.2020).
23. *Sielecki A., Wurtele M. G.* The numerical integration of the nonlinear shallow water equations with sloping boundaries // Journal of Computational Physics. 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7

Об авторах:

Баранова Елена Александровна, магистр кафедры прикладной математики, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (НГТУ), (603600, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), elenabaranova5995@gmail.com

Мазова Раиса Хаймовна, профессор кафедры прикладной математики, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (НГТУ), (603600, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), (141701, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9), **Scopus AuthorID: 6506297372**, raissamazova@yandex.ru