

Оценка цунамиопасности черноморского побережья в районах планируемого выхода на сушу газопроводов Россия – Турция

Л.И. Лобковский¹, Р.Х. Мазова^{2,*}, И.В. Ремизов²

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

²*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия*

**E-mail: raissamazova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.06.2016 г.

Представлены результаты численного моделирования волн цунами в черноморской акватории для оценки возможной цунамиопасности побережья в местах входа и выхода морской части планируемой прокладки новых линий российско-турецких газопроводов «Турецкий поток» и «Голубой поток – 2». Численное моделирование генерации очага цунами и распространения волн цунами по акватории Черного моря проведено в двух сценариях для семи очагов. Для оценки потенциальной цунамиопасности в каждом из проведенных расчетов были смоделированы сейсмические очаги, локализованные в районах возможного выхода на берег предполагаемых трасс газопроводов, с учетом характера геодинамических разломов и структур данного участка акватории. Для анализа результатов расчетов были использованы виртуальные мареографы вдоль береговой линии. Расчет проводился в рамках клавишной модели землетрясений с учетом зон активных разломов. Для каждой модели в выбранные моменты времени получены и проанализированы характеристики волновых полей и направление наиболее интенсивного распространения волновых фронтов. Проведена оценка максимальной высоты волн цунами в местах входа и выхода морской части газопроводов на сушу как на российском, так и на турецком побережьях. Показано, что при умеренных землетрясениях опасность воздействия волн цунами для реализации рассмотренных направлений прокладки газопроводов незначительна. В то же время при более сильных землетрясениях угроза разрушения береговой инфраструктуры реальна. В связи с этим делается вывод о необходимости детального цунамирайонирования локальных участков побережья в районах входа и выхода на сушу морской части планируемых газопроводов.

Ключевые слова: цунами, сейсмическая и цунами опасность, цунамигенные землетрясения, волны цунами, численное моделирование, черноморское побережье.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-82-96

Введение

Оценка сейсмической и цунамиопасности Черного моря (как российско-го, так и других побережий данной акватории) является одной из важнейших задач последних десятилетий. Большое внимание этому вопросу уделялось в работах С.Ф. Доценко (например, [1 – 13]), в которых были исследованы характеристики черноморских цунами и оценены возможные особенности распространения генерированных волн цунами в открытой акватории и северо-западной части моря. В этих работах была исследована также роль остаточных смещений дна Черного моря в генерации цунами, проанализированы

дисперсионные эффекты при генерации и проведен ряд исследований, имеющих важное практическое значение, например, для защиты инфраструктуры прибрежных территорий и подводных сооружений, включая обеспечение безопасности прокладки и эксплуатации морских газопроводов в районе участков подводных склонов, где эти газопроводы выходят на сушу.

Актуальность данных расчетов связана с повышенной сейсмичностью и оползневой опасностью ряда черноморских побережий [13 – 17]. Эти факторы обуславливают повышенные риски эксплуатации морского участка российско-турецкого газопровода (проект «Голубой поток»), соединяющего территории двух стран по дну Черного моря и функционирующего в условиях таких рисков [18]. На рис. 1 желтыми стрелками показано движение литосферных плит, создающее напряжения в области разломов [16, 17, 19]. Региональная разломная тектоника определяет высокую цунамигенность региона, которая постепенно возрастает с запада на восток вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей.



Рис. 1. Карта разломов вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей [16, 17, 19]

В ряде работ (например, [1, 7, 10, 11, 20 – 25]) было проведено численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря и дан прогноз по высотам волн на побережье.

В работах [20 – 22] было выполнено цунамирайонирование черноморского побережья (до 5-метровой изобаты) для ряда сценариев подводных землетрясений с наиболее вероятными потенциальными сейсмическими очагами.

В настоящей работе представлены результаты расчетов для конкретных участков побережья, на которых рассматриваются варианты строительства терминалов новых газотранспортных систем, проходящих по дну Черного моря, в том числе нового проекта – российско-турецкого газопровода «Турецкий поток».

В первом из планируемых сценариев прокладки подводная трасса газопровода на протяжении 660 км совпадает с коридором планировавшегося ранее проекта «Южный поток», затем проходит 250 км по новому коридору до турецкого побережья и выходит на сушу в районе населенного пункта Кыйыкей. С российской стороны морской терминал газопровода расположен на побережье Черного моря в районе компрессорной станции «Русская» вблизи Анапы.

Во втором сценарии прокладки турецкий сухопутный участок начинается в районе г. Самсун терминалом с газоизмерительной станцией «Дурусу», а российский сухопутный участок заканчивается компрессорной станцией «Береговая» в районе пос. Джубги Краснодарского края на побережье Черного моря [18].

На основе данных о зонах активных разломов и геодинамических особенностях основных структур различных участков черноморского побережья [16, 17, 19] было определено положение потенциальных сейсмических очагов. На рис. 2 приведен маршрут прокладки возможного нового российско-турецкого газопровода «Турецкий поток» [26, 27] (сценарий 1).

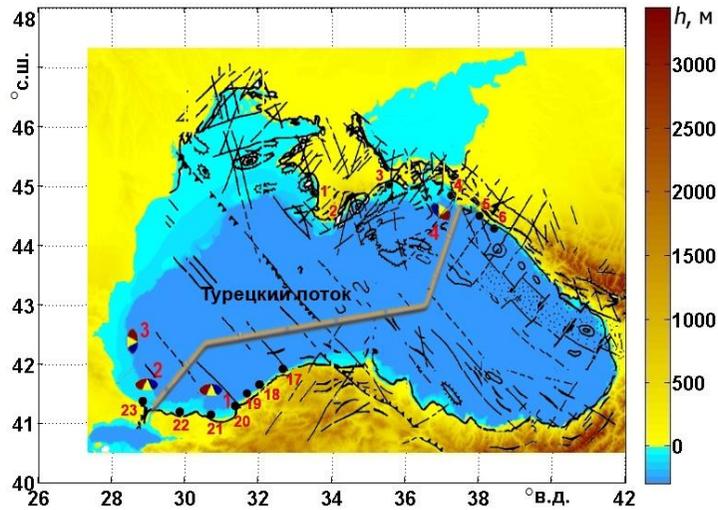


Рис. 2. Модельная трасса газопровода «Турецкий поток» (сценарий 1) [26, 27]

В районах выхода и входа морской части газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги: с турецкой стороны – под номерами 1, 2 и 3, а с российской – очаг 4, расположенный вблизи Анапы. На 5-метровой изобате расположены виртуальные мареографы: 1 – 6 вдоль российского побережья, 17 – 23 вдоль турецкого.

На рис. 3 приведена трасса возможного сухопутно-морского варианта нового «Голубого потока – 2», который выходит из станции «Береговая» и на турецкое побережье приходит в пункт Самсун (сценарий 2). В районах выхода и входа газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги: с турецкой стороны – 6 и 7, а с российской – очаг 5. Вдоль российского побережья расположены виртуальные мареографы 4 – 9, вдоль турецкого – 10 – 16. Можно видеть, что очаги для сценария 2 ориентированы так же, как и для сценария 1. Такое расположение очагов отвечает типичному характеру разломов и структур различных участков черноморского побережья [16, 17, 19].

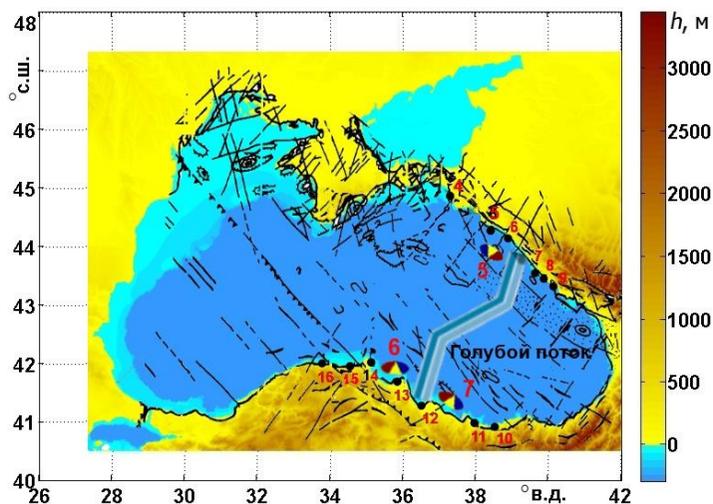


Рис. 3. Трасса нового газопровода «Голубой поток-2» (сценарий 2) [26, 27]

Моделирование проведено для сильного землетрясения с магнитудой $M = 7,0$, поскольку вероятность возникновения волн цунами при таком значении M довольно велика ($P = 0,81$ [28]).

В работе приведены результаты расчета двух вариантов для каждого сценария. Для оценки исходных параметров волн цунами, которые могут генерироваться сейсмическим источником, использовались известные формулы связи магнитуды землетрясения и характерных параметров разрывов в межплитовой границе в зоне субдукции, разработанные для тектонически активных регионов земного шара. К этим параметрам, определяющим сейсмический очаг, относятся: протяженность разрыва в очаге, ширина разрыва и возможная высота вертикального смещения морского дна в очаге [28]. Зная механизм очага или задавая его из тектонических соображений [29] и используя формулы Wells [28] и Iida (см., например, работу [30]), можно рассчитать вертикальную компоненту остаточного смещения морского дна в очаге и использовать это значение для моделирования генерации волн цунами.

На основе данных из работ [1, 5, 7, 21, 22] нами были рассмотрены сейсмические очаги эллипсоидной формы (рис. 4), разделенные на три части (так называемые блоки-клавиши).

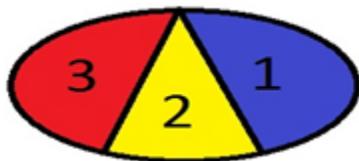


Рис. 4. Модельная геометрия сейсмического очага

Согласно картине типичных зон разломов [16, 17, 19] и типичной реализации движений блоков-клавиш в сейсмических очагах в ограниченных акваториях [20 – 22], был выбран порядок движения блоков в сейсмическом очаге, приведенный в табл. 1. Подчеркнем, что блоки-клавиши в нашей схеме движутся независимо, последовательно, один за другим.

Для первого варианта расчетов при магнитуде землетрясения $M = 7,0$ блок 1 опускается вертикально вниз за 30 с на 1,5 м, затем блок 2 быстро (за

10 с) поднимается вертикально вверх на 2,1 м и после его остановки блок 3 поднимается вертикально вверх на 1,8 м за 10 с. Схема движения блоков для всех очагов, приведенных на рис. 1 и рис. 2, – одинакова. Для второго варианта расчетов при магнитуде землетрясения $M = 7,3$ движение блоков аналогично, параметры заданы в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Движение блоков в сейсмическом очаге для двух вариантов расчета

Номер блока (справа налево)	Время движения, с	Вертикальное смещение Δh , м	
		при $M = 7,0$	при $M = 7,3$
1	30	-1,5	-2,0
2	10	2,1	3,0
3	10	1,8	3,9

В данной работе как пример приведены результаты четырех расчетов для четырех сейсмических очагов, два из которых (очаги 1 и 2) расположены в районе выхода на турецкое побережье трубопровода «Турецкий поток» (сценарий 1 (см. рис. 1)), а два других (очаги 6 и 7) – в районе выхода на турецкое побережье нового трубопровода «Голубой поток – 2» (сценарий 2 (см. рис. 2)). Детальные расчеты приведены только для сильного землетрясения с магнитудой $M = 7,0$.

Численное моделирование возможного землетрясения и цунами

Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса (см., например, работу [21]), построенного на основе схемы *Sielecki* [31]. При моделировании использовался временной шаг 200 с, удовлетворяющий условию Куранта. В береговой зоне на изобате, равной 5 м, использовались граничные условия (приближение вертикальной стенки) в последних узлах расчетной сетки.

Для рассмотрения процесса генерации волн цунами в рамках клавишной модели сейсмического очага и их распространения по акватории используются уравнения теории мелкой воды в нелинейной постановке (см., например, работы [20 – 22, 30]). Для учета динамики сейсмического очага введена пространственно-временная функция $\varphi(x, y, t)$. В зависимости от постановки задачи блоки в очаге могут двигаться последовательно, с определенной временной задержкой (или без нее), с разными начальными скоростями. Поскольку формирование очага цунами будет функцией времени, динамика данного процесса в сейсмическом очаге будет определять формирование волновых фронтов, распространяющихся от очага цунами. Процесс распространения этих волн и их взаимодействие рассматривается с учетом реальной батиметрии.

Сценарий 1: «Турецкий поток»

На рис. 5 – 8 приведены результаты численного моделирования для сценария 1 (очаг 1). На рис. 5 можно видеть положение волновых фронтов в данном расчете в шесть моментов времени. Как видно из рисунка, волновой фронт, двигаясь на юго-восток, быстро достигает турецкого побережья в районе выхода газопровода на сушу и, распространяясь по глубокой воде на северо-запад, достигает выхода морского участка газопровода на российское

по побережью. Оценки дают, что время распространения цунами в акватории от южного (очаг 1) до российского побережья (Ялта) составляет 3600 с.

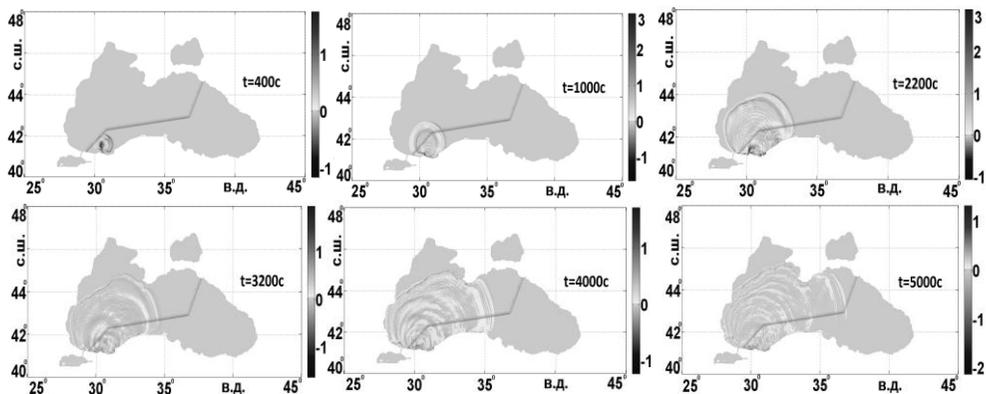


Рис. 5. Положение волновых фронтов при реализации сценария 1 (очаг 1) для шести моментов времени

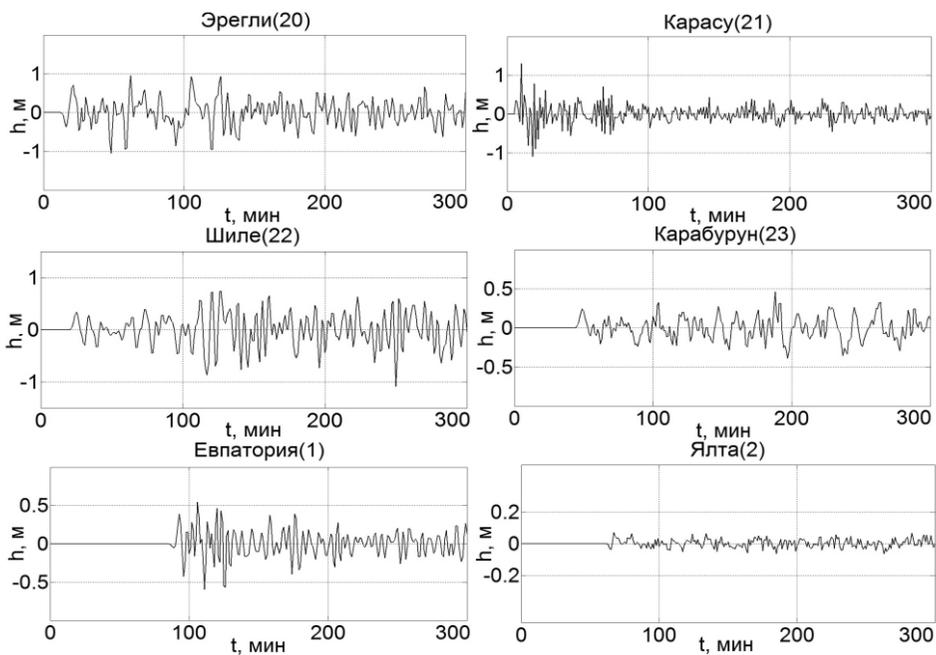


Рис. 6. Расчетные мареограммы при реализации сценария 1 (очаг 1): пункты 20 – 23 — на турецком побережье, 1 и 2 — на российском

Анализ мареограмм (рис. 6), полученных с виртуальных мареографов, показал, что максимальные высоты волн на интервале 28 – 32° в. д. составляют от 10 см до 1 м. Хорошо видно, что в зависимости от реализации движения блоков в сейсмическом очаге волны к побережью будут подходить либо положительной фазой (волной наката) в пунктах 21, 22, 23, либо отрицатель-

ной фазой (отходом воды от берега) в пунктах 20, 1, 2. На турецком побережье высота волны достигает максимального значения 1,2 м (в пункте 21) и уменьшается до 0,3 м по мере приближения к месту выхода газопровода на сушу (в пункте 23). Наибольшая частота колебаний уровня воды наблюдается в пункте 21. На российском побережье максимальной высоты (0,5 м) дошедшая волна достигает в пункте 1, в то время как в пункте 2 амплитуда колебаний уровня воды только порядка 0,1 м. Можно отметить, что частота колебаний уровня воды в пункте 1 значительно выше, чем в пункте 2, что может быть связано с особенностями шельфовой зоны на каждом из участков.

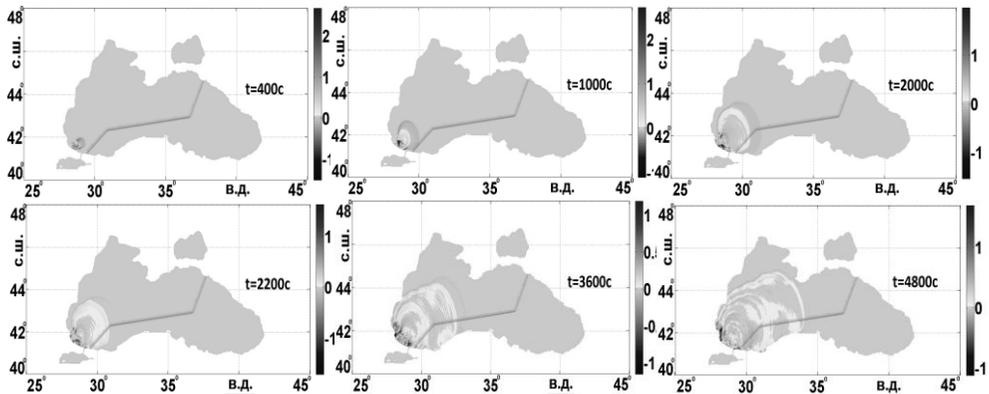


Рис. 7. Положение волновых фронтов при реализации сценария 1 (очаг 2) для шести моментов времени

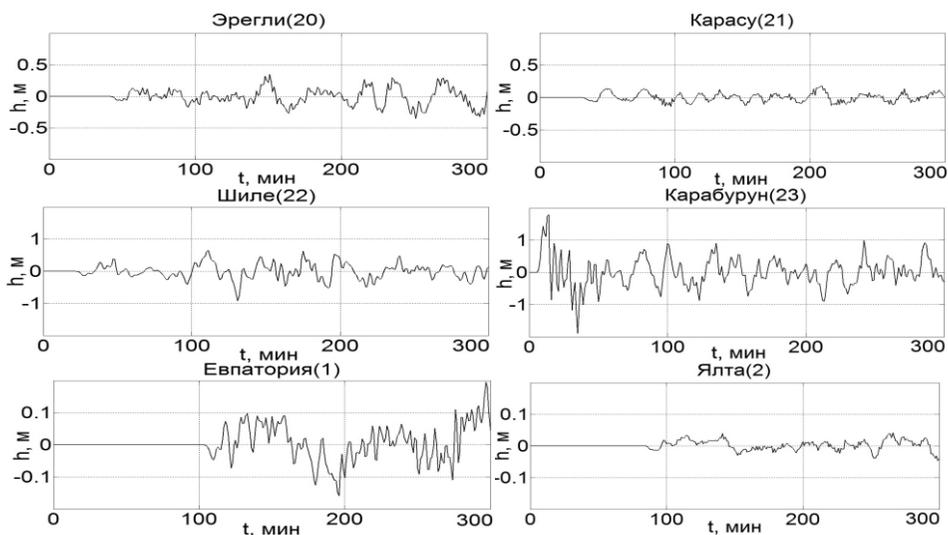


Рис. 8. Расчетные мареограммы для сценария 1 (очаг 2): пункты 20 – 23 — на турецком побережье, 1 и 2 – на российском

Для этого же сценария 1 рассмотрена локализация сейсмического очага 2 к западу от планируемой трассы газопровода (см. рис. 2). Из рис. 7 хорошо

видно, что к месту начала морского участка газопровода на противоположном берегу волна подойдет за время больше 5000 с. На рис. 8 приведены расчетные мареограммы для сценария 1 (очаг 2) при $M = 7,0$ в четырех пунктах на юго-западном побережье Турции (20 – 23) и в двух на российском побережье (1 и 2). В пунктах 20, 21, 22 волна подходит к берегу незначительным понижением уровня. В пункте 23 можно отметить относительно большую высоту (1,8 м) первого гребня и большую частоту колебаний уровня воды. На российском побережье (пункты 1, 2) волны приходят откатом с максимальной высотой до 0,1 м.

Сценарий 2: новый «Голубой поток – 2»

Результаты численного моделирования для очага 6 (см. рис. 3) представлены на рис. 9 – 12.

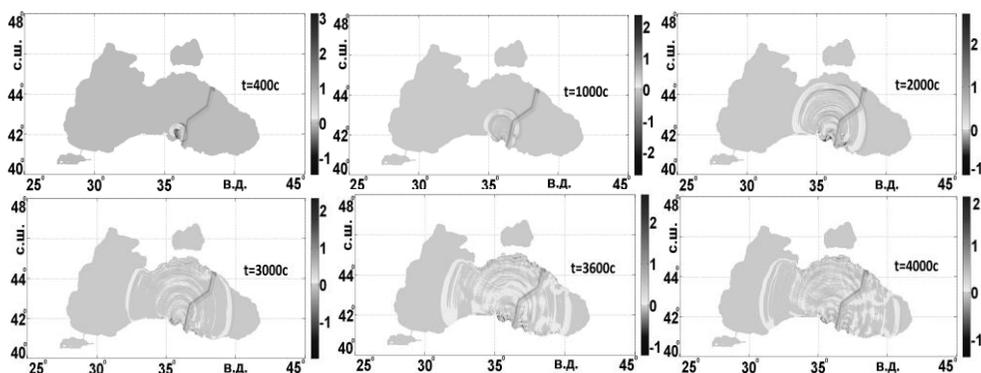


Рис. 9. Положение волновых фронтов при реализации сценария 2 (очаг 6) для шести моментов времени

На рис. 12 приведены расчетные мареограммы для очага 7 при магнитуде землетрясения $M = 7,0$ в четырех пунктах у турецкого побережья на юго-востоке черноморской акватории (пункты 10 – 12) и двух пунктах на северо-востоке акватории у российского побережья (пункты 6 и 7). Можно видеть, что в пунктах 6, 7, 10, 11, волна подходит к берегу отрицательной фазой (откатом), в двух пунктах (12 и 13) – первая волна положительная (волна наката).

Высота волн у турецкого побережья вблизи места расположения турецкого терминала газопровода доходит до 70 см, у российского побережья – до 40 см. Наименьший размах колебаний уровня в волне ($\sim 0,2$ м) наблюдается в пунктах 10 и 13, в то же время в пунктах 11 и 12 (Самсун) размах колебаний достигает 1 м, причем в пункте 12, в отличие от остальных пунктов, в мареограмме на фоне относительно высокочастотных колебаний уровня наблюдается дополнительная низкочастотная модуляция (несущая). Такое поведение мареограммы может быть вызвано геометрическими особенностями батиметрии в районе шельфовой зоны в окрестности пункта 12. На российском побережье в пунктах 6 и 7 размах колебаний на мареограмме порядка 0,6 м.

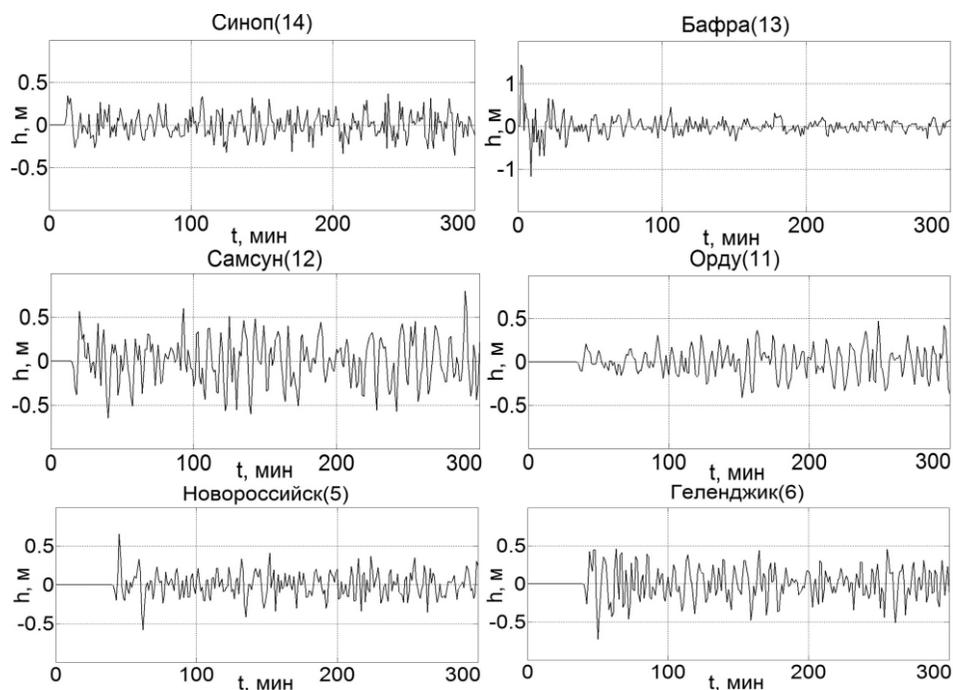


Рис. 10. Расчетные мареграммы для сценария 2 (очаг 6): пункты 11 – 14 на юго-востоке черноморской акватории, 5 и 6 – на российском

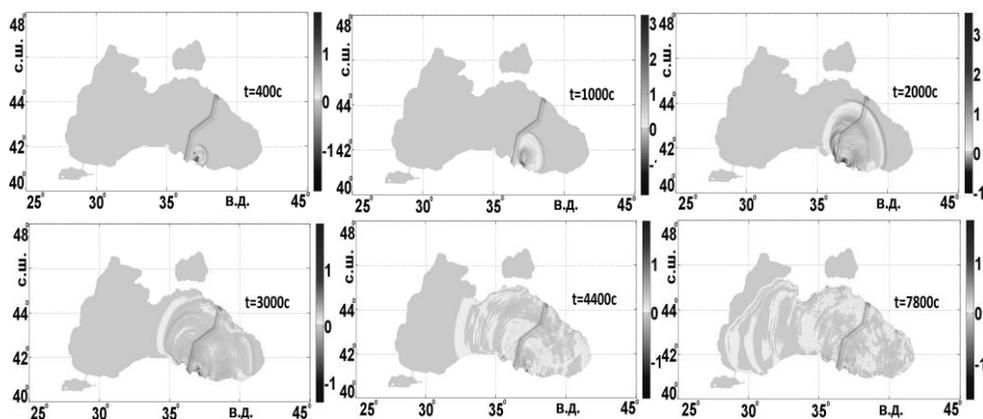


Рис. 11. Положение волновых фронтов при реализации сценария 2 (очаг 7) для шести моментов времени

Полученные выводы более наглядно представлены на рис. 13, где приведены максимальные распределения высот волн при расчетах по сценариям 1 и 2. Из рисунка следует, что области значений наибольшего подъема воды как около турецкого побережья, так и около российского лежат в интервале до 2 м. Нужно также отметить, что наибольшие высоты волн локализованы достаточно далеко от возможных районов выхода трубопроводов на побережья.

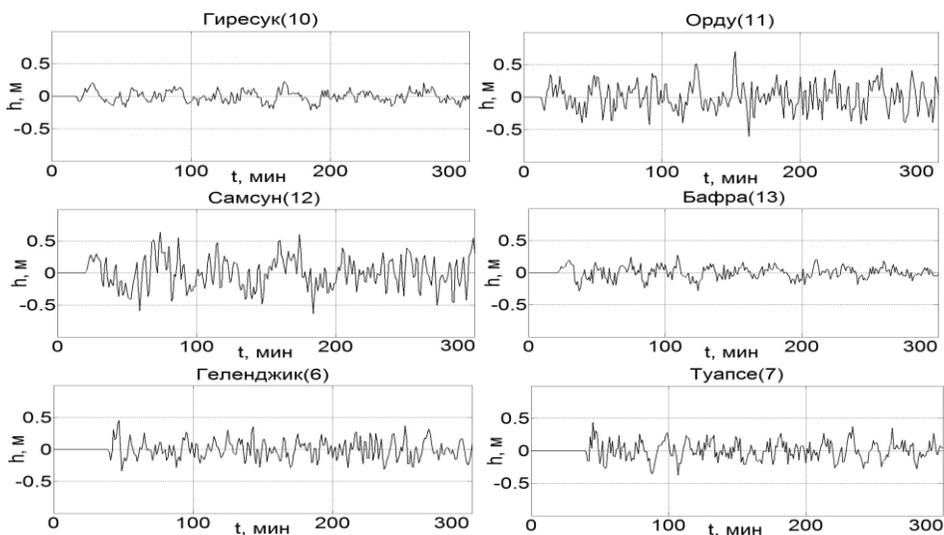


Рис. 12. Расчетные мареграммы для сценария 2 (очаг 7): пункты 10 – 13 — у турецкого побережья, 6 – 7 — на российском побережье

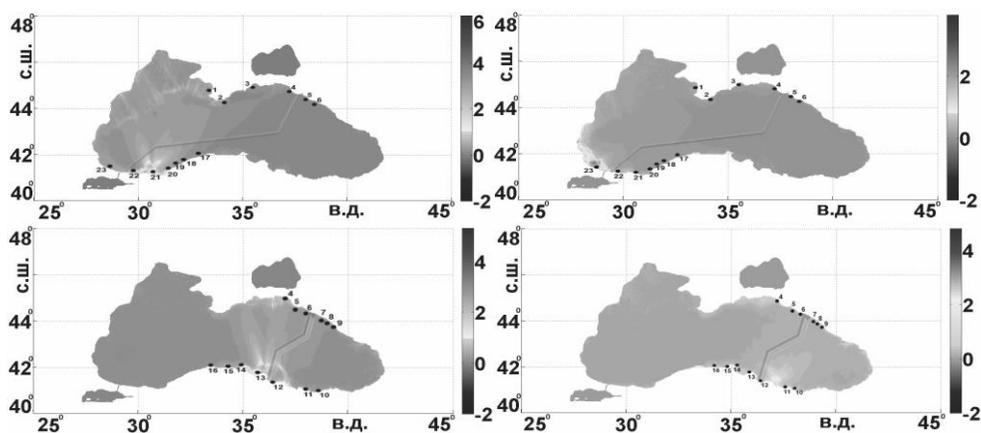


Рис. 13. Максимальные распределения высот волн, распространяющихся от очагов 1, 2 и 6, 7 для сценариев 1 и 2 (точками отмечено положение виртуальных мареграфов)

Таким образом, на рис. 1 – 13 приведены данные по расчету волновых полей для сильных землетрясений с магнитудой $M = 7,0$. Аналогичные расчеты были проведены также для сейсмических очагов с той же локализацией при значении $M = 7,3$. В табл. 2 – 5 приведены сравнительные данные максимальных высот волн при магнитуде $M = 7,0$ и $M = 7,3$ в конкретных пунктах вдоль турецкого и российского побережий, в которых было фиксировано положение расчетных мареграфов.

Т а б л и ц а 2

Сравнительные данные максимальных высот волн в сценарии 1 (очаг 1)

Номер мареографа	Максимальная высота, м (при $M = 7$)	Максимальная высота, м (при $M = 7,3$)
20	0,98	2,60
21	1,20	2,90
22	0,75	1,80
23	0,47	0,80
1	0,56	0,90
2	0,08	0,21

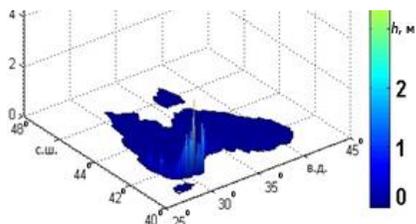


Рис. 14. Гистограмма для очага 1 при $M = 7$ (по сценарию 1)

Т а б л и ц а 3

Сравнительные данные максимальных высот волн в сценарии 1 (очаг 2)

Номер мареографа	Максимальная высота, м (при $M = 7$)	Максимальная высота, м (при $M = 7,3$)
20	0,30	1,30
21	0,20	0,51
22	0,70	1,50
23	1,80	3,80
1	0,19	0,60
2	0,04	0,13

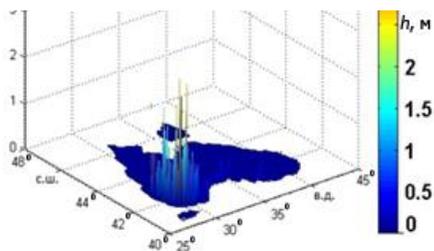


Рис. 15. Гистограмма для очага 2 при $M = 7$ (по сценарию 1)

Т а б л и ц а 4

Сравнительные данные максимальных высот волн в сценарии 2 (очаг 6)

Номер мареографа	Максимальная высота, м (при $M = 7$)	Максимальная высота, м (при $M = 7,3$)
14	0,35	1,2
13	1,43	2,2
12	0,70	1,5
11	0,47	1,0
5	0,65	1,4
6	0,48	1,8

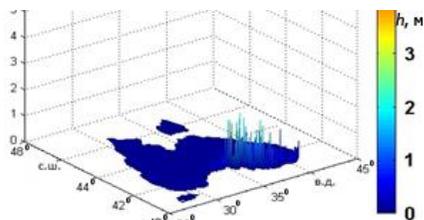


Рис. 16. Гистограмма для очага 6 при $M = 7$ (по сценарию 2)

Т а б л и ц а 5

**Сравнительные данные максимальных
высот волн в сценарии 2 (очаг 7)**

Номер мареографа	Максимальная высота, м (при $M = 7$)	Максимальная высота, м (при $M = 7,3$)
13	0,23	0,71
12	0,74	1,84
11	0,68	1,23
10	0,27	0,68
6	0,50	1,22
7	0,35	0,77

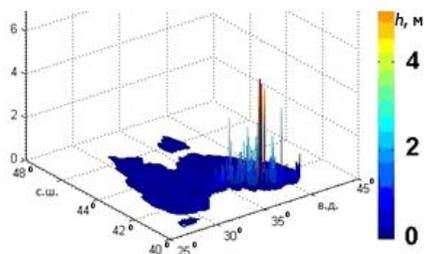


Рис. 17. Гистограмма для очага 7 при $M = 7$ (по сценарию 2)

Однако, как видно из гистограмм на рис. 14 – 17, в ближайших точках к выбранным пунктам значения максимальных высот могут несколько отличаться, что легко объяснить физическими эффектами, а также геометрией береговой зоны. Так, например, рядом с пунктом 12 (Самсун), в котором расчет максимальной высоты волны дал значение 0,74 м, максимальные высоты достигают 2 м (см. рис. 17).

З а к л ю ч е н и е

Таким образом, можно видеть, что в районах входа и выхода морской части газопроводов на сушу и расположения терминалов с газоизмерительными станциями максимальные высоты волн (оцененные для сильных землетрясений с магнитудой 7), как правило, не превышают 1 м (см. табл. 2 – 5). В некоторых пунктах высота волн в этих районах может принимать максимальные значения до 2 м. При более сильном землетрясении (например, по сценарию 2 при магнитуде $M = 7,3$) высота волн в районах выхода газопровода на побережье может достигать (в некоторых пунктах) 4 м. При этом необходимо принять во внимание, что расчет производился только до 5-метровой изобаты. Можно предположить, что береговой склон внесет дополнительный вклад в подрастание высоты волны, выходящей на берег, что необходимо учитывать при проектировании.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-50-00095).

Данная работа написана на основе статьи Р.Х. Мазовой, Е.А. Колчиной, Е.А. Овчинниковой, И.В. Ремизова «Оценка цунамиопасности черноморского побережья в районах планируемых вариантов прокладки нового газопро-

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 3 2017 93

вода Россия – Турция», опубликованной ранее в «Трудах Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева» № 3 (110) 2015 года. Материал статьи, переработанный и дополненный современными данными, подготовлен по просьбе редакции журнала специально для публикации в номере, посвященном памяти С.Ф. Доценко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Доценко С.Ф.* Черноморские цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1994. – 30, № 4. – С. 513 – 519.
2. *Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В.* Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // Океанология. – 2004. – 44, № 5. – С. 679 – 685.
3. *Доценко С.Ф., Сергеевский Б.Ю., Черкесов Л.В.* Генерация пространственных волн цунами подвижками дна конечной продолжительности // Исследования цунами № 2. – М.: Наука, 1987. – С. 27 – 34.
4. *Доценко С.Ф., Сергеевский Б.Ю.* Дисперсионные эффекты при генерации и распространении направленной волны цунами // Исследования цунами № 5. – М.: МГФК РАН, 1993. – С. 21 – 32.
5. *Доценко С.Ф., Соловьев С.Л.* О роли остаточных смещений дна океана в генерации цунами подводными землетрясениями // Океанология. – 1995. – 35, № 1. – С. 25 – 31.
6. *Доценко С.Ф., Коновалов А.В.* Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Морской гидрофизический журнал. – 1995. – № 6. – С. 3 – 16.
7. *Доценко С.Ф., Коновалов А.В.* Численное моделирование распространения цунами в открытой части Черного моря // Там же. – № 1. – С. 67 – 80.
8. *Доценко С.Ф.* Излучение длинных волн из сейсмоактивных зон Черного моря // Там же. – № 5. – С. 3 – 9.
9. *Доценко С.Ф.* Связь интенсивности цунами в Черном море с магнитудой подводного землетрясения // Там же. – 1999. – № 5. – С. 12 – 22.
10. *Доценко С.Ф.* Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // Там же. – 2005. – № 3. – С. 3 – 10.
11. *Доценко С.Ф.* Особенности распространения цунами в северо-западной части Черного моря // Там же. – № 6. – С. 46 – 53.
12. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Там же. – 2007. – № 1. – С. 21 – 31.
13. *Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В.* Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // Океанология. – 2004. – 44, № 5. – С. 679 – 685.
14. *Соловьева О.Н., Кузин И.П.* Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря // Там же. – 2005. – 45, № 6. – С. 826 – 840.
15. *Григораш З.К., Корнева Л.А.* Мареографические данные о цунами в Черном море при турецком землетрясении в декабре 1939 г. // Там же. – 1972. – 12, вып. 3. – С. 417 – 422.
16. *Казьмин В.Г., Лобковский Л.И., Пустовитенко Б.Г.* Современная кинематика микроплит в Черноморско-Южно-Каспийском регионе // Там же. – 2004. – 44, № 4. – С. 600 – 610.

17. *Чебаненко И.И., Гожик П.Ф., Евдоцук Н.И., Клочко В.П.* Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережий Черного моря // Геол. журн. – 2003. – № 1. – С. 54 – 58. – URL: <http://ashipunov.info/jurassic/j/crimea/06/Chebanenko.et.al.2003.pdf> (дата обращения: 20.05.2016).
18. *Гарагаиш И.А., Лобковский Л.И.* Геомеханическая оценка оползневых процессов и их мониторинг на склонах Черного моря в связи с реализацией проекта «Голубой поток» // VI Международная науч.-технич. конф. "Современные методы и средства океанологических исследований": материалы конф. – М.: Ин-т океанологии Акад. наук, 2000. – С. 5 – 15.
19. *Yolsal-Çevikbilen S., Taymaz T.* Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean // Tectonophysics. – 2012. – 536–537. – P. 61 – 100. – doi:<http://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.019>
20. *Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Колчина Е.А.* Оценки максимальных высот волн цунами для побережья г. Сочи при возможных сильных подводных землетрясениях // Доклады Академии наук. – 2014. – 456, № 5. – С. 604 – 609.
21. *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 // Russ. J. Earth Sci. – 2006. – 8, No. 6. – ES6003. – doi:[10.2205/2006ES000212](https://doi.org/10.2205/2006ES000212)
22. *Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Колчина Е.А.* Максимальные высоты волн цунами на Сочинском побережье при возможных сильных подводных землетрясениях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – 18, № 12. – С. 16 – 21.
23. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Цунами в Черном море // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 352 – 354.
24. *Зайцев А.И., Куркин А.А., Полухина О.Е. и др.* Численное моделирование возможных оползневых цунами в Черном море // Изв. Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и механика. – 2003. – 4. – С. 150 – 154.
25. *Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н.* Прогноз высот волн цунами на российском побережье Черного моря // Океанология. – 2011. – 51, № 6. – С. 965 – 973.
26. URL: <http://www.gazpromexport.ru/projects/6/> (дата обращения: 28.05.2016).
27. URL: <http://www.south-stream-offshore.com> (дата обращения: 22.05.2016).
28. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seism. Soc. Am. – 1994. – 84, No. 4. – P. 974 – 1002. – URL: <http://seismo.berkeley.edu/~rallen/teaching/eps256-s07/WellsCoppersmith1994.pdf> (дата обращения: 20.05.2016).
29. *Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Доклады АН СССР. – 1984. – 275, № 4. – С. 843 – 847.
30. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами // Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
31. *Sielecki A., Wurtele M.G.* The numerical integration of the nonlinear shallow-water equations with sloping boundaries // J. Comput. Phys. – 1970. – 6, Issue 2. – P. 219 – 236. – doi:[https://doi.org/10.1016/0021-9991\(70\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(70)90022-7)

Assessing a tsunami hazard to the Black Sea coasts in the regions of the planned landfall of the Russia – Turkey gas pipelines

L.I. Lobkovsky¹, R.Kh. Mazova^{2,*}, I.V. Remizov²

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia*

²*R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia*

**e-mail: raissamazova@yandex.ru*

The results of numerical modeling of tsunami waves in the Black Sea water area are represented for assessing possible tsunami hazards for the sea coast in the points where the planned underwater parts of the Russia – Turkey gas pipelines (“Turkish Stream” and “Blue Stream – 2”) enter the sea and come out to the coast. Numerical simulation of generating a tsunami source and propagation of tsunami wave in the Black Sea is carried out for two scenarios and 7 seismic sources. To assess potential tsunami hazard, each of the performed calculations implies modeling of the seismic sources in the basin regions (with due regard to the character of their geodynamic faults and structures) where the pipelines can possibly come out to the coast. The results are analyzed due to the virtual tide-measuring gauges placed along the coastline. The simulation is done within the framework of the earthquake key-board model which takes into account the zones of active faults. For each model, the characteristics of the wave fields and the direction of the most intense propagation of the wave fronts are obtained and analyzed at the selected time points. The tsunami wave maximum heights are estimated for the places where the gas pipelines come out to the coast and enter the sea both on the Russian and Turkish coasts. It is shown that at moderate earthquakes, hazard of tsunami wave’s impact upon laying the gas pipelines along the considered directions is insignificant. At the same time, at stronger earthquakes, the danger of the coastal infrastructure destruction is real. In this connection, the drawn conclusion implies strong necessity in the detailed tsunami zonation of the coast and marking out the local sections where the planned gas pipelines enter the sea and come out to the coast. (283)

Keywords: tsunami, seismic and tsunami hazard, tsunamigenic earthquakes, tsunami waves, numerical simulation, Black Sea coast.