

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.465

Р.Х. Мазова, Е.А. Колчина, Е.А. Овчинникова, И.В. Ремизов

ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ В РАЙОНАХ ПЛАНИРУЕМЫХ ВАРИАНТОВ ПРОКЛАДКИ НОВОГО ГАЗОПРОВОДА РОССИЯ-ТУРЦИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Проводится численное моделирование волн цунами в черноморской акватории для оценки возможной цунамиопасности на побережьях в местах входа-выхода газопровода для двух сценариев планируемой прокладки новой линии газопровода «Россия – Турция».

Научный вклад: Теоретическая значимость исследований обусловливается новизной результатов численного моделирования и выявлением зависимости характеристик волнового режима от физических и геометрических параметров задачи. Практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью их непосредственного использования для решения прикладных задач цунамирайонирования побережий.

Результат: Показано, что при возможных умеренных землетрясениях опасности от воздействия волн цунами для реализации рассмотренных направлений прокладки газопроводов не наблюдается. При более сильных землетрясениях опасность разрушения инфраструктуры возможна. В связи с этим, необходимо детальное цунамирайонирование локальных участков побережья в районах входа-выхода планируемых газопроводов.

Новизна: Обусловлена новизной результатов исследования волновых характеристик цунами, порождаемых клавишным сейсмическим механизмом, для анализа реальной задачи оценки цунамиопасности для предполагаемого пути прокладки газопроводов.

Ключевые слова: цунами, сейсмическая и цунамиопасность, цунамигенные землетрясения, волны цунами, численное моделирование, Черноморское побережье.

Введение

Хорошо известно, что безопасность прокладки и эксплуатации подводных газопроводов требует оценки сейсмической и оползневой опасности в районе участков подводных склонов, где эти газопроводы выходят на сушу. Оценка сейсмической и цунамиопасности Черного моря (как российского, так и других побережий данной акватории) является важнейшей задачей последних десятилетий [1–7]. Актуальность таких расчетов до некоторого времени была связана с проблемой эксплуатации морского участка газопровода Россия-Турция (проект «Голубой поток»), соединяющий территории этих стран по дну Черного моря, который функционировал в условиях повышенной сейсмичности и оползневой опасности российского и турецкого склонов Черного моря [8]. На рис. 1 стрелками показано движение материковых плит, создающее напряжение в области разломов. Это обуславливает также и высокую цунамичность этого региона, постепенно возрастающую с запада на восток вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей [9].

В работах [10–18] было проведено численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря и дан прогноз по высотам волн на побережьях. В работах [15–18] авторами было выполнено цунамирайонирование побережий (до пятиметровой изобаты) для ряда сценариев подводных землетрясений от наиболее вероятных, потенциальных сейсмических очагов. В настоящей работе предполагается проведение

подобных расчетов для конкретных участков побережий, где планируются варианты строительства терминалов новых газопроводов по дну Черного моря, в том числе нового российско-турецкого газопровода «Турецкий поток».



Рис. 1. Карта разломов вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей [9]

В первом из планируемых сценариев прокладки газопровода подводная трасса газопровода на значительном протяжении совпадает с коридором планировавшегося ранее проекта «Южный поток» и составляет 660 км. Затем газопровод проходит 250 км до турецкого побережья и выходит на сушу в районе населенного пункта пп. Кыйыкей и Ипсала. С российской стороны морской терминал газопровода расположен в районе компрессорной станции «Русская» (вблизи Анапы) на побережье Черного моря. Во втором сценарии Турецкий сухопутный участок начинается в районе г. Самсун терминалом с газоизмерительной станцией «Дурусу», а российский сухопутный участок заканчивается компрессорной станцией «Береговая» (в районе Джубги) Краснодарского края на побережье Черного моря [18]. На рис. 2 приведены некоторые возможные варианты прокладки газопровода.

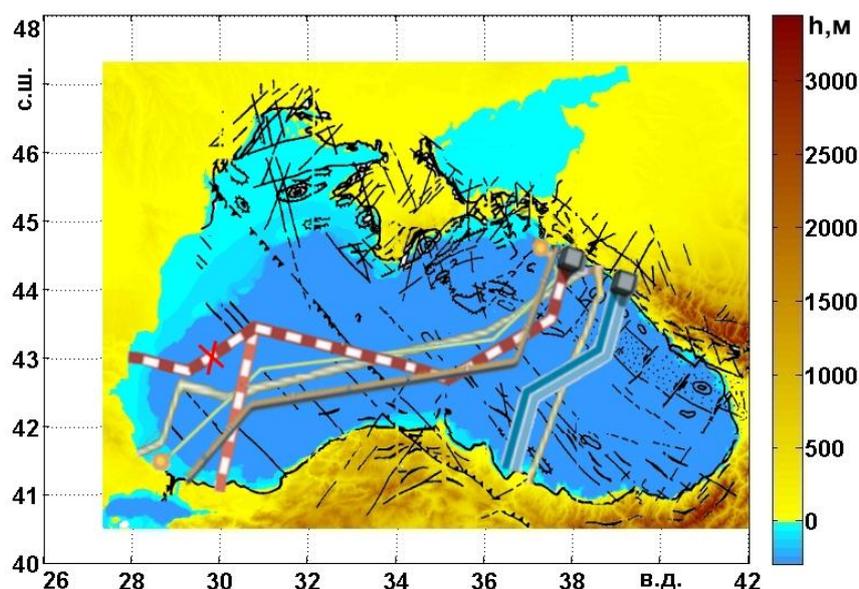


Рис. 2. Варианта расположения трубопроводов по дну акватории Черного моря [19]

Используя информацию о возможных зонах активных разломов и особенностей основных структур различных участков побережья [20, 21], было определено положение возможных сейсмических очагов. На рис. 3 приведена трасса возможного нового российско-

турецкого газопровода «Турецкий поток», который при выходе на турецкое побережье проходит через пп. Кыйыкей и Ипсала [19] (СЦЕНАРИЙ 1). В районах выхода и входа газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги. С турецкой стороны - это очаги под номерами 1, 2 и 3, а с российской – очаг расположен вблизи г. Анапа (4). Вдоль побережья на семиметровой изобате выставлены виртуальные мареографы - вдоль российского побережья № 1- 6, вдоль турецкого № 17-23.

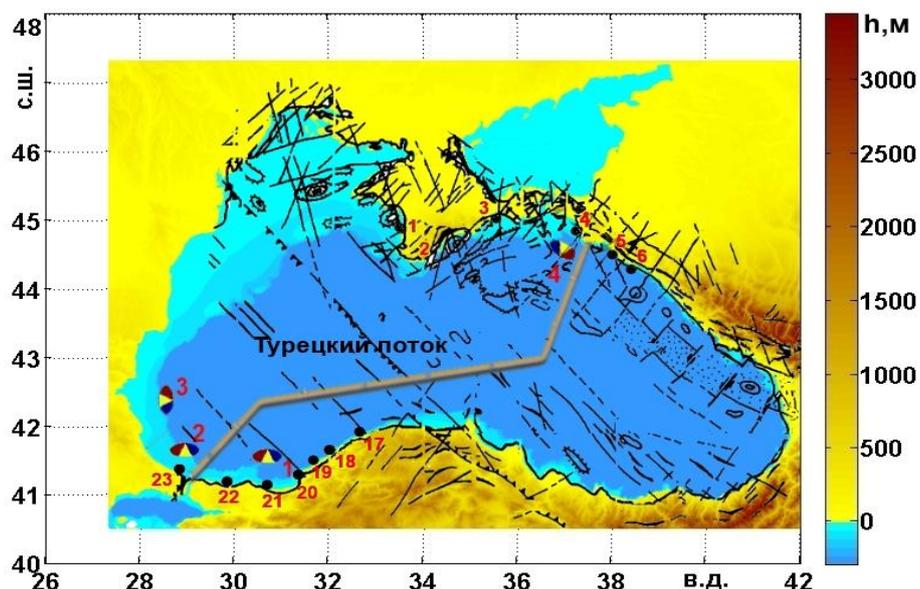


Рис. 3. Модельная трасса газопровода «Турецкий поток» (СЦЕНАРИЙ 1[19])

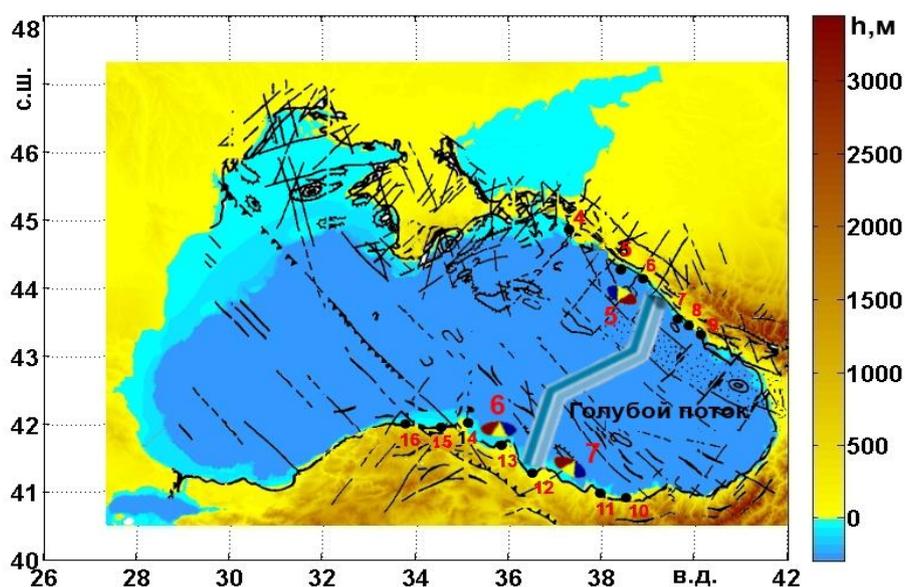


Рис. 4. Трасса газопровода «Новый голубой поток» 2 (СЦЕНАРИЙ 2[19])

На рис. 4 приведена трасса возможного газопровода для «сухопутно-морского» варианта «Нового голубого потока» газопровода в Турцию, который выходит из станции «Береговая» и на турецкое побережье приходит в п. САМСУН (СЦЕНАРИЙ 2). В районах выхода и входа газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги. С турецкой стороны это очаги под номерами 6 и 7, а с российской стороны - очаг 5. Вдоль побережья расположены виртуальные мареографы - вдоль российского побережья № 4-9, вдоль турецкого № 10-16. Можно видеть, что очаги для сценария 2, ориентированы так же, как и для первого сценария, разломами к береговой линии. Такое расположение очагов от-

вечает типичному характеру разломов и структур различных участков Черноморского побережья [20, 21].

Поскольку вероятность возникновения волн цунами, даже при умеренных землетрясениях, с магнитудой $M=7$ равна 0,81 [22], были выбраны два варианта возможных землетрясений: $M=7,0$ и $M=7,3$. Для оценки исходных параметров волн цунами, которые могут генерироваться сейсмическим источником, были использованы известные формулы связи магнитуды землетрясения и характерных параметров разрывов в межплитовой границе в зоне субдукции, разработанные для тектонически-активных регионов Земного шара, определяющих сейсмический очаг: протяженность разрыва в очаге, ширина разрыва и возможная высота вертикального смещения морского дна в очаге [22].

$$\begin{aligned} \lg L &= 0,59M - 2,44 \pm 0,16, \\ \lg W &= 0,32M - 1,01 \pm 0,15, \\ \lg \Delta u &= 0,82M - 5,46 \pm 0,42, \end{aligned} \quad (1)$$

где L – протяженность разрыва в очаге, км; W – ширина плоскости разрыва, км; Δu – остаточное смещение в очаге по моментальной магнитуде землетрясения, м. Для магнитуды $M=7$ длина разрыва в очаге (или длина большой оси эллипса) 50 км, ширина разрыва (ширина малой оси эллипса) 17 км. Остаточное смещение в очаге для магнитуд $M=7$ и $M=7,3$ приведены в табл. 3.1. Для магнитуды $M=7,3$ длина разрыва в очаге 74 км, а ширина разрыва 21 км. При генерации волн цунами существенна лишь вертикальная компонента остаточного смещения морского дна, поэтому для ее оценки необходимо знать, кроме магнитуды землетрясения, еще и механизм сейсмического очага. Зная механизм очага, или, задавая его из тектонических соображений и используя формулы (1), можно рассчитать вертикальную компоненту остаточного смещения морского дна в очаге и использовать это значение для моделирования генерации волн цунами [20, 23]. На основе данных работ [15, 16] были сконструированы сейсмические очаги эллипсоидной формы (рис. 3 и рис. 4), разделенные на три части, т.е. три блока-клавиши [15-18]. Согласно типичным зонам разломов [19] и типичной реализации движений клавиш-блоков в сейсмических очагах в ограниченных акваториях, было выбрано движение блоков в сейсмическом очаге, представленное в табл. 1.

Таблица 1

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

Блоки движутся независимо, последовательно один за другим. При первом блоке расчетов для магнитуды землетрясения $M=7$ первый блок опускается вертикально вниз за 30 с на 1,5 м, затем второй блок быстро (за 10 с) поднимается вертикально вверх на 1,75 м и после его остановки третий блок поднимается вертикально вверх на 1 м за 10 с. Схема движения блоков для всех очагов, приведенных на рис. 1 и рис. 2, одинакова. При втором блоке расчетов для магнитуды землетрясения $M=7,3$ движения блоков аналогично, параметры заданы табл. 1.

В данной работе в качестве примера приведены результаты четырех расчетов от четырех сейсмических очагов, два из которых (очаг 1 и очаг 2) расположены в районе выхода на турецкое побережье трубопровода «Турецкий поток» (СЦЕНАРИЙ 1) (рис. 1), а два очага (очаги 6 и 7), расположены в районе выхода на турецкое побережье трубопровода «Новый Голубой поток» (СЦЕНАРИЙ 2) (рис. 2). Детальные расчеты приведены только для умеренного землетрясения с магнитудой $M=7$.

Численное моделирование возможного землетрясения и цунами

Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса [15], построенного на основе схемы Sielecki [26], используя методы моделирования работы [27]. При моделировании брался временной шаг 200 с, удовлетворяющий условию Куранта. В береговой зоне на изобате 7 м использовались граничные условия (приближение вертикальной стенки) в последних узлах расчетной сетки.

Для рассмотрения процесса генерации волн цунами в клавишной модели сейсмического очага [14-17] и их распространения по акватории применяются уравнения теории мелкой воды. В двумерном случае система нелинейных уравнений мелкой воды запишется в виде [15, 24, 25]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = f_2, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + H - \phi)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\eta + H - \phi)v] = \frac{\partial \phi}{\partial t}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где x, y – пространственные координаты по осям Ox и Oy соответственно; t – время; $u(x, y, t), v(x, y, t)$ – компоненты скорости по осям Ox и Oy ; $\eta(x, y, t)$ – возмущение свободной поверхности относительно ее спокойного уровня; H – максимальная глубина бассейна; $\phi(x, y, t)$ – изменение дна бассейна (учет характеристик динамического сейсмического очага); g – ускорение свободного падения. В зависимости от постановки задачи блоки в очаге могут двигаться последовательно с определенной временной задержкой (или без нее) с разными начальными скоростями. При этом формирование очага цунами занимает некоторое время. Поэтому динамика данного процесса в сейсмическом очаге будет определять формирование волновых фронтов, распространяющихся от очага цунами. Процесс распространения этих волн, их взаимодействие рассматривается с учетом реальной батиметрии. Как известно, в силу несжимаемости жидкости, в случае мгновенной подвижки в очаге смещение воды на поверхности будет точно повторять смещение дна в сейсмическом очаге. Формирование очага цунами будет происходить за время динамических смещений в сейсмическом очаге, в данном случае за время подъема блока t .

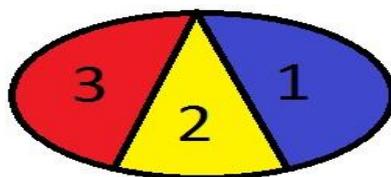


Рис. 5. Модельная геометрия сейсмического очага

СЦЕНАРИЙ 1. «Турецкий поток»

На рис. 6–11 приведены результаты численного моделирования для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 1). На рис. 6 можно видеть формирование очага цунами. Хорошо видно, что в первые 30 с формируется волна понижения, затем вертикальные смещения блоков на дне формируют горб воды на поверхности ($t = 50$ с), который затем начинает расплываться: $t = 80 - 120$ с. Движение на восток предваряется существенной волной понижения, а движение волнового фронта на юг и юго-запад характеризуется положительным горбом, высотой до 2 м. На рис. 6 приведено положение волновых фронтов для данного расчета для шести моментов времени. Как видно из рис. 6, волновой фронт, двигаясь на юго-восток, быстро достигает турецкого побережья в районе выхода газопровода, а, распространяясь по глубокой воде в

северо-запад, достигает морского участка выхода газопровода с российского побережья. Оценки показывают, что время распространения цунами в акватории от южного побережья (от очага *I*) до российского побережья (г. Ялта) составляет 3600 с. Можно видеть, что волна подходит к российскому берегу отрицательной фазой (волна понижения), а затем следует положительный горб воды. Этот эффект легко объясняется ориентацией отрицательного смещение в очаге землетрясения (рис. 6). На рис. 7 (верхняя панель, $t=2200$ с), хорошо виден цуг волн, направляющейся к российскому побережью, в котором первая волна – волна понижения. За ней следует положительный горб волны, сформированный положительными подвижками в очаге. Третья волна в цуге снова волна понижения.

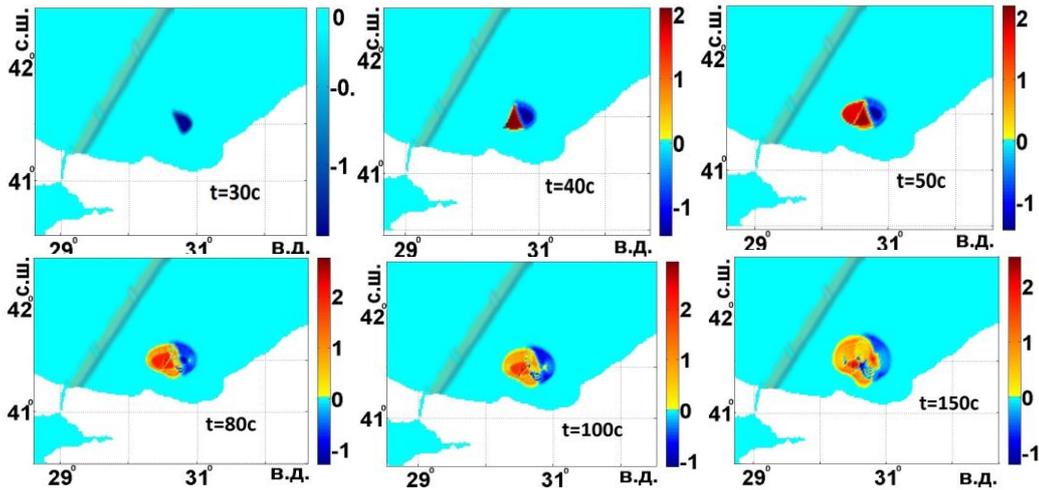


Рис. 6. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг *I*) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 150 с

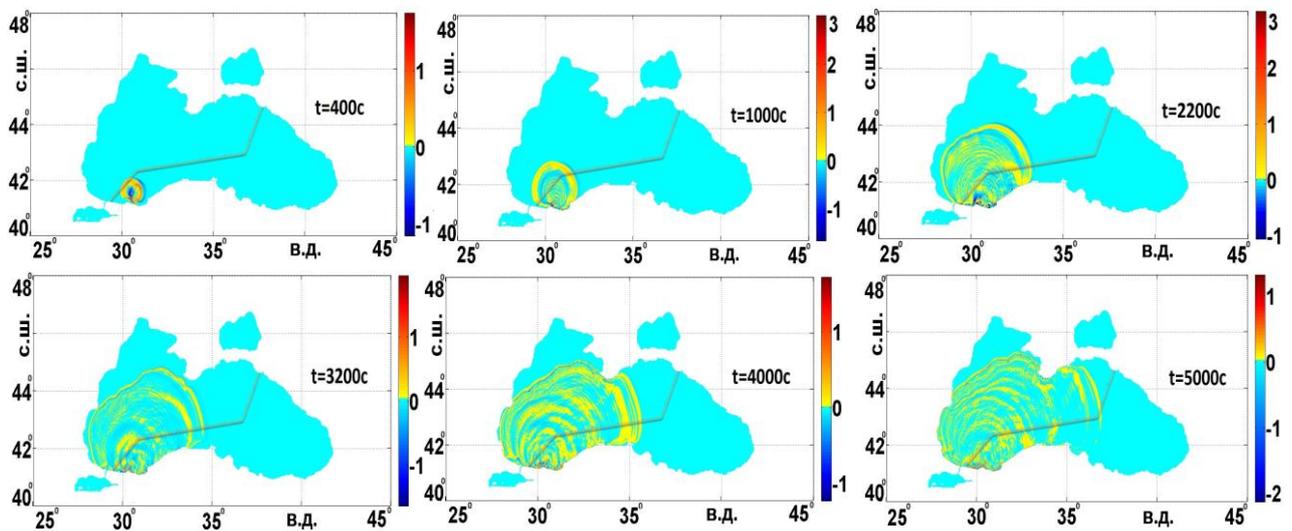


Рис. 7. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг *I*) для моментов времени:
 $t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 36 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 53 \text{ мин } 20 \text{ с};$
 $t = 1 \text{ ч } 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 1 \text{ ч } 23 \text{ мин } 20 \text{ с}$

Анализ мареограмм, полученных с виртуальных мареографов, приведенных на рис. 8, показал, что максимальные высоты волн на интервале с 28° по 32° составляют от 10 см до 1 м. Хорошо видно, что в зависимости от реализации движения подвижек в сейсмическом очаге волны к побережью будут подходить либо положительной фазой (волной наката) – это пп. 21, 22, 23, либо цунами будет начинаться с отхода воды от берега - пп. 20,1,2.

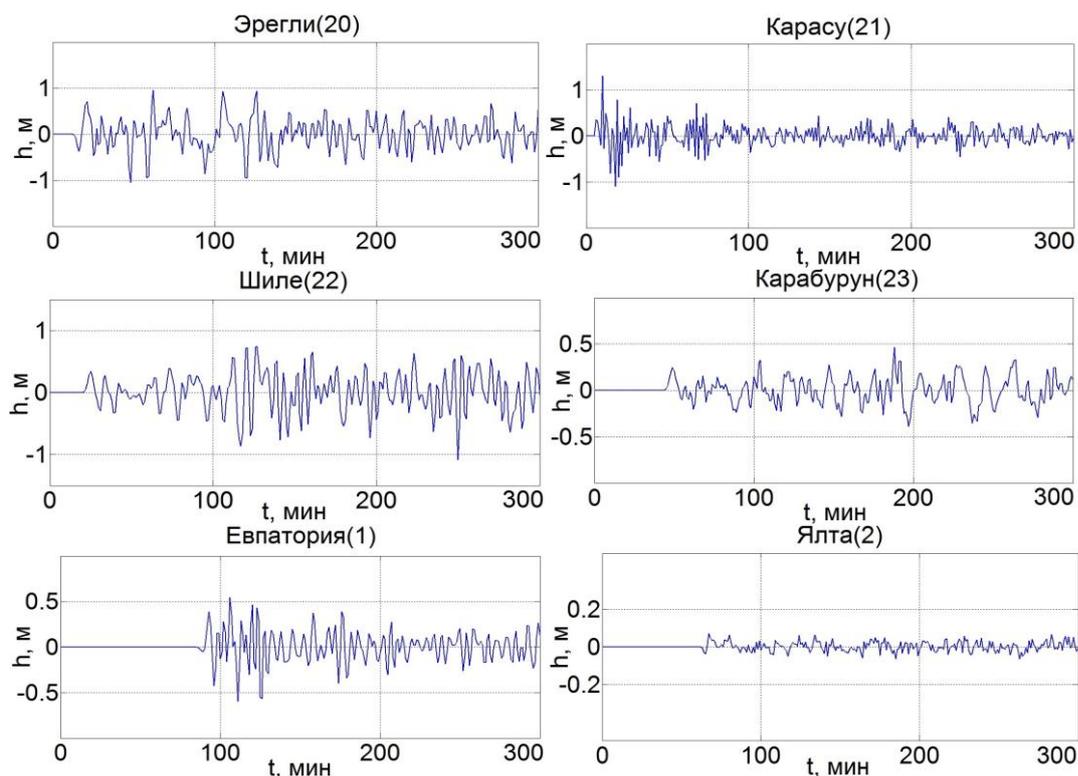


Рис. 8. Расчетные мареограммы при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 1) для четырех пунктов на турецком побережье (20-23) и для двух пунктов на российском (1 и 2)

На турецком побережье максимальная высота волны достигает 1,2 м (п. 21) и уменьшается до 0,3 м по мере приближения к месту выхода газопровода на сушу (п. 23). Наибольшая частота колебаний уровня воды наблюдается в п. 21. На российском побережье максимальная высота дошедшей волны 0,5 м достигается в п. 1, в то время как в п.2 амплитуда колебаний уровня воды только порядка 0,1 м.

Таблица 2

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 1	Максимальные высоты, м	Максимальное понижение уровня воды, м	Время дохода до пункта (ч, мин)	Фаза подхода волны (+) горб, (-) впадина
20	0,98	1,01	13 мин	-
21	1,2	1,05	4 мин	+
22	0,75	0,85	20 мин	+
23	0,47	0,4	45 мин	+
1	0,56	0,6	1 ч 26м	-
2	0,08	0,06	1 ч 02 м	-

Можно отметить, что частота колебаний уровня воды в п. 1 значительно выше, чем в п.2, что, возможно, связано с особенностями шельфовой зоны на каждом из участков. Основные данные расчета для этих пунктов приведены в табл. 2. Хорошо видно, что на симметричной изобате максимальная глубина впадины может превышать максимальную высоту горба.

Для этого же СЦЕНАРИЯ 1 рассмотрим локализацию сейсмического очага к западу от возможного положения газопровода (рис. 3, очаг 2). На рис. 9 приведено формирование очага цунами для этого случая (верхняя панель).

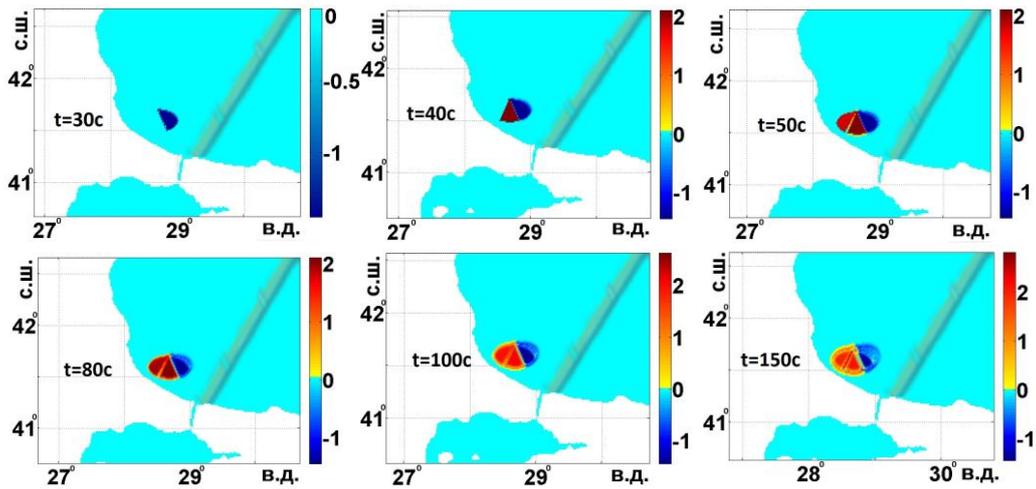


Рис. 9. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 150 с

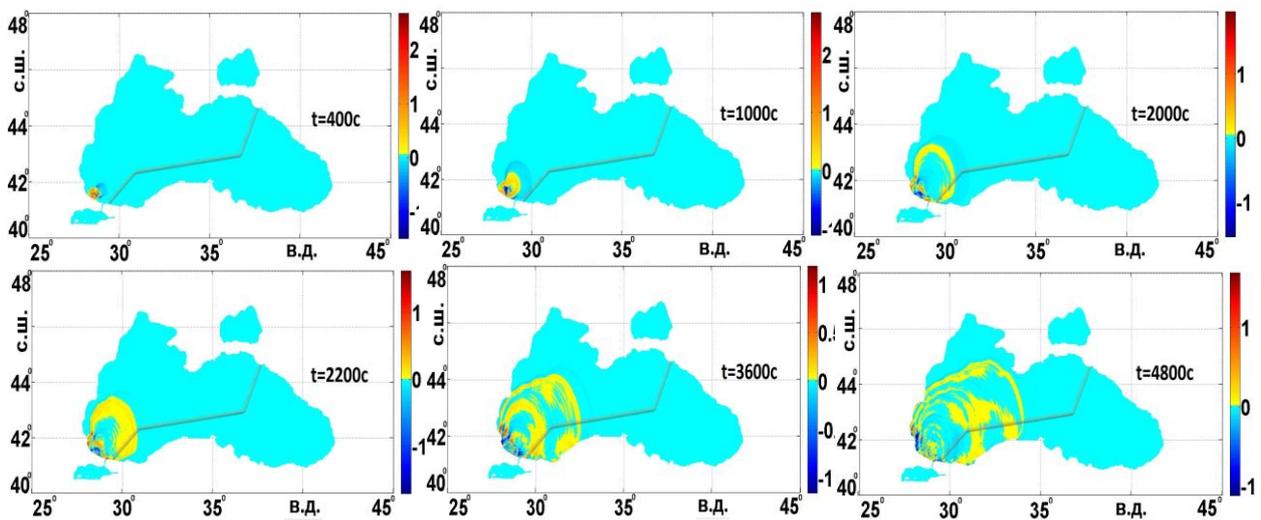


Рис. 10. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) для моментов времени:

$t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 33 \text{ мин } 20 \text{ с}; t = 36 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 1 \text{ час}; t = 1 \text{ ч } 20 \text{ мин}$

Видны хорошо сформированные на поверхности воды впадина и два горба. На рис. 9 приведена дальнейшая эволюция волновых фронтов: четко выражен фронт понижения, направленный на север и северо-восток. При этом сценарии волновой фронт достигает места выхода газопровода на турецком побережье за кратчайшее время после начала процесса. С другой стороны фронта волна по глубокой воде распространяется в северо-восточном направлении с относительно большой скоростью. Хорошо видно, что к месту начала морского участка газопровода на противоположном берегу волна подойдет за время больше 5000 с (рис. 9). На рис. 10 приведены расчетные мареограммы для первого сценария для очага 2 при $M=7,0$, для четырех пунктов на юго-западном побережье Черноморской акватории (20-23) и двух пунктов на российском побережье (1 и 2). В пп. 20, 21, 22 волна подходит к берегу незначительным понижением уровня.

В п. 23 можно отметить относительно большую высоту 1,8 м первого гребня и большую частоту колебаний уровня воды. На российском побережье (пп. 1,2) волны приходят откатом с максимальной высотой до 0,1 м. В табл. 3 приведены данные по максимальным высотам на семиметровой изобате, время дохода волны до определенного виртуального ма-

реографа и фаза подхода волны к берегу. Как следует из таблицы, во всех пунктах, кроме п. 23, волна подходит к берегу впадиной. В п. 23 волна доходит за кратчайшее время (5 мин), и имеет максимальные величины амплитуд наката и отката ~ 2 м. В п.22 волна доходит за 23 мин, и размах колебаний уровня в волне вдвое меньше. Во всех остальных пунктах максимальные значения повышения и понижения уровня воды в волне относительно невелики.

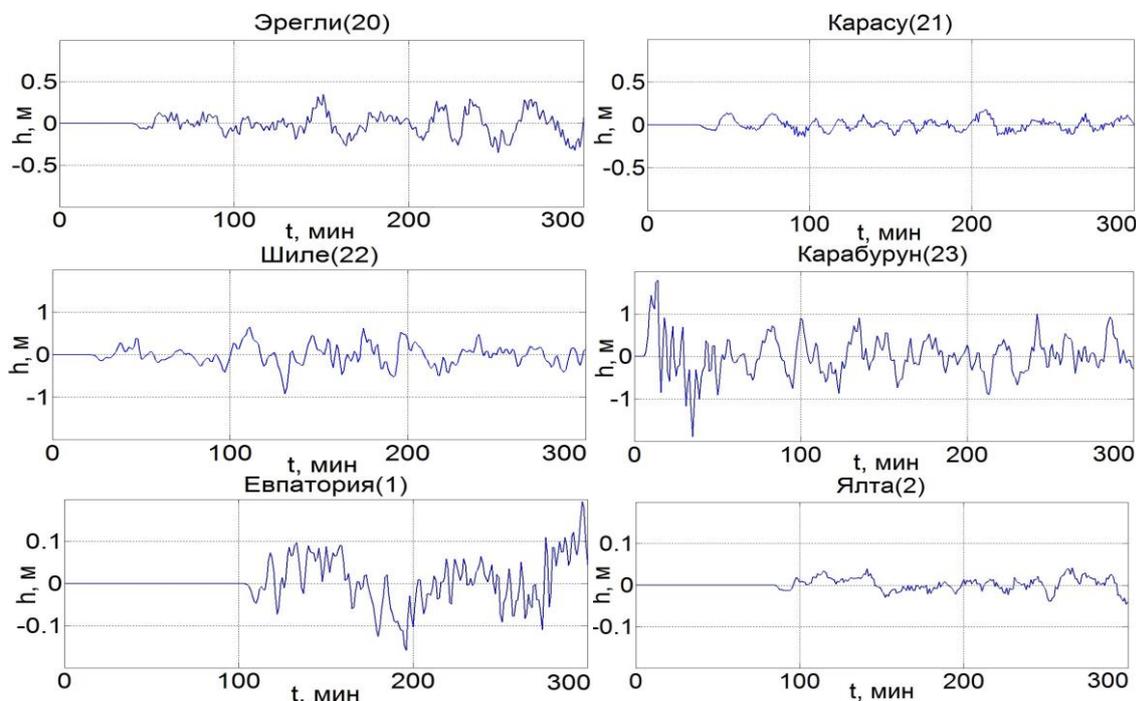


Рис. 11. Расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) для четырех пунктов на турецком побережье (20-23) и двух пунктов на российском (1 и 2)

Таблица 3

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 1	Максимальные высоты на 7 м изобате, м	Максимальное понижение уровня воды на 7м изобате, м	Время дохода до пункта, (ч, мин)	Фаза подхода волны: (+) горб, (-) впадина
20	0,3	0,3	43 мин	-
21	0,2	0,15	33 мин	-
22	0,7	0,9	23 мин	-
23	1,8	1,9	5 мин	+
1	0,19	0,15	1 час 45 мин	-
2	0,04	0,04	1 час 26 мин	-

СЦЕНАРИЙ 2. «Новый голубой поток»

На рис. 12-14 приведены результаты численного моделирования для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б). На рис. 12 приведено формирование очага цунами (верхняя панель) и три начальных момента эволюции очага цунами до $t = 120$ с, на рис. 13 дано положение волновых фронтов для шести моментов времени для этого сценария. Хорошо видно, что в месте выхода газопровода на сушу на турецком побережье волна появляется меньше, чем через 7 мин. С другой стороны волновой фронт продвигается в северо-восточном направлении, достигая места входа газопровода в морской участок на российском побережье за 46 мин. К российскому побережью первой подходит небольшая волна понижения, затем следует горб волны.

На рис. 14 приведены расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 для очага б при магнитуде землетрясения $M=7$ для четырех пунктов у турецкого побережья на юго-востоке Черноморской акватории (пп. 11-14) и двух пунктов на северо-востоке акватории у российского побережья (пп. 5 и 6). Хорошо видно, что в пп. 11,12, 5 и 6 волна подходит к берегу отрицательной фазой (откатом); в двух пунктах 13 и 14 первая волна положительная. Высоты волн у турецкого побережья в п.13 (вблизи места расположения турецкого терминала газопровода) лежат в интервале от 20 см до 1м.

А у места входа газопровода в морской участок на российском побережье (п. 6) максимальные высоты достигают 60 см.

В табл. 4 приведены данные для расчета по этому сценарию. Хорошо видно, что только в двух пунктах (п.13 и 14) волна подходит к берегу горбом, в то время как в остальных пунктах (11 и 12 на турецком побережье, 5 и 6 на российском побережье) цунами начинается с отхода воды от берега. Хорошо известно, что в этих случаях возможно значительное усиление высоты волны, следующей за волной отката [24].

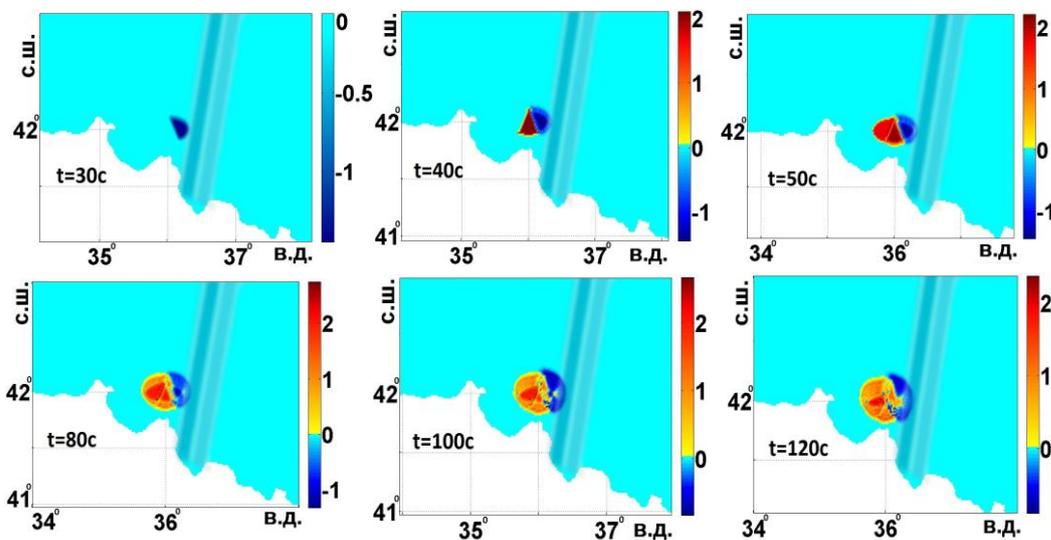


Рис. 12. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 120 с

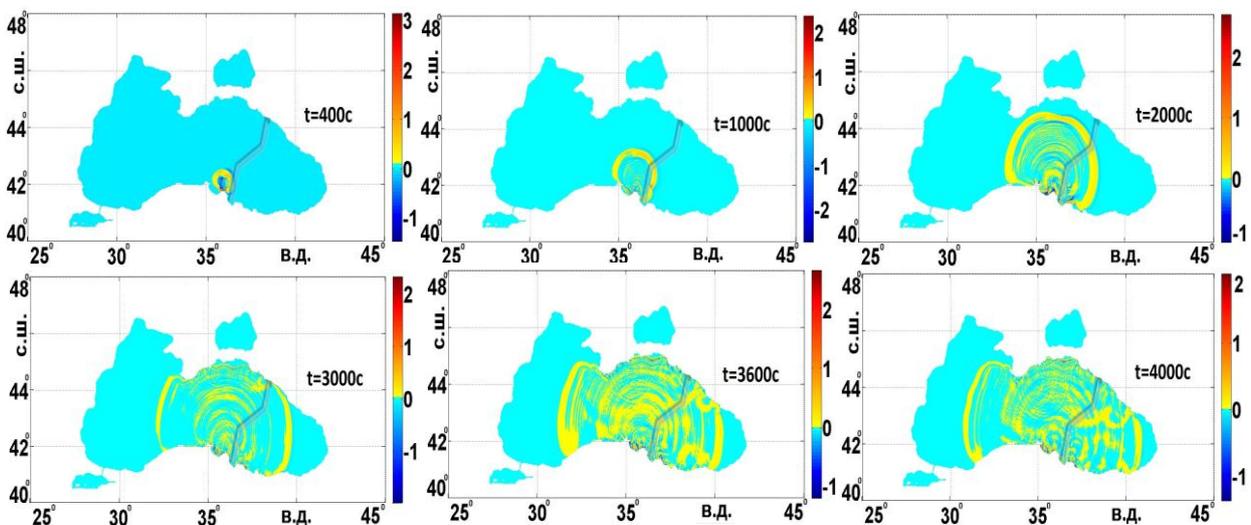


Рис. 13. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б) для моментов времени:

$t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 33 \text{ мин } 20 \text{ с}; t = 50 \text{ мин}; t = 1 \text{ ч}; t = 1 \text{ ч } 6 \text{ мин } 40 \text{ с}$

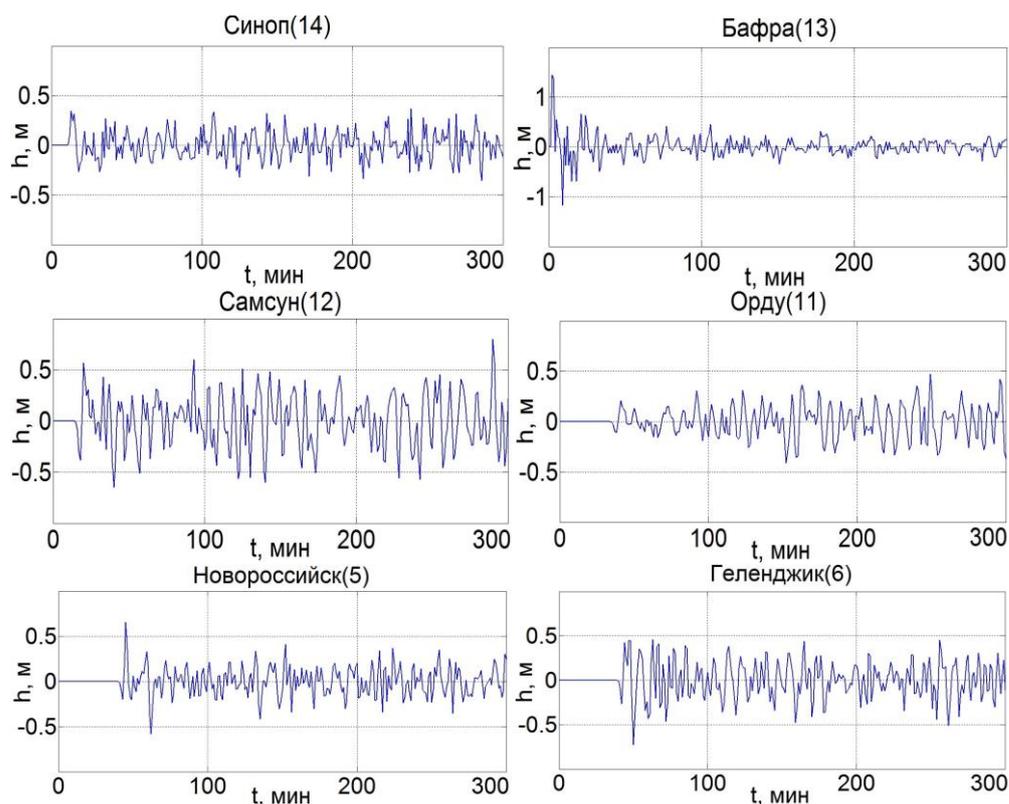


Рис. 14. Расчетные мареограммы для сценария 2 (очаг 6) для четырех пунктов на юго-востоке Черноморской акватории (11-14) и двух пунктов на российском побережье (5 и 6)

Таблица 4

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 2	Максимальные высоты, м	Максимальное понижение уровня воды, м	Время дохода до пункта (ч, мин)	Фаза подхода волны (+) горб, (-) впадина
11	0,47	0,38	34 мин	-
12	0,7	0,62	14 мин	-
13	1,43	1,2	1 мин	+
14	0,35	0,38	11 мин	+
5	0,65	0,6	41 мин	-
6	0,48	0,73	39 мин	-

Для СЦЕНАРИЯ 2 рассмотрим локализацию сейсмического очага к востоку от возможного положения газопровода (очаг 7). На рис. 15 приведена генерация данным очагом очага цунами и его эволюция в первые моменты времени. Как видно из рис. 7, очаг цунами на поверхности воды имеет дипольный характер: с восточной стороны формируется полусферический фронт волны понижения, в то время как с западной стороны фронт волны повышения имеет более резкую, вытянутую форму. Глубина понижения уровня с восточной стороны порядка 1 м, а высота подъема поверхности с западной стороны достигает 2 м. С ростом времени оба фронта волны расширяются, при этом глубина понижения с восточной стороны, заметно уменьшается ($\sim 0,5$ м) и область, разделяющая фронты понижения и повышения заметно расширяется. Наибольшие высоты в волне повышения (западный фронт волны) достигаются со стороны побережья, в то время как высота уровня на южной части фронта волны повышения несколько уменьшается.

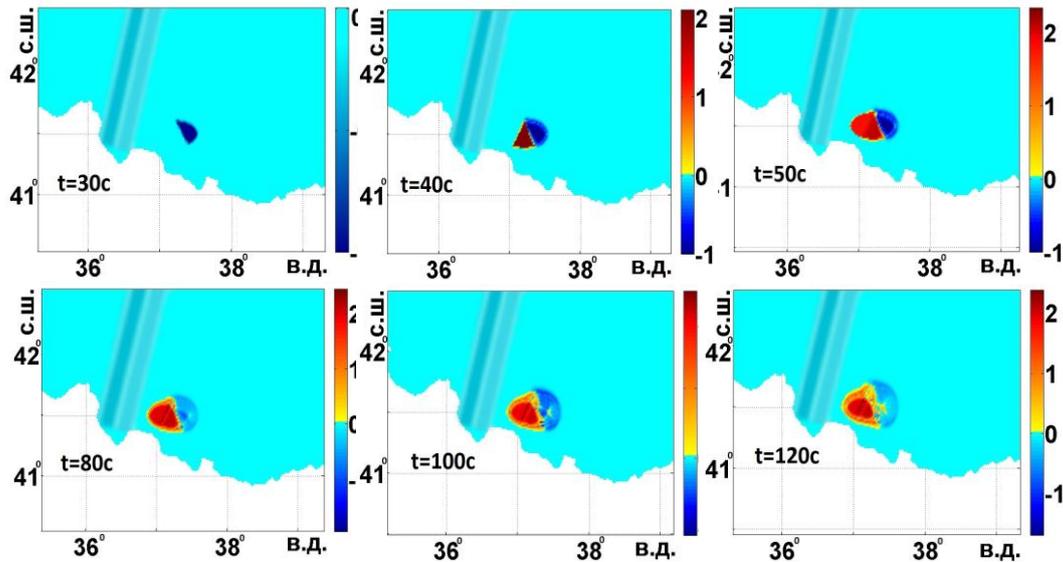


Рис. 15. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 120 с

На рис. 16 приведено положение волновых фронтов для шести моментов времени при распространении волн от очага 7 по акватории Черного моря.

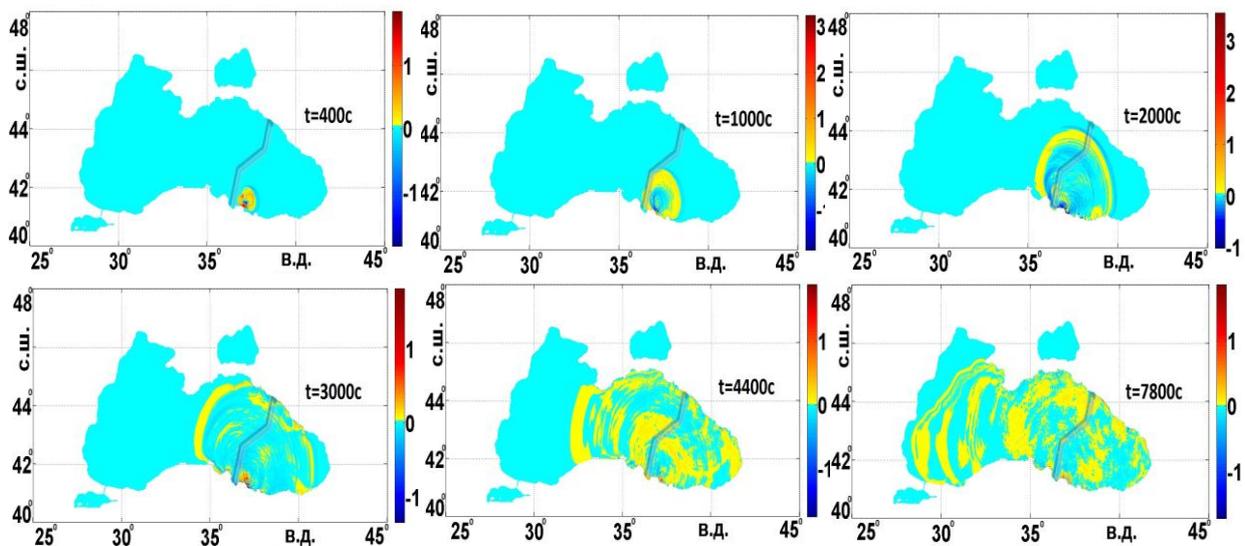


Рис. 16. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) для моментов времени: $t = 400$ с; $t = 1000$ с; $t = 2000$ с; $t = 3000$ с; $t = 4400$ с; $t = 7800$ с

На рис. 17 приведены расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 для очага 7 при магнитуде землетрясения $M=7$ для четырех пунктов у турецкого побережья на юго-востоке Черноморской акватории (пп. 10-12) и двух пунктов на северо-востоке акватории у российского побережья (пп.6 и 7). Хорошо видно, что в пп. 10, 11, 6 и 7 волна подходит к берегу отрицательной фазой (откатом); в двух пунктах 12 и 13 первая волна положительная. Высоты 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) наблюдаются в пп. 10 и 13. В то же время размах колебаний в волне в пп. 11 и 12 (Самсун) достигает 1 м, причем в п. 12, в отличие от мареограмм в остальных пунктах, на фоне относительно высокочастотных колебаний уровня наблюдается дополнительная низкочастотная моду-

ляция (несущая). Такое поведение мареограммы может быть вызвано геометрическими особенностями батиметрии в районе шельфовой зоны в окрестности п.12. На российском побережье в пп. 6 и 7 размах колебаний на мареограмме порядка 0,6 м.

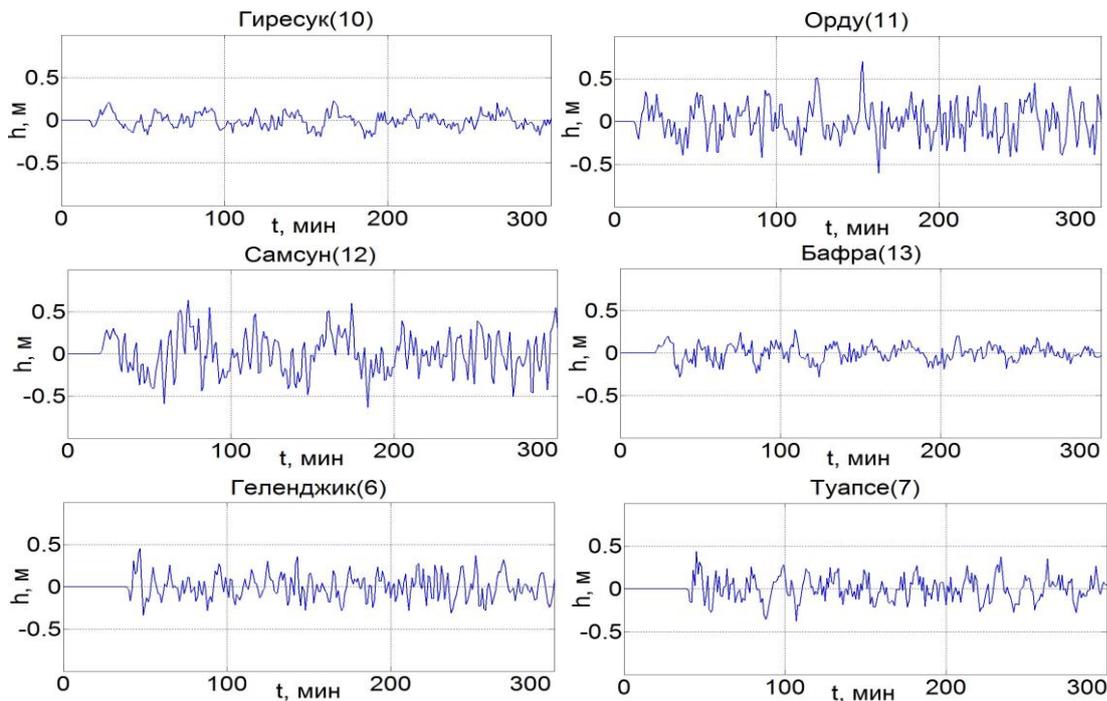


Рис. 17. Расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) для четырех пунктов на юго-востоке Черноморской акватории (10-13) и двух пунктов на российском (6 и 7)

Более наглядно полученные выводы можно видеть на рис. 14, где приведены максимальные распределения высот волн при расчетах по обоим сценариям.

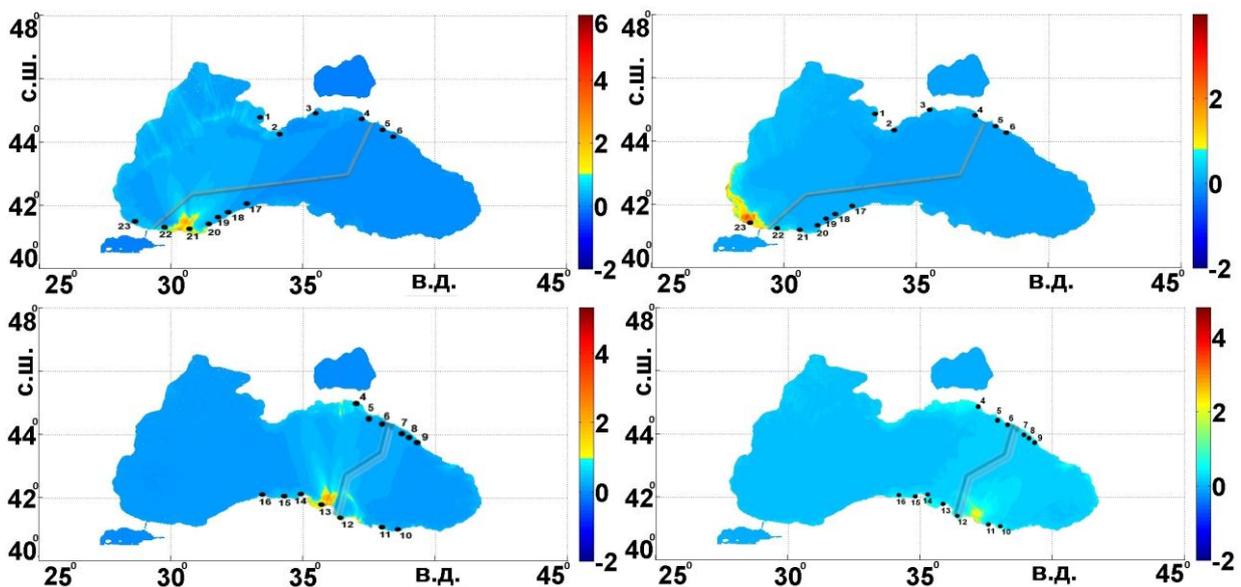


Рис. 18. Максимальные распределения высот волн для сценариев I и II от очагов 1, 2 и 6, 7 (точками отмечено положение виртуальных мареографов)

По цветовой шкале видно, что области 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. Таким образом, на рис. 1 – рис. 14 приведены данные по расчету волновых полей для умеренных землетрясений с $M=7$. Аналогичные расчеты проведены также для магнитуды землетрясения для очагов с той же локализацией для $M=7,3$. В табл. 5-8 приведены сравнительные данные для максимальных высот волн для магнитуд $M=7$ и $M=7,3$ для конкретных пунктов вдоль турецкого и российского побережий, где было фиксировано положение расчетных мареографов. Однако гистограммы (рис. 19 – рис. 22) показывают, что в ближайших точках к выбранным пунктам значения максимальных высот могут несколько отличаться, что легко объяснить физическими эффектами, а также геометрией береговой зоны. Так, рядом с п.12 (Самсун), в котором расчет показал 0,74 м, можно видеть максимальные высоты до 2 м (рис. 22).

Таблица 5
СЦЕНАРИЙ 1 (очаг 1)

Номер мареографа	Максимальный высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
20	0,98	2,6
21	1,2	2,9
22	0,75	1,8
23	0,47	0,8
1	0,56	0,9
2	0,08	0,21

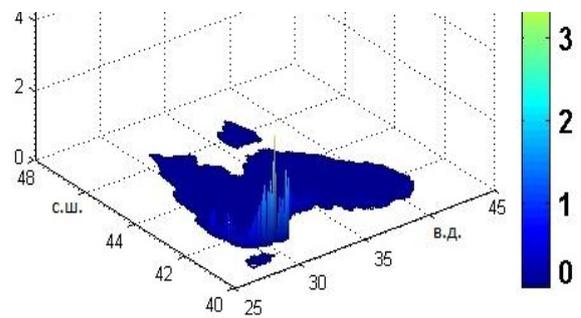


Рис. 19. Гистограмма для очага 1, $M=7$

Таблица 6
СЦЕНАРИЙ 1 (очаг 2)

Номер мареографа	Максимальный высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
20	0,3	1,3
21	0,2	0,51
22	0,7	1,5
23	1,8	3,8
1	0,19	0,6
2	0,04	0,13

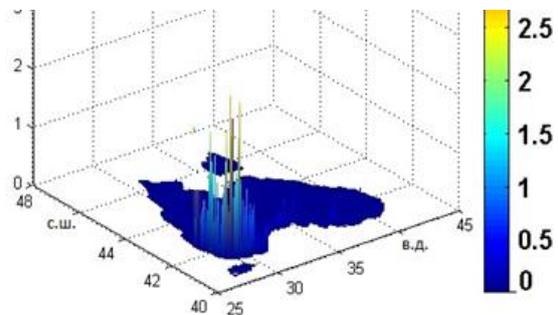


Рис. 20. Гистограмма для очага 2, $M=7$

Таблица 7
СЦЕНАРИЙ 2 (очаг 6)

Номер мареографа	Максимальные высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
14	0,35	1,2
13	1,43	2,2
12	0,7	1,5
11	0,47	1,0
5	0,65	1,4
6	0,48	1,8

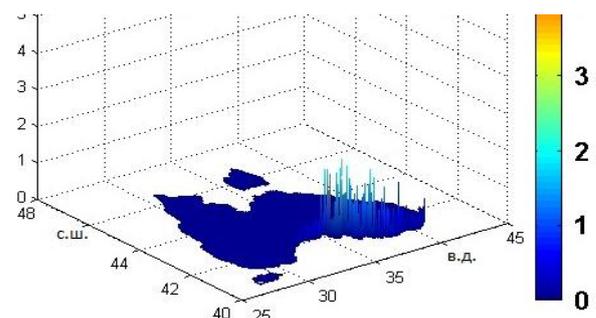


Рис. 21. Гистограмма для очага 6, $M=7$

Таблица 8
СЦЕНАРИЙ 2 (очаг 7)

Номер мареографа	Максимальные высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, $M=7,3$
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

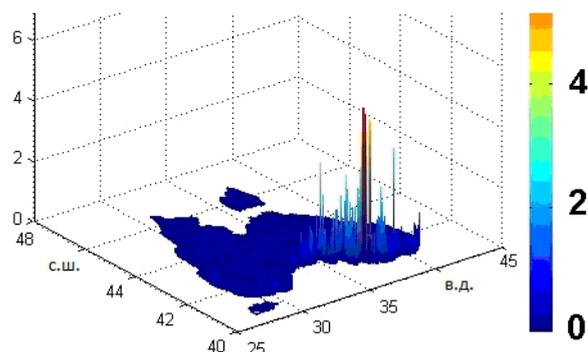


Рис. 22. Гистограмма для очага 7, $M=7$

Заключение

Таким образом, можно видеть, что в районах входа-выхода газопроводов и расположения морских терминалов газопроводов с газоизмерительными станциями максимальные высоты волн, оцененные для умеренных магнитуд землетрясения, которые чаще наблюдаются в акватории Черного моря, как правило, не превышают 1 м (см. табл. 5-8, $M=7$). В некоторых пунктах высоты волн в районах выхода на побережье могут принимать максимальные значения до 2 м. При более сильном землетрясении (например, СЦЕНАРИЙ 2, $M=7,3$), высоты волн в районах выхода газопровода на побережье могут достигать в некоторых пунктах до 4 м. При этом необходимо учесть то, что расчет производился только до семиметровой изобаты. Можно предположить, что береговой склон внесет дополнительный вклад в подрастание высоты волны, выходящей на берег, что необходимо учитывать при данном проектировании.

Библиографический список

1. Соловьева, О.Н. Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 3. С. 679–685.
2. Соловьева, О.Н. Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря / О.Н. Соловьева, И.П. Кузин // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 2. С. 826–833.
3. Фомичева, Л.А. Цунами в Черном море / Л.А. Фомичева, А.Б. Рабинович, А.Н. Демидов // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1 Гидрометеорологические исследования. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 352–354.
4. Григораш, З. К. Черноморские цунами 1927г. по мареографическим записям // *Тр. МГИ АН СССР*. – М.: АН СССР 1959-17. 1959. С. 59–67.
5. Григораш, З.К. Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // *Океанология*. 1972. Т. 12. Вып. 3. С. 417–422.
6. Доценко, С.Ф. Черноморские цунами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1994.Т. 30. С. 513–519.
7. Yalçiner, A. Tsunamis in the black sea: comparison of the historical, instrumental, and numerical data / A. Yalçiner [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Т. 109. № 12. С. 1–13.
8. Гарагаш, И.А. Геомеханическая оценка оползневых процессов и их мониторинг на склонах Черного моря связи с реализацией проекта «Голубой поток» / И.А. Гарагаш, Л.И. Лобковский // *Современные методы и средства океанологических исследований: VI Междунар. научно-техн. конф.* 2000. С. 5–15.

9. **Yolsal-Cevikbilen, S.** Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean / S. Yolsal-Cevikbilen, T. Taymaz // *Tectonophysics*. 2012. V. 61. P.536–537.
10. **Доценко, С.Ф.** Численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журн.* 1995. № 1. С. 67–80.
11. **Доценко, С.Ф.** Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журнал.* 1995. № 6. С. 3–16.
12. **Зайцев, А.И.** Численное моделирование возможных оползневых цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв. АИН РФ, ПММ.* 2003. Т. 4. С. 150–154.
13. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв. АИН РФ, ПММ.* 2002.Т. 3. С. 27–34.
14. **Зайцев, А.И.** Прогноз высот волн цунами на российском побережье Черного моря / А.И. Зайцев, Е.Н. Пелиновский // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 5. С. 1–9.
15. **Колчина, Е.А.** Численное моделирование волн цунами с учетом динамики подводного очага (на примере акватории Черного моря): дисс. ...канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 198 с.
16. **Lobkovsky, L.I.** Estimation of Maximum Heights of Tsunami Waves for the Sochi Coast from Strong Submarine Earthquakes / L.I. Lobkovsky, R.Kh. Mazova, E.A. Kolchina // *Doklady Akademii Nauk.* 2014. V. 456. № 5. P. 604–609.
17. **Mazova, R.E.** Numerical Simulation of Long Water Wave Generation by Dynamic Seismic Source and Their Propagation for Black Sea Basin / R.E. Mazova, E.A. Tresvyatskaya // *Russ. J. Earth Sci.* V.8, ES5001, doi:10.2205/2006ES000208 <http://dx.doi.org/10.2205/2006ES000214> (2006).
18. **Мазова, Р.Х.** Максимальные высоты волн на Сочинском побережье при возможных сильных подводных землетрясениях / Р.Х. Мазова, Л.И. Лобковский, Е.А. Колчина // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2009. Т. 18. № 12. С. 16–21.
19. <http://www.gazpromexport.ru/projects/6/>; <http://www.south-stream-offshore.com>
20. **Чебаненко, И.И.** Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережий Черного моря / И.И. Чебаненко [и др.] // *Геологический журн.* 2003. № 1. С. 54–58.
21. **Казмин, В.Г.** Современная кинематика микроплит в Черноморском-Южно-Каспийском регионе / В.Г. Казмин, Л.И. Лобковский, Б.Г. Пустовитенко // *Океанология.* 2004. 44. С. 600–610.
22. **Wells, D.L.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement / D.L. Wells, K.J. Coppersmith // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. V. 84. P. 974–1002.
23. **Лобковский, Л.И.** Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах / Л.И. Лобковский, Б.В. Баранов // *Доклады АН СССР.* 1984. Т. 275. №4. С. 843–847.
24. **Пелиновский, Е. Н.** Нелинейная динамика волн цунами / Е. Н. Пелиновский. – Горький: изд. ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
25. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
26. **Sielecki, A.** The numerical integration of the non-linear shallow-water equations with sloping boundaries / A. Sielecki, M. Wurtele // *J. Comp. Phys.* 1970. V. 6. P. 219–236.
27. **Марчук, Ан.Г.** Численное моделирование волн цунами / Ан.Г. Марчук, Л.Б. Чубаров, Ю.И. Шокин. – М.: Наука, 1983. – 267 с.

R.Kh. Mazova, E.A. Kolchina, E.A. Ovchinnikova, I.V. Remizov

ESTIMATION OF TSUNAMI DANGER OF BLACK SEA COAST IN REGIONS OF PLANNED VARIANTS OF TRACE OF NEW GAS PIPELINE RUSSIA-TURKEY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The numerical simulation tsunami waves in the Black Sea basin is performed to estimate possible tsunami danger at the coast in the points of input-output of gas pipeline for two scenarios of planned trace of new line of gas pipeline “Russia-Turkey”.

Scientific contribution: Theoretical significance of the study presented in the work is provided by novelty of results of numerical simulation and obtaining of dependence of wave regime characteristics on physical and geometrical parameters of the problem. Practical significance of obtained results is provided by possibility of their direct using to decide applied problems of coastal tsunami zonation.

Results: It is demonstrated that under possible graduate earthquakes the danger of tsunami wave action for realization of considered directions of trace of gas pipeline is absent. In contrast, under stronger earthquake the danger of destruction of infrastructure is possible. In this connection, the detailed tsunami zonation of local parts of coast in the region of input-output of planned gas pipelines.

Novelty: The novelty of research results is provided by novelty of research results of tsunami wave characteristics produced by keyboard seismic mechanism, to analyze real problem of estimation of tsunami danger for proposed way of trace of gas pipelines.

Key words: tsunami waves, seismic and tsunami danger, tsunamigenic earthquakes, numerical simulation, Black Sea coast.