



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН»
г. Севастополь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЦУНАМИ В СИСТЕМУ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ

Белоконь А.Ю., Лазоренко Д.И., Фомин В.В.

V Всероссийская научная конференция
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»
12 – 14 ноября 2024 г.

Актуальность темы исследования

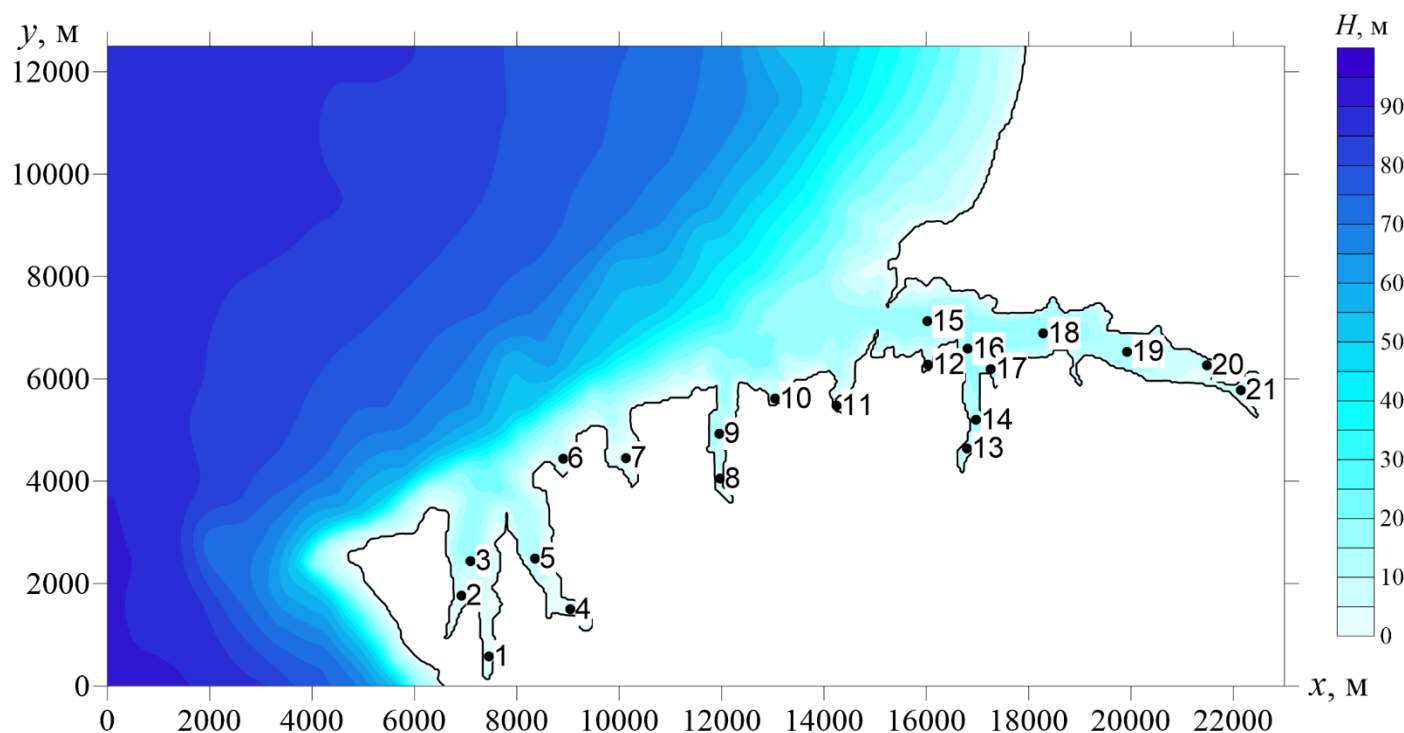
- В Черном море известно о 50 случаях цунами, произошедших за последние 3000 лет, большинство из которых имели сейсмическую природу [Никонов и др., 2018].
- Одним из наиболее сложных участков побережья Черного моря является прибрежная зона Севастополя. Район Севастополя отнесен к особо сейсмоопасной области вследствие того, что здесь проходит граница зон разной балльности землетрясений.
- 103 г. – во время сильного землетрясения в районе Севастопольской бухты вода отступила в сторону моря на расстояние до 3–4 км, при этом высота пришедших волн составила не менее 2 м [Никонов, 1997].
- 29 апреля 1650 г. в северо-западной части Черного моря произошло землетрясение, которое вызвало волны высотой около 3 м вблизи Севастополя [Никонов и др., 2018].
- Разрушительное подводное землетрясение магнитудой 6,5 произошло в 11 сентября 1927 в 30 км к юго-востоку от г. Ялта. Подъемы уровня при штиле наблюдались в разных местах и после сильных толчков. Последующие более слабые толчки с очагами у Севастополя и Балаклавы сопровождалась отходом воды от берега и накатыванием одиночных волн на берег [Безушко и др., 2015].
- 26 декабря 1939 г. сильное землетрясение $M = 8$ произошло в г. Фатса (побережье Турции). Волны цунами пересекли Черное море и были зарегистрированы мареографами в Севастополе, где высота волн составила 50 см [Никонов, 1997].
- Опасность проникновения цунами в бухты заключается также и в том, что цунами могут возбуждать в них сейшевые колебания.

Целью настоящей работы являлось исследование проникновения волн цунами в систему севастопольских бухт с помощью математического моделирования.

Математическая постановка задачи

Динамика волн моделировалась с помощью нелинейной гидродинамической модели *Simulating WAVes till SHore (SWASH)*.

Расчеты выполнялись на прямоугольной сетке с шагом 50 м по пространству и шагом по времени 0,2 с.



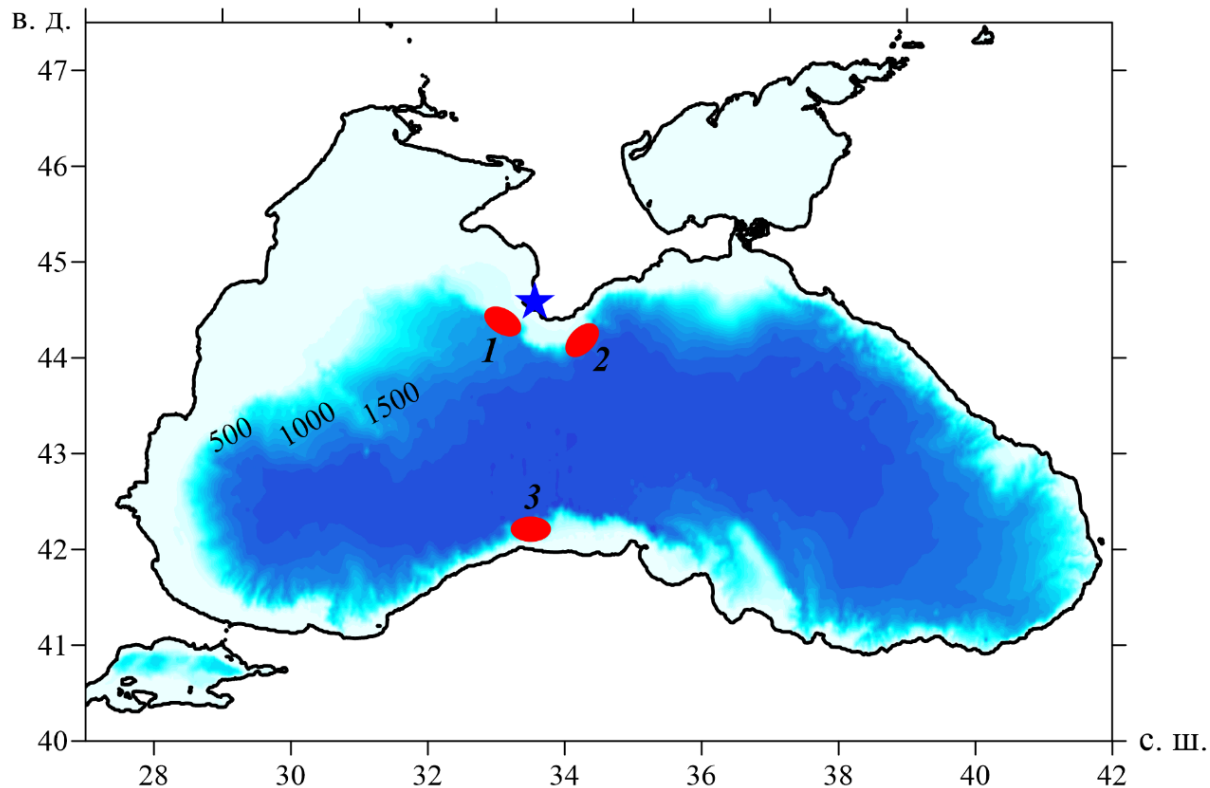
Рельеф дна расчетной области. Цифрами 1–21 обозначены станции (виртуальные мареографы), в которых анализировались колебания уровня моря, вызванные цунами.

Положение гипотетических очагов цунами в Черном море

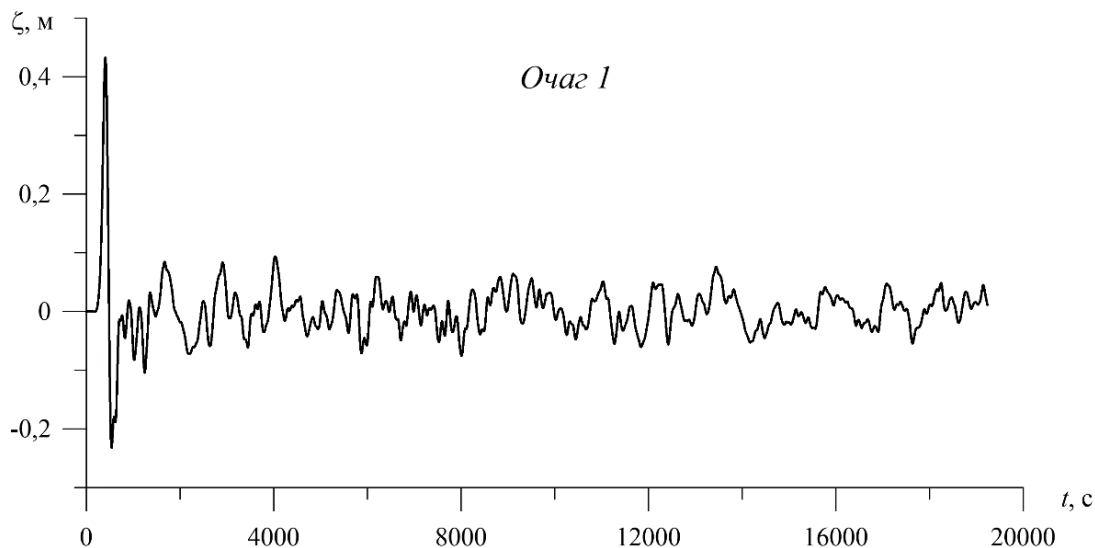
На западной границе расчетной области ($x = 0$) задавались колебания уровня моря, полученные с помощью модели цунами для бассейна Черного моря с пространственным разрешением 500 м и шагом по времени 1 с.

При моделировании использовались интерполированные батиметрические данные с 30-секундным разрешением GEBCO (<https://www.gebco.net/>).

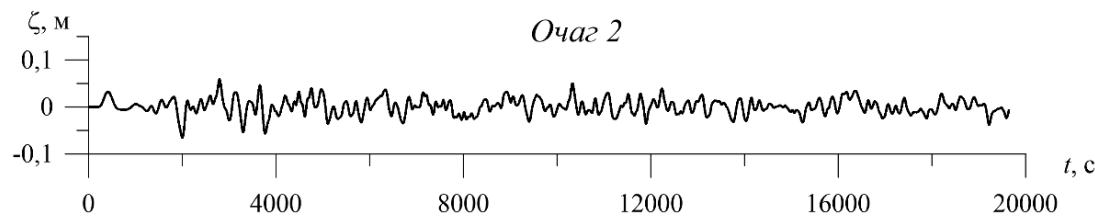
Моделировалось три случая возникновения цунами в Черном море в результате подводного землетрясения с магнитудой 7. Генерация очагов осуществлялась смещением свободной поверхности моря в форме эллипса.



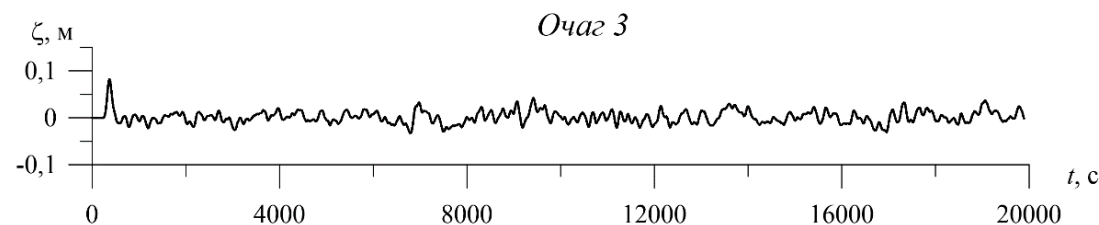
Колебания уровня моря в прибрежной зоне Севастополя, вызванные очагами цунами (западная граница расчетной области, глубина 90 м)



Для очага 1 максимум энергии приходится на головную волну, за ней следуют колебания меньшей амплитуды.

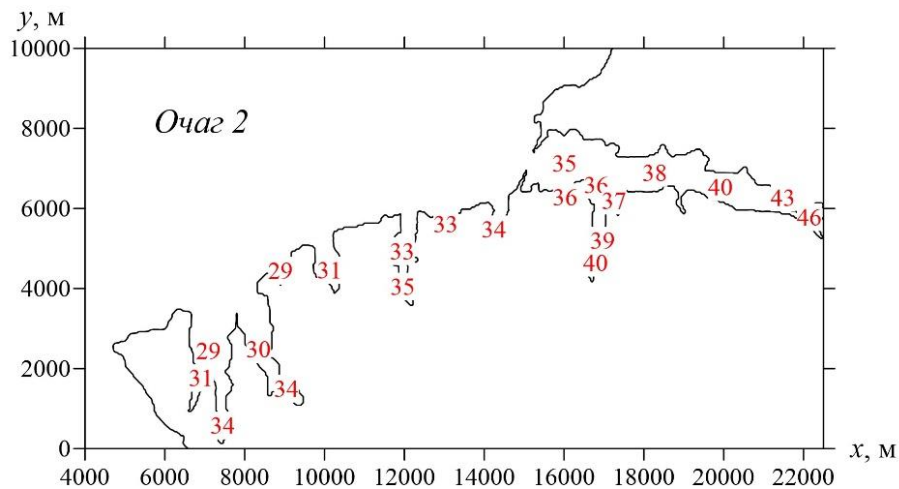
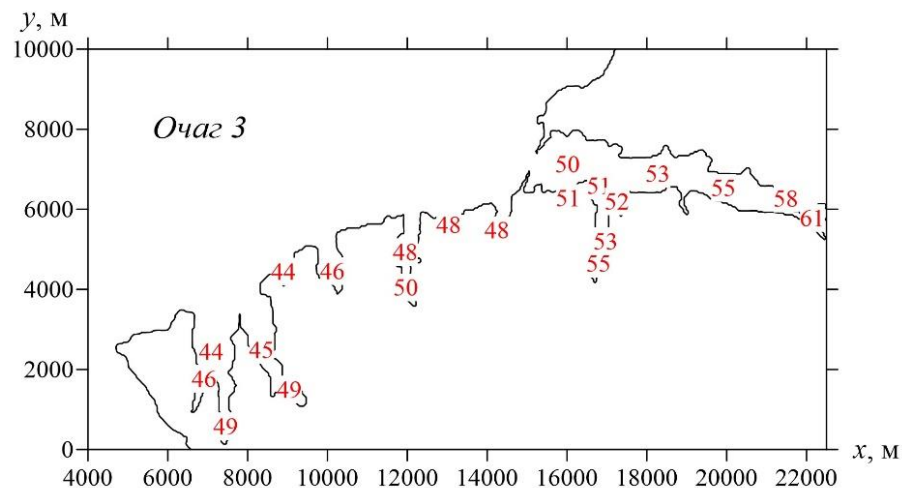
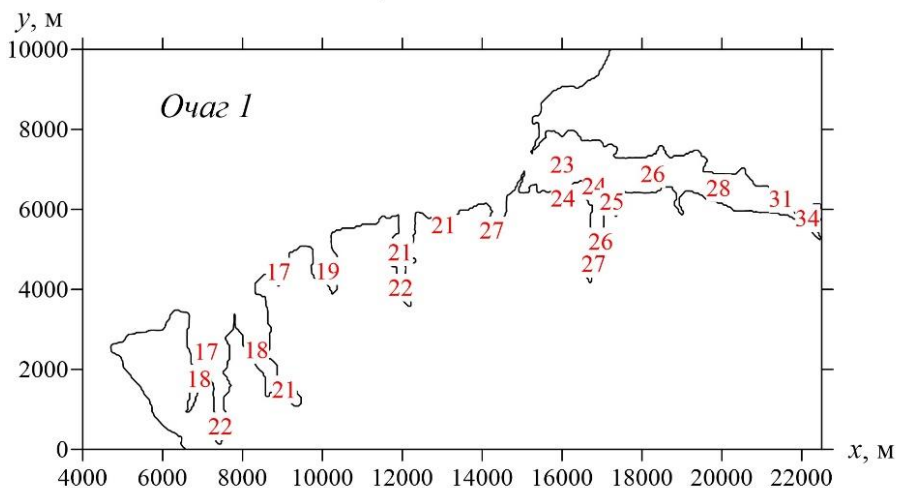


Малые амплитуды колебаний уровня для очагов 2 и 3 объясняются тем, что взморье Севастополя защищено мысом Херсонес от волн, приходящих с юга и юго-востока.



Время добегания волн цунами (мин) до побережья Севастопольских бухт из очагов цунами

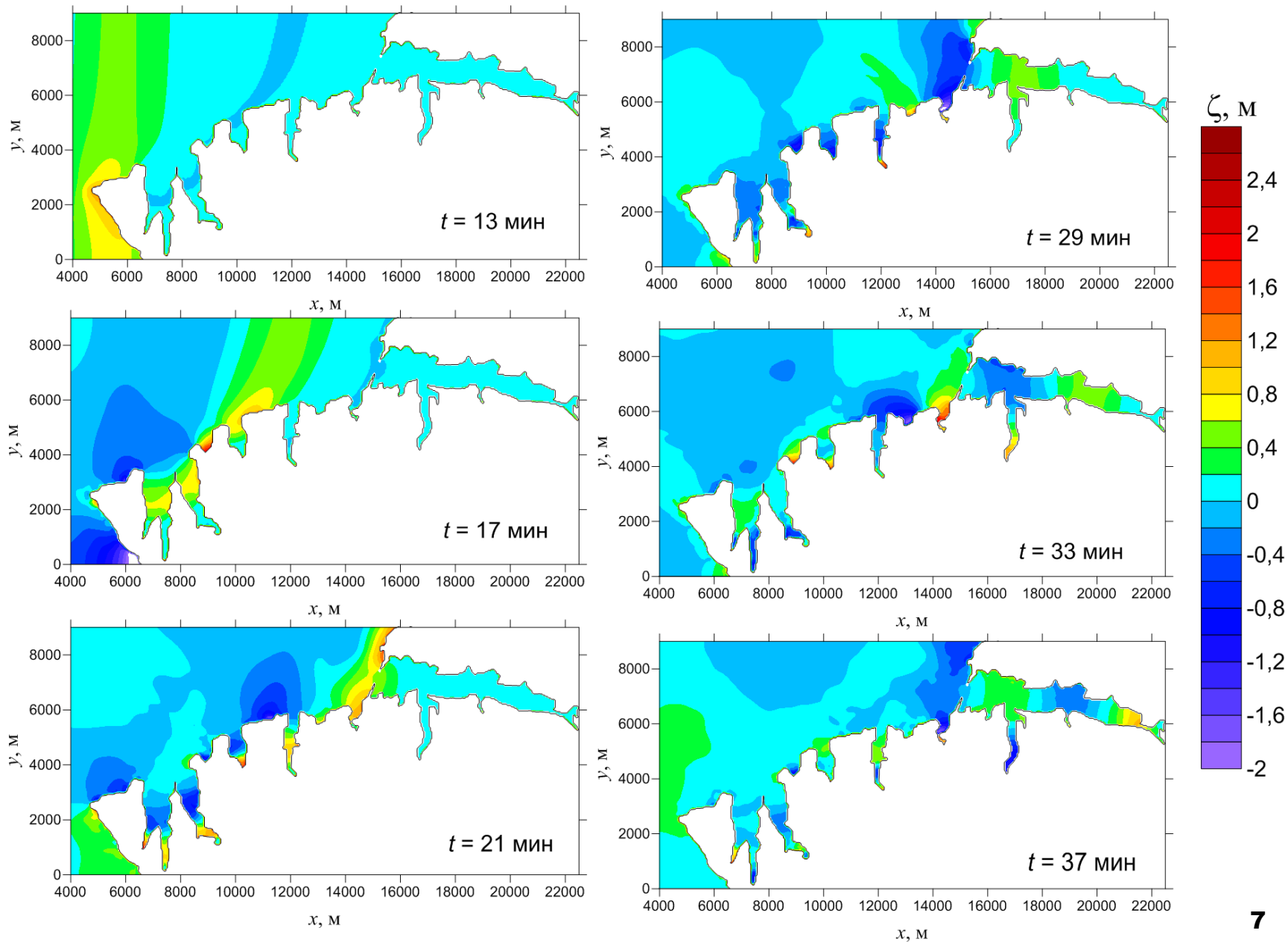
t , МИН



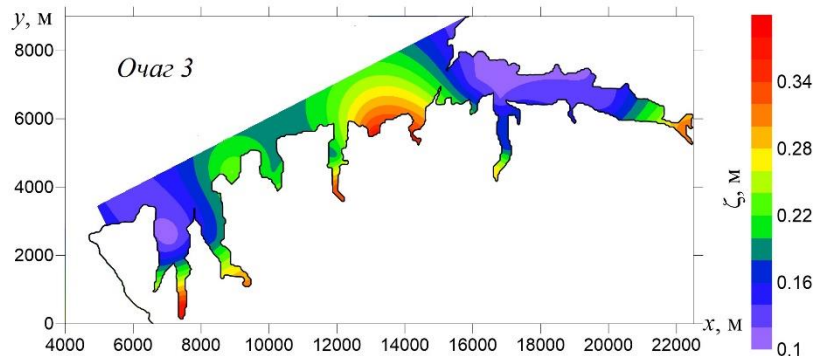
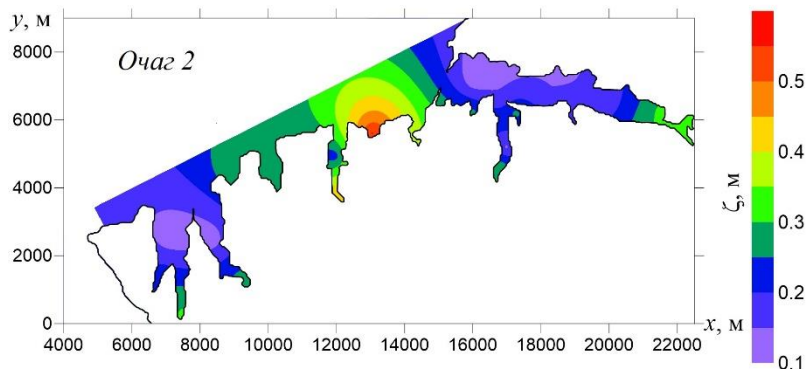
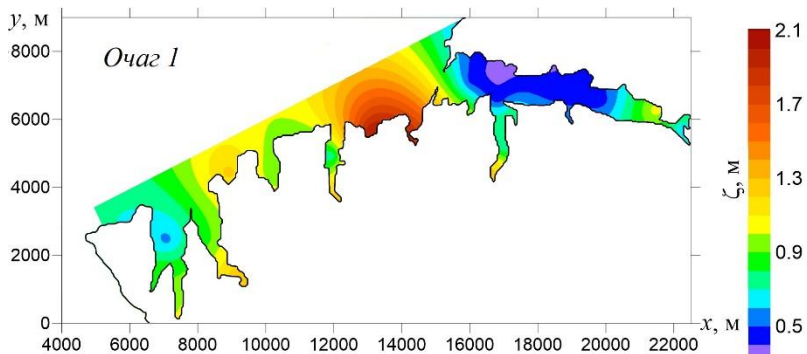
Для малых бухт:
очаг 1 – 17–22 мин;
очаг 2 – 29–34 мин;
очаг 3 – 44–48 мин.

Для Севастопольской бухты:
очаг 1 – 23–34 мин;
очаг 2 – 35–46 мин;
очаг 3 – 50–61 мин.

Поля уровня моря в системе севастопольских бухт при распространении волн цунами из очага 1



Максимальные повышения уровня моря при распространении волн из очагов 1–3



Внутри бухт амплитуды волн возрастают более, чем в 2–4 раза по сравнению с амплитудами на входе в расчетную область.

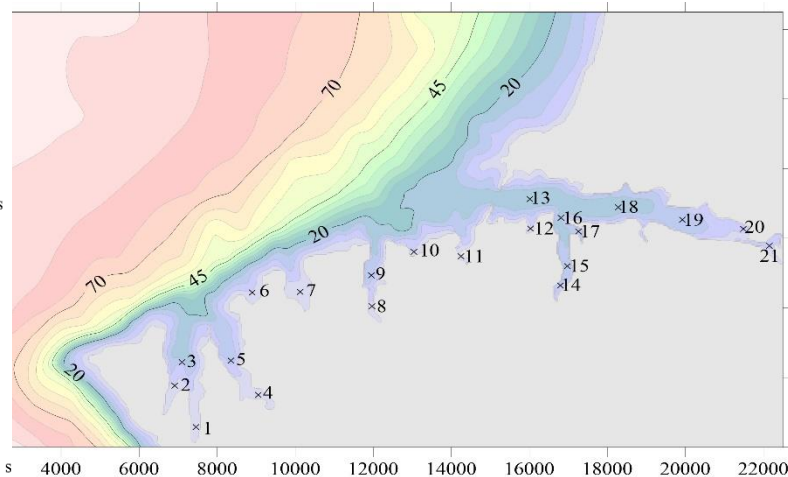
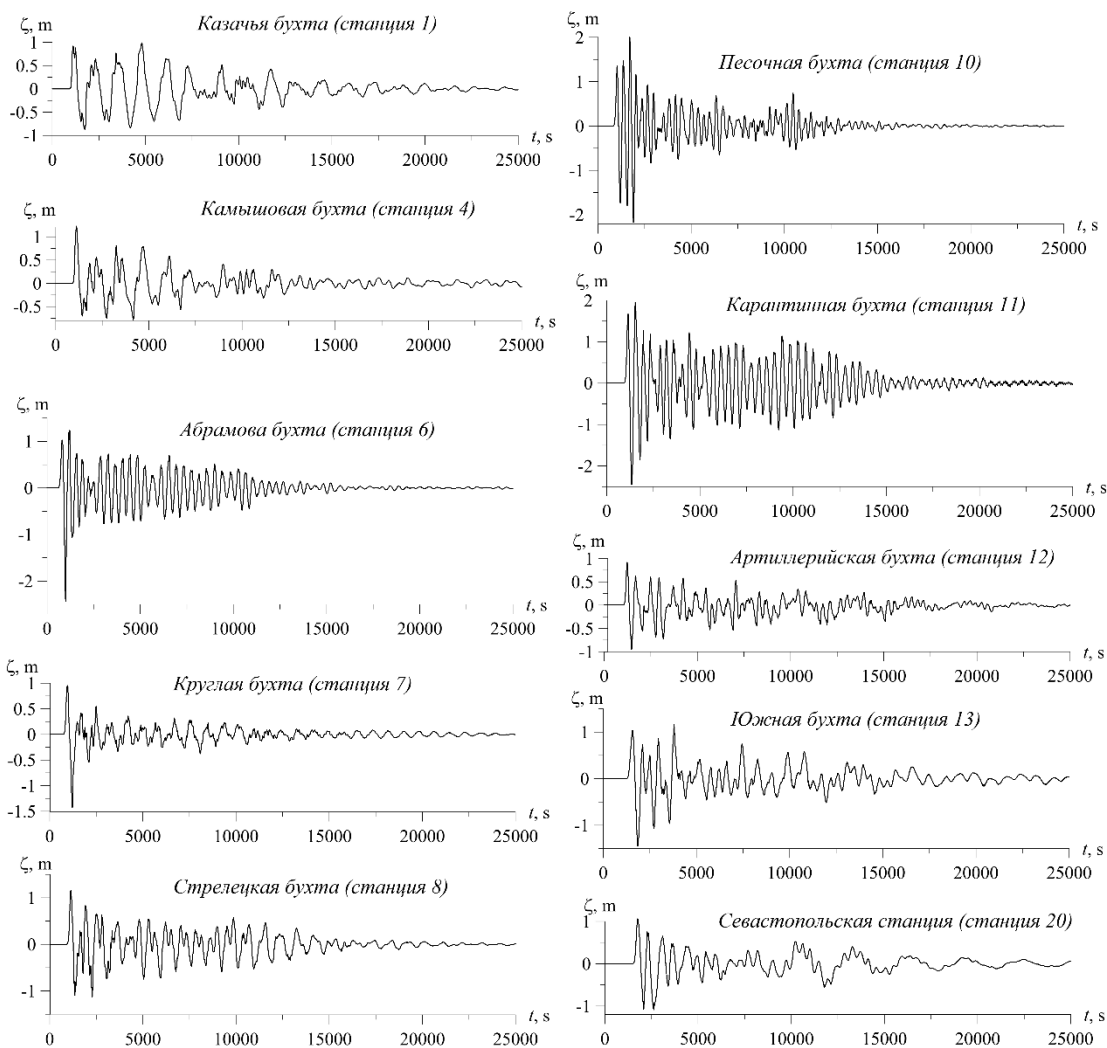
Максимальные повышения уровня моря получены для бухт Песочная и Карантинная, где они могут достигать 2 м в случае прихода волн из ближнего очага 1. В вершинах бухт Камышовая, Абрамова, Стрелецкая и Южная повышения уровня могут достигать 1,2 м.

В Казачьей и Артиллерийской бухтах амплитуда колебаний уровня составила около 1 м.

В Севастопольской бухте подъемы уровня составили 0,5–1 м.

В случае проникновения волн в бухты Севастополя из очага 2 амплитуды колебаний уровня внутри бухт не превысили 0,6 м, из очага 3 они составили не более 0,4 м.

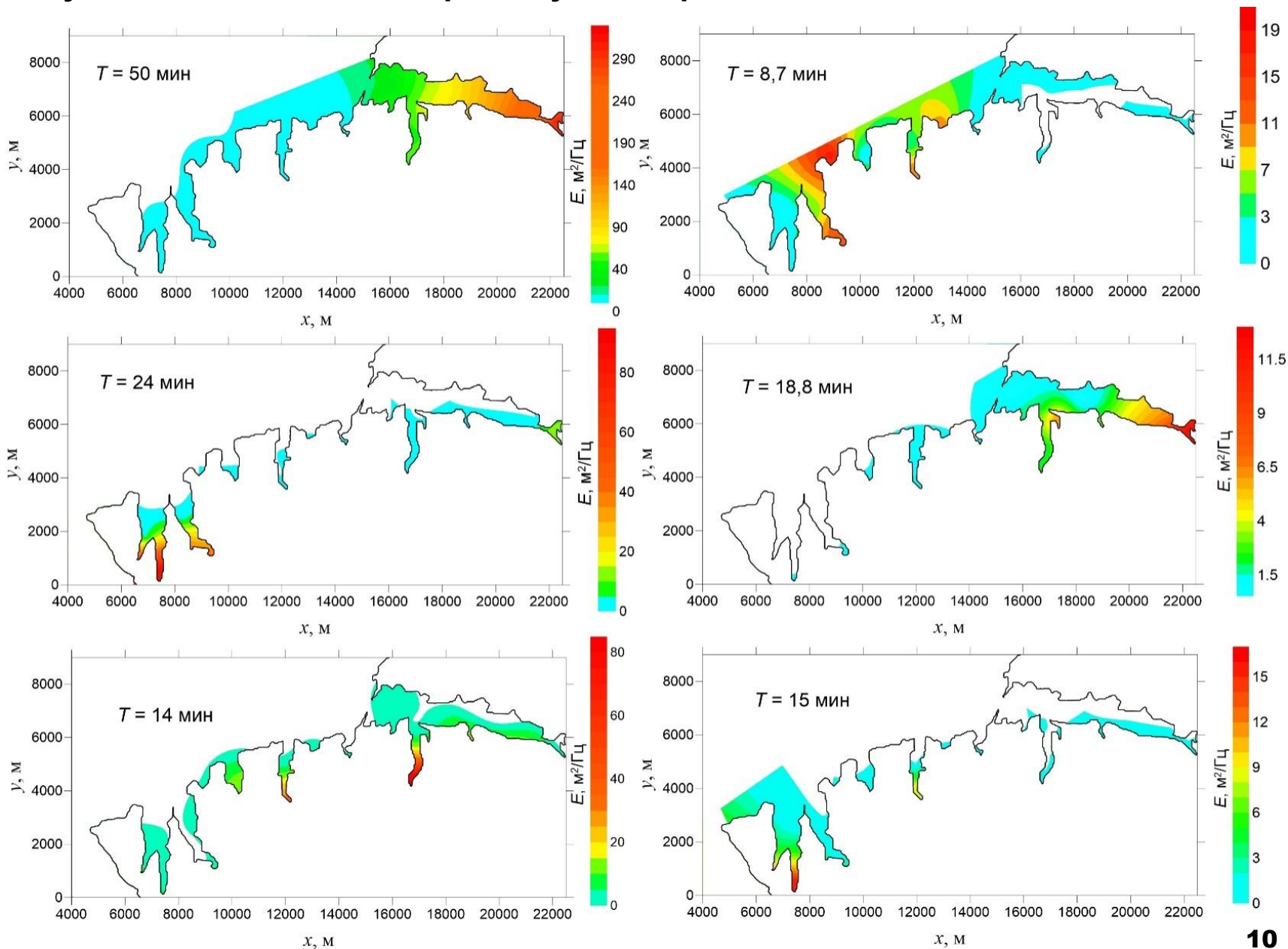
Мареограммы в некоторых бухтах Севастополя при распространении волн цунами из очага 1



После проникновения волн цунами в бухты максимальные колебания происходят в течение первых 3–3,5 часов действия цунами, затем их амплитуда начинает затухать.

Численные расчеты показали, что при отсутствии защитных молв на входе в Севастопольскую бухту амплитуды колебаний уровня могут увеличиваться не более, чем на 10 %.

Максимальная спектральная плотность колебаний уровня в севастопольских бухтах для наиболее энергонесущих периодов



Заключение

Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в бухты Севастополя. На первом этапе с помощью модели цунами Черного моря исследовалась эволюция волн цунами из трех потенциально возможных очагов, вызванных подводными землетрясениями магнитудой 7. Рассчитаны зависимости от времени колебаний уровня моря вблизи Севастополя. На втором этапе полученные мареограммы использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели SWASH выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в прибрежной зоне Севастополя с проникновением волн в бухты.

Установлено, что время добегаания волн цунами от ближнего очага до бухт Севастополя составляет около 17 мин, для удаленных очагов – от 30 мин и более. Согласно результатам численного моделирования максимальные повышения уровня моря при проникновении волн из ближнего очага в бухты Севастополя, за исключением крупнейшей бухты – Севастопольской, могут достигать 1,5–2 м, а непосредственно в самой Севастопольской бухте они не превышают 1 м. Наиболее интенсивные колебания уровня происходят в первые 3–3,5 ч действия цунами. В случае проникновения волн в бухты Севастополя из удаленных очагов амплитуды колебаний уровня внутри бухт не превысили 0,6 м, поскольку прибрежная зона Севастополя защищена мысом Херсонес с юга и юго-востока. Анализ проведенных расчетов показал, что наличие или отсутствие защитных молв на входе в Севастопольскую бухту не приводит к существенным изменениям волнового поля и подъемов уровня моря при распространении цунами внутри бухты.

Цунами возбуждают в севастопольских бухтах сейшевые колебания. Мода Гельмгольца Севастопольской бухты ($T = 50$ мин) проявляется во всех остальных бухтах системы.



Спасибо за внимание!

Генерация очагов осуществлялась смещением свободной поверхности моря в форме эллипса с большой и малой осями L и W :

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2(\pi r / 2) \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1)$$

где $r = 2\sqrt{(x_1/L)^2 + (y_1/W)^2}$; $x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$; $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha - (x - x_0)\sin\alpha$; α – угол наклона большой оси эллипса к оси x , отсчитываемый против часовой стрелки.

Оси эллиптической зоны генерации L и W находились, в зависимости от магнитуды землетрясения M , по эмпирическим формулам для цунамигенных землетрясений

$$\lg L = 0,6M - 2,5, \quad \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5)$$