

## **Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ**

1.1. *Номер проекта* 06-05-72014

1.2. *Руководитель проекта* Шокин Юрий Иванович

1.3. *Название проекта* Исследование особенностей поведения катастрофических волн цунами у средиземноморского побережья Израиля методами математического и лабораторного моделирования

1.4. *Вид конкурса* МНТИ\_а - Совместный конкурс российско-израильских проектов

1.5. *Год представления отчета* 2009

1.6. *Вид отчета* итоговый (2006-2008)

1.7. *Аннотация*

В ходе выполнения совместного российско-израильского проекта были получены следующие результаты:

Собраны исторические сведения (более 500 событий) о цунами в Средиземном море. Выполнен анализ доступных записей гидрофизических датчиков, сделанных вблизи Яффо в ходе цунами 09 июля 1956 г., вызванного цунамигенным землетрясением в Эгейском море.

Численно исследовано распространение волн цунами от возможных сейсмических цунамигенных источников. Спектр рассчитанных мареограмм, однако, не совпал со спектром имеющейся натурной записи. На основе встречающихся в литературе предположений о том, что это цунами было вызвано не только землетрясением, но и оползнем, возникшим в результате этого землетрясения, были проведены численные расчеты с начальным возмущением, размеры которого выбирались того же порядка, что и размеры оползня. Спектр мареограмм, полученных в ходе этих расчетов, содержал основные энергетические спектральные компоненты с периодами, очень близкими наблюдавшимся. Таким образом, выполненное исследование подтвердило то, что оползень, вызванный землетрясением в Эгейском море 9-го июля 1956 г., послужил важным фактором в генерации волны цунами.

Проведена серия вычислительных экспериментов с широким спектром колебаний, входящих в область через границу. Результаты расчетов продемонстрировали шельфовый резонанс побережья Израиля в интервале периодов от 50 до 60 минут, что хорошо согласуется с результатами анализа записей прибрежных датчиков.

В ходе специальных вычислительных экспериментов определены вероятные положения «критических» для побережья Израиля очагов цунамигенных землетрясений южнее и восточнее острова Кипр, а также непосредственно около израильского побережья.

Выполнены предварительные исследования задачи о накате волны цунами на берег с учетом реальных характеристик прибрежной батиметрии и прибрежной топографии с использованием двух алгоритмов, один из которых реализован на равномерной сетке, а другой – на сетке, адаптирующейся к особенностям батиметрии и береговой линии. По результатам сравнительного анализа показано, что первый из упомянутых алгоритмов является вполне пригодным для воспроизведения основных характеристик изучаемого явления, а с учетом очевидной экономичности может быть рекомендован для решения практических задач проблемы цунами. Однако, для проведения единичных, исследовательских вычислительных экспериментов, требующих повышенной точности моделирования и не накладывающих жестких ограничений на используемые вычислительные ресурсы, можно также утверждать целесообразность использования алгоритмов на адаптивных сетках.

Численно исследована задача генерации волн цунами движением затопленного оползня, которое имитировалось скольжением деформируемого тела по неровному подводному откосу. Выполнен комплекс многопараметрических расчетов, позволивших определить зависимость процесса волнообразования от глубины залегания оползня, его длины и толщины, относи-

тельной плотности, коэффициента трения, а также от геометрии склона. Показано, что криволинейность склона в некоторых случаях оказывает существенное влияние на характер зависимости генерируемых движением по этому склону подводного оползня волновых режимов от указанных выше параметров явления.

*1.8. Полное название организации, где выполняется проект*  
Институт вычислительных технологий СО РАН

"Исполнители проекта согласны с опубликованием (в печатной и электронной формах) научных отчетов и перечня публикаций по проекту"

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ**

### *2.1. Номер проекта*

06-05-72014

### *2.2. Руководитель проекта*

Shokin Yuri Ivanovich

### *2.3. Название проекта*

Investigation of the Specific Features of Disastrous Tsunami Waves along the Israeli Mediterranean Coast by Applying the Methods of Mathematical Modeling

### *2.4. Год представления отчета*

2009

### *2.5. Вид отчета*

ИТОГОВЫЙ (2006-2008)

### *2.6. Аннотация*

In the course of the joint Russian-Israeli project implementation the following results have been received:

The historical information (more than 500 events) about tsunami in Mediterranean has been collected.

The analysis of available records of hydrophysical gauges made near Yaffo on the course of tsunami of 9 July 1956 triggered by earthquake in the Aegean Sea has been carried out.

The tsunami wave propagation from possible seismic tsunamigenic sources has been numerically investigated. However, the spectrum of marigrams received didn't match the spectrum of available nature record. On the basis of supposition that this tsunami could be triggered not only by the earthquake, but also by the landslide triggered by this earthquake, the numerical calculations for initial disturbance with sizes of the same order as the sizes of landslide are, were carried out. The main energy spectral components of marigrams in this case had periods, which were very close to the real ones. Thus, our investigation confirmed, that the landslide, triggered by the earthquake in the Aegean Sea on 9 July 1956, was an important factor in tsunami wave generation.

The series of computational experiments with wide spectrum of oscillations entering the domain through the boundary has been carried out. The results of calculations demonstrated the Israeli shelf resonance in the period interval from 50 to 60 minutes that agreed very well with the results of tide gauge record analysis.

In the course of special computational experiments the possible locations have been determined of "critical" for Israeli coast tsunamigenic earthquakes to the south and to the east of the Cyprus Island, as well as in the immediate vicinity of the Israeli coast.

The preliminary investigation of the problem about the tsunami runup on the coast taking into account the real characteristics of a coastal bathymetry and topography has been carried out using two algorithms: on the uniform grid and on the grid, adaptive to the features of bathymetry and coast line. The results of comparative analysis showed that the first algorithm was quite suitable for the reproduction of basic characteristics of studied phenomenon, and, because of its obvious economy, could be recommended for the solving of practical tsunami problems. The second algorithm is appropriate for single research computational experiments, which demand the increased accuracy of simulation and don't impose the strong limitations on the computational resources.

The problem of tsunami wave generation by the movement of submerged landslide, which was simulated by the sliding of deformable body along the irregular underwater slope, has been numeri-

cally investigated. The complex of multiparametric calculations has been carried out that have allowed to determine the dependence of wave making process on the landslide submergence, its length and thickness, relative density, friction coefficient, and slope's geometry. It has been shown that the slope irregularity in some cases influenced essentially on the character of wave regime dependence on phenomenon parameters mentioned above.

2.7. *Полное название организации, где выполняется проект*  
Institute of Computational Technologies SB RAS

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

### 3.1. Номер проекта

06-05-72014

### 3.2. Название проекта

Исследование особенностей поведения катастрофических волн цунами у средиземноморского побережья Израиля методами математического и лабораторного моделирования

### 3.3. Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы

05-513 01-201

### 3.4. Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2008 год

- Определить вероятные зоны расположения "критических" цунамигенных землетрясений в исследуемом регионе на основе анализа достоверной исторической информации и результатов модельных вычислительных экспериментов;
- Определить резонансные характеристики прибрежных акваторий Израиля с использованием результатов численного моделирования и спектрального анализа.
- С помощью вычислительных экспериментов на основе имеющихся исторических данных и представлений о геофизических свойствах акватории определить наиболее вероятные механизмы генерации волн цунами у побережья Израиля.
- Определить характерные кинематические характеристики волн цунами в Средиземном море. В частности, определить вероятные времена добегания таких волн от зон гипотетических источников к «защищаемым» пунктам на Средиземноморском побережье Израиля.
- Предложить постановки задач для предварительного изучения процессов взаимодействия волн цунами с берегом – фазы наката и отката волн – с учетом реальных характеристик прибрежной батиметрии и прибрежной топографии.
- Построить предварительные схемы цунамирайонирования побережья Израиля и оценки прибрежных территорий по степени цунами опасности.
- Предложить постановки модельных задач и провести предварительные вычислительные эксперименты по исследованию оползневой генерации волн цунами у побережья Израиля.

### 3.5. Степень выполнения поставленных в проекте задач

Цели этапа 2008 г., а также проекта в целом достигнуты, сформулированные задачи решены. Исполнителям удалось значительно превысить предусмотренные планом задания в части моделирования наката на близкие к реальным участки побережья, а также в части детального воспроизведения исторического цунами в Эгейском море.

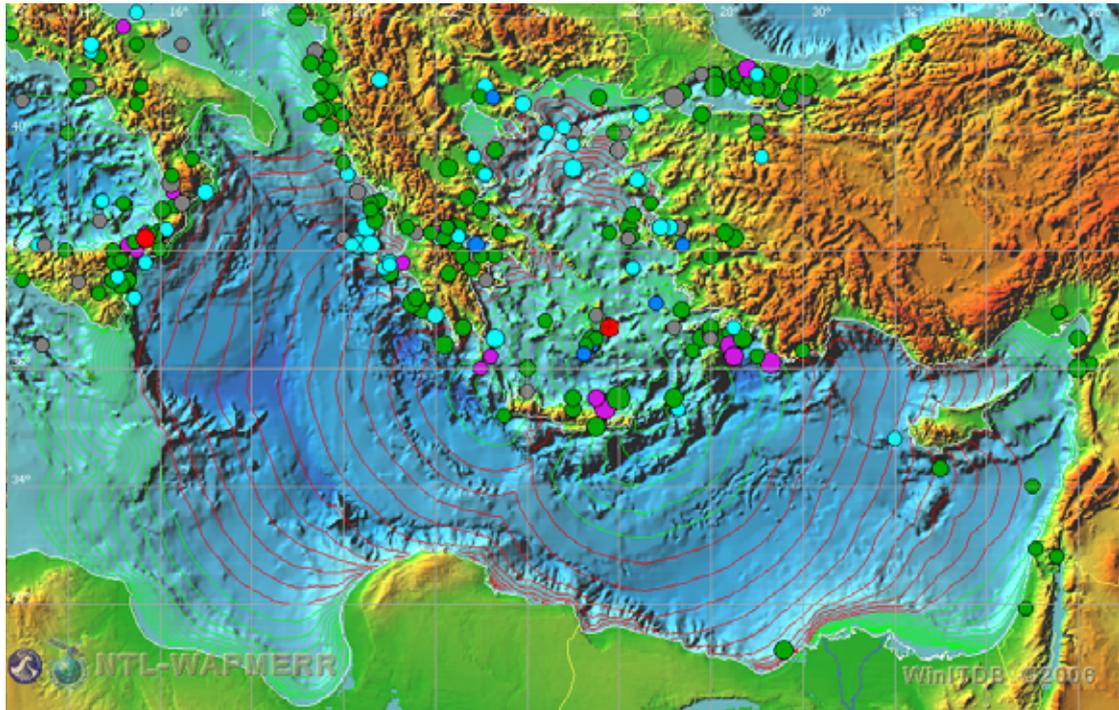
### 3.6. Полученные за отчетный период важнейшие результаты

**В направлении, связанном с воспроизведением исторического цунами 9 июля 1956 г. в Средиземном море и его проявлением у берегов Израиля, получены следующие результаты.**

В настоящее время известно около 300 описаний цунами или похожих явлений в Средиземном море (*Soloviev et al., 2000*). Основная часть цунамигенных источников расположена в районе Сицилии, Эгейского моря и Кипра. Есть исторические данные о том, что некоторые цунамические источники располагались вблизи побережья Израиля. Однако информация, касающаяся цунами в Израиле, в основном носит описательный характер (*Guidoboni and Comastri, 1997; Fokaefs and Papadopoulos, 2007; Reinhardt et al., 2006*). И только греческое цунами 9-го июля 1956 года было записано приливным датчиком, установленным в порту Яффо (*Goldsmith and Gilboa, 1986*). Тогда были зафиксированы достаточно сильные осцилляции, связываемые с землетрясением в Эгейском море. Исполнителями проекта было проведено численное моделирование этого события.

Традиционно считалось, что цунами 1956 года было вызвано землетрясением магнитуды ~7.5 (7.2 – 7.8 в разных источниках) в Эгейском море (Рис. 1). *Ambraseys (1960)* придерживается того мнения, что было как минимум 2 основных толчка: в 03:11:38 GMT (ме-

стное время в Израиле отличается от времени GMT на +2 часа) с эпицентром в точке  $36^{\circ}54'N$ ,  $26^{\circ}00'E$  и магнитудой 7.5; и в 03:24:05 GMT (сильный афтершок) магнитуды 7. Наши оценки показывают, что время добегания волны до Кипра – 1.5 часа, до Хайфы – 2 часа, до Тель-Авива – 2.5 часа.



**Рис. 1** Известные исторические цунамигенные источники в Средиземном море и фронты волны цунами 9-го июля 1956 г.

Энергетический спектр высокочастотных колебаний записи 9-го июля 1956 г. был получен с использованием стандартной процедуры быстрого преобразования Фурье. Основной пик спектр относится к периоду примерно 15 минут и может быть связан с волной цунами; меньший пик – 57 минут – объясняется, как будет показано ниже, шельфовым резонансом.

Были проведены расчеты в восточной части Средиземного моря (от  $24.0$  до  $36.0$  градусов в.д. и от  $30.5$  до  $38.0$  градусов с.ш.) на 15-тисекундной сетке. Вдоль израильского побережья было установлено 13 мареографов.

Источник цунами задавался с использованием дислокационной модели или путем задания начального возмущения в виде полуэллипсоида. Начальное возмущение помещалось в точку эпицентра цунами ( $25.8$  градусов в.д.,  $36.7$  градусов с.ш.). Начальное возвышение свободной поверхности вычислялось по модели Гусякова-Окады с использованием параметров землетрясения, приведенных в таблице (Таблица 1).

**Таблица 1. Параметры сейсмических источников**

Event	$M$	$L$	$W$	$\delta$	$\alpha$	$\theta_0$	$h_0$	$d_f$
	-	km	km	deg	deg	deg	m	km
1	7.8	100	50	15	90	25	5	20
2	7.6	79.4	39.8	20	90	25	4	15
3	7.6	79.4	39.8	20	90	25	4	10
4	7.5	70.8	35.5	20	90	25	4	10
5	7.5	70.8	35.5	45	90	25	4	10

Параметры эллипсоидального начального возмущения приведены в следующей таблице (Таблица 2).

**Таблица 2. Параметры эллипсоидальных источников**

Event	$M$	$L$	$W$	$\theta_0$	$\eta_0$
	-	km	km	deg	m
6	6.8	60	20	25	3
7	6.8	60	20	25	4
8	6.8	60	20	28	3
9	6.4	50	25	25	5

Для всех рассмотренных источников были получены амплитуды, близкие к наблюдаемым, однако в мареограммах, рассчитанных для сейсмических источников, частотного максимума 15 минут, имеющегося в записях 1956 г, не наблюдается. Более того, в рассчитанных спектрах высокие частоты не присутствуют совсем. Спектр мареограмм, соответствующих эллипсоидальным возмущениям, сдвинут в сторону более низких частот, а также содержит спектральную компоненту с периодом, близким 15 минутам, однако эта компонента не является доминирующей.

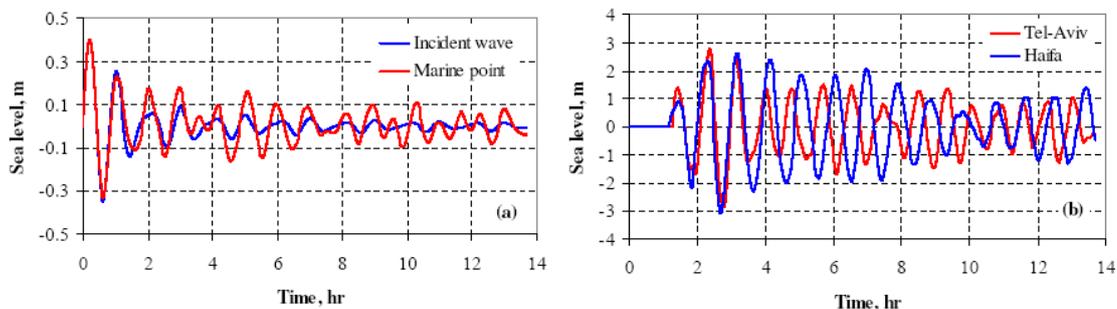
Кроме традиционной теории сейсмического механизма генерации обсуждаемых здесь волн цунами, в литературе встречается еще и мнение, что источник цунами включал две компоненты: первый – собственно землетрясение, а второй – вызванный этим землетрясением сход большого оползня.

Исполнители проекта попытались оценить спектр волн цунами, вызванных оползнем. Согласно *Perissoratis and Papadopoulos* (1999), горизонтальные размеры оползня – примерно 20\*10 километров. В предварительных расчетах размеры начального возмущения полагались того же порядка. Начальная скорость определялась из соотношения  $u = c \cdot \eta / H$ , где  $c = \sqrt{g(H + \eta)}$  – скорость малых возмущений,  $\eta$  – высота волны. Спектр колебаний свободной поверхности, полученных от этого начального источника, основным максимумом содержал в периоде ~13 минут, что очень близко к максимуму наблюдаемому. Таким образом, наше исследование подтвердило, что оползень, вызванный землетрясением в Эгейском море 9-го июля 1956 г., послужил важным фактором в генерации волны цунами.

**В части, касающейся определения резонансных свойств Средиземноморского побережья Израиля, исполнителями был выполнен специальный вычислительный эксперимент.**

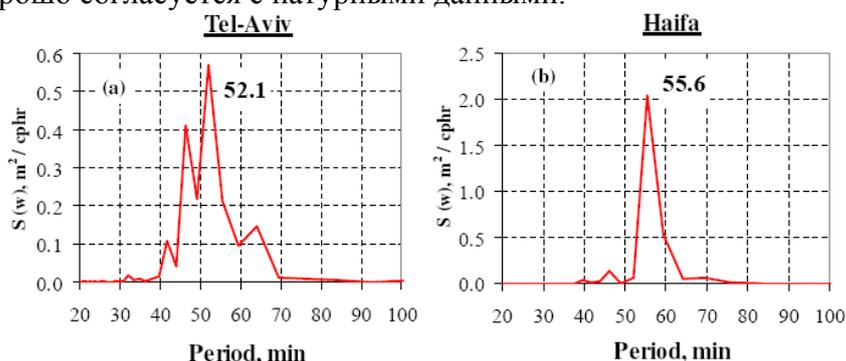
Для того чтобы понять природу дополнительных составляющих с периодами 50–60 минут, обнаруженных при спектральном анализе имеющихся прибрежных записей, было проведено численное моделирование в расчетной области, лежащей в пределах от 30 до 36 градусов в.д. и от 31 до 37 градусов с.ш. Граничное условие на морской (западной) границе задавалось в виде входящего волнового пакета, полученного суммированием синусоидальных волн одной амплитуды, но с разными периодами (от 40 до 60 минут с шагом 0.5 минуты), т.е. входящий сигнал имел 41 дискретную частоту, которые соответствовали периодам 40, 40.5, 41, ..., 60 минут. Через эту границу предполагался также свободный выход отраженных волн за пределы расчетной области.

Проводился анализ результатов моделирования в трех выбранных точках: две прибрежные (установленные в районе городов Тель-Авив и Хайфа) и точка на морской границе, где колебания уровня моря представляют собой сумму падающей и отраженной волн. Мареограммы входящего волнового пакета и результирующего сигнала в морской точке показаны на Рис. 2а; прибрежные мареограммы приведены на Рис. 2б.



**Рис. 2** Возвышение свободной поверхности: задаваемое и результирующее в морской точке (а); в прибрежных точках в Тель-Авиве и Хайфе (б).

На Рис. 3 показаны спектры прибрежных мареограмм. В обеих точках основная гармоника попадает в интервал 50–60 минут (52 минуты для Тель-Авива и 56 минут для Хайфы), что хорошо согласуется с натурными данными.



**Рис. 3** Спектры прибрежных мареограмм в Тель-Авиве (а) и Хайфе (б).

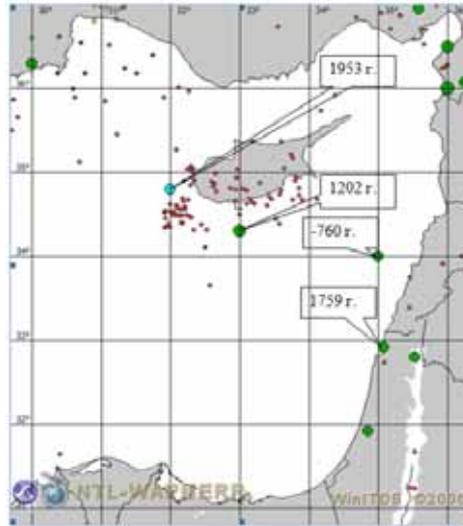
**В направлении, связанном с построением критических для побережья Израиля очагов цунами были получены следующие результаты.**

Исследования, проведенные исполнителями на предыдущем этапе проекта, привели к выводу о том, что очаги гипотетических «критических» цунами могут быть расположены либо в непосредственной близости острова Кипр, либо вблизи побережья Израиля. Для определения вероятных положений этих источников были рассмотрены имеющиеся исторические сведения о землетрясениях и цунами в восточной части Средиземного моря, простирающейся с Юга на Север от 30.8 до 37 градусов с.ш. и с Запада на Восток от 29.7 до 36.5 градусов в.д. Найденная информация представлена в таблице (Таблица 3). В этой таблице выделены строки, соответствующие сформулированным выше соображениям.

**Таблица 3.** Исторические сведения о цунами в Восточной части Средиземного моря.

Год	Месяц	День	Широта (N°)	Долгота (E°)	Магнитуда (Ms)	Интенсивность цунами по шкале Иммурри – Соловьева	Интенсивность цунами по шкале Иммурри – Идды	Максимальный зарегистрированный заплеск (м)
-760	0	0	34.00	35.00		2.0	3.0	
262	0	0	36.30	30.00		2.0	3.0	
803	12	19	36.95	35.58		2.0	3.0	
859	0	0	36.08	36.25		2.0	3.0	
1034	1	4	32.80	35.53	6.2	2.0	4.0	
1068	3	18	31.92	34.85		2.0	4.0	
1114	3	12	36.50	36.00	7.0	2.0	3.0	
1202	5	22	34.30	33.00	6.6	2.0	4.0	
1759	10	30	32.92	35.07		2.0	4.0	2.40
1822	8	13	36.00	36.00	7.1	2.0	3.0	
1953	9	10	34.80	32.00	6.5	1.0	2.0	

Положения гипоцентров этих четырех цунамигенных землетрясений отмечены на Рис. 4.



**Рис. 4.** Землетрясения (красные кружочки) и цунами в восточной части Средиземного моря (по материалам информационной системы WinITDB).

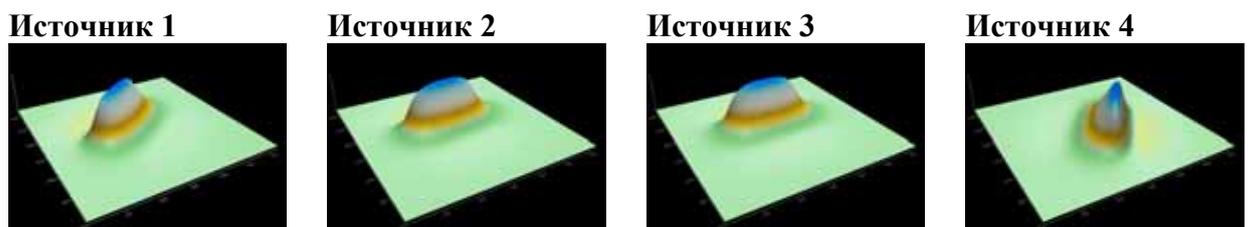
При конструировании моделей «критических» очагов было принято решение наделять их значениями, заведомо превышающими значения региональных цунами, упомянутых в исторических хрониках. Это решение представляется вполне обоснованным для решения поставленной «экстремальной» задачи. Так, магнитуда каждого из модельных землетрясений была принята равной  $M = 8.0$ , длина очаговой области  $L = 126$  км, ширина –  $W = 63$  км, величина вертикального смещения  $D_0 = 6.3$  м. Допустимое значение глубины верхнего края разрыва для Средиземноморского региона определяется рядом специалистов величиной  $h_0 = 15.0$  км. Углы  $\delta$  (угол падения разлома) и  $\lambda$  (направление подвижки в плоскости разлома) также были одинаковы для всех очагов:  $45^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно. Эти значения углов соответствуют так называемой «взбросовой подвижке».

Индивидуальные значения параметров, определяющие их положение и ориентацию, приведены в таблице (Таблица 4).

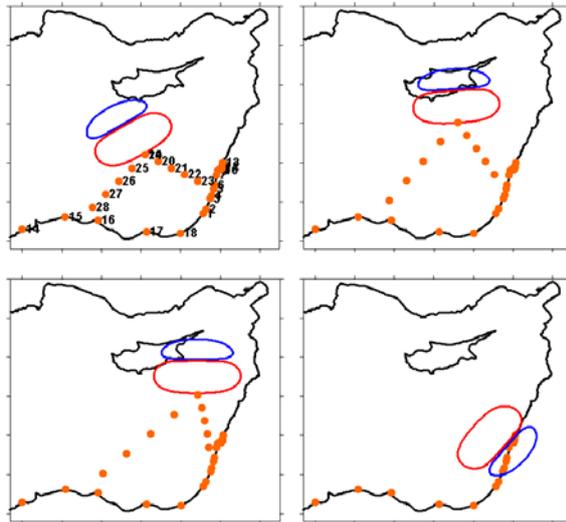
**Таблица 4.** Координаты гипоцентров и азимуты модельных очагов цунамигенных землетрясений.

	<b>Источник 1</b>	<b>Источник 2</b>	<b>Источник 3</b>	<b>Источник 4</b>
Широта гипоцентра	33.46( $N^\circ$ )	34.28( $N^\circ$ )	34.35( $N^\circ$ )	33.05( $N^\circ$ )
Долгота гипоцентра	32.92( $E^\circ$ )	33.59( $E^\circ$ )	34.42( $E^\circ$ )	34.25( $E^\circ$ )
Азимут направления разлома ( $\Theta$ )	235°	265°	270°	36°

Начальные возвышения, рассчитанные для каждого из модельных источников, изображены на Рис. 5. Положения соответствующих начальных возмущений, а также точки расположения основных (одинаковых для всех очагов) и дополнительных расчетных мареографов указаны на Рис. 6.



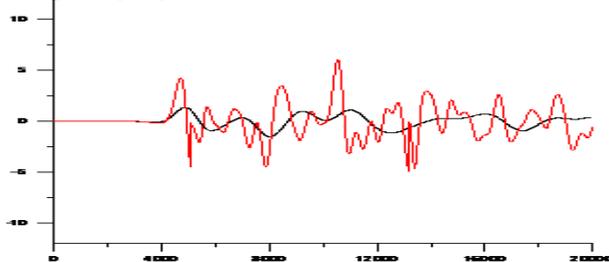
**Рис. 5.** Начальные смещения поверхности моря, рассчитанные для каждого из модельных очагов цунамигенных землетрясений.



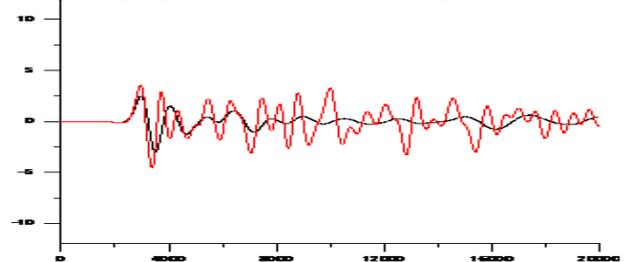
**Рис. 6.** Контуры начальных смещений поверхности моря и точки размещения виртуальных мареографов для четырех модельных очагов цунамигенных землетрясений (слева направо и сверху вниз).

Первые вычислительные эксперименты были спланированы и проведены для получения общего представления о характеристиках «критических» цунами, порождаемых построенными модельными источниками. Одновременно удалось выяснить некоторые вопросы, являющиеся чрезвычайно важными для верной интерпретации результатов моделирования. На Рис. 7 приведены мареограммы, рассчитанные с использованием **первого** модельного очага для южных (Ашкелон, Тель-Авив – Яффо) и северных (Хайфа, Кирьят Ям) мареографов на сетках различной детальности. Как видно из этих графиков, наличие в южной части побережья значительной мелководной зоны требует использования более детальной сетки. Так, в окрестности Ашкелона, размах головной волны, рассчитанный на детальной сетке, почти в три раза больше аналогичной характеристики, определенной расчетами на грубой сетке. По мере продвижения к Северу амплитуды волн существенно уменьшаются, как и разница между результатами, полученными на разных сетках. Заметим, что уже в первых расчетах были получены весьма ощутимые значения высот волн на побережье.

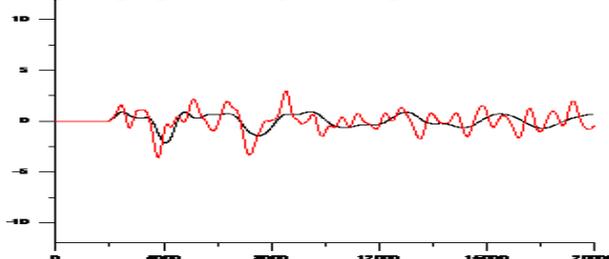
**Мареограф 1, Ашкелон**



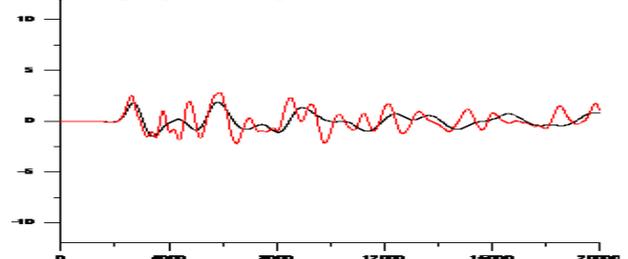
**Мареограф 3, Тель-Авив – Яффо**



**Мареограф 9, Хайфа-Север**



**Мареограф 11, Кирьят Ям**

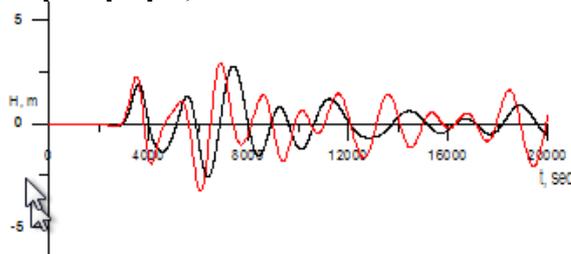


**Рис. 7.** Мареограммы цунами, порожденного первым модельным источником. Графики, отрисованные черным цветом, получены на минутной сетке, красным – на 15-ти секундной.

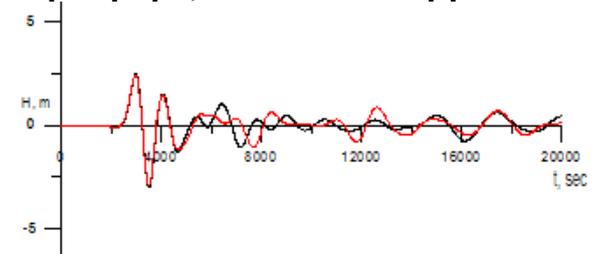
Наряду с детальностью расчетной сетки, достаточно важным является параметр, определяющий величину допустимого заглубления, используемого при численном моделировании цунами. Этот параметр задает минимально допустимую глубину акватории так, что если в каком-либо узле сетки глубина оказывается меньше значения этого параметра, то такая малая глубина заменяется на это значение. Обычно этот вопрос остается за пределами

научных публикаций, но без соответствующего анализа адекватная интерпретация результатов численного моделирования оказывается невозможной. Результаты, представленные на Рис. 8, дают некоторое представление о влиянии параметра заглубления на характер расчетных мареограмм. Вполне допустимым является использование в дальнейшем значения этого параметра  $h_{\min} = 10$ , одновременно избавляющего от неприятных эффектов осушения при расчете волн достаточно большой амплитуды. Именно с этим приходится сталкиваться при моделировании «критических» цунами. Следует заметить, что амплитудные характеристики волновых режимов практически не меняются при изменении параметра заглубления, в то время как форма сигнала и его частотные характеристики претерпевают некоторые, очень малые, изменения.

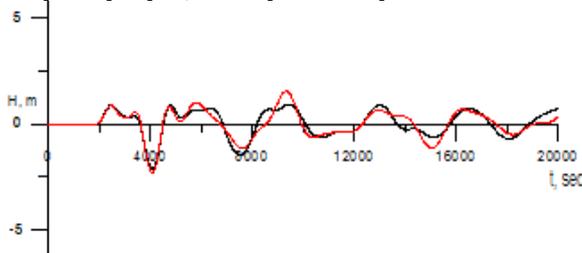
**Мареограф 1, Ашкелон**



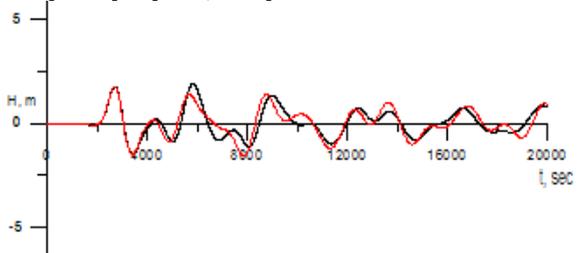
**Мареограф 3, Тель-Авив – Яффо**



**Мареограф 9, Хайфа-Север**



**Мареограф 11, Кирьят Ям**



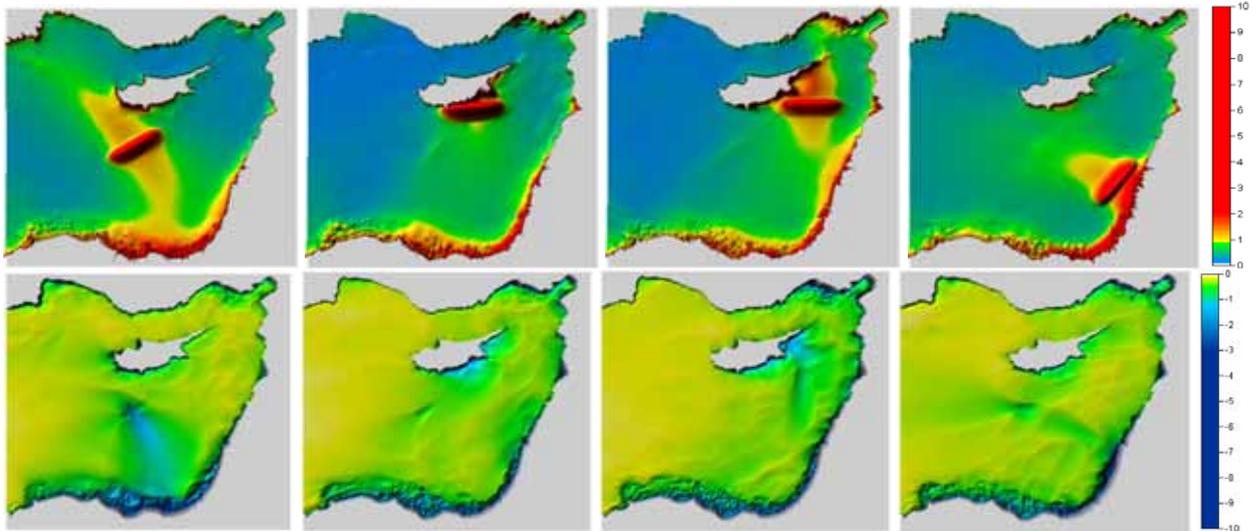
**Рис. 8.** Мареограммы цунами, порожденного первым модельным источником. Графики, отрисованные черным цветом, получены с параметром заглубления  $h_{\min} = 5$  метров, красным – 10 м.

Все последующие расчеты проводились на 15-ти секундной сетке с 10-ти метровым параметром заглубления. Самые общие представления о характере распространения волновой энергии дают картины «свечения», приведенные для каждого из модельных источников на Рис. 9. Здесь видно, что максимальные высоты волн, порожденных первым источником, наблюдаются в южной части побережья Израиля и почти в той же степени – на египетских мареографах, близких к южным израильским. Часть энергии в этом случае распространяется на северо-запад. Волны, порожденные вторым очагом, не имеют возможности распространяться в этом направлении, экранируемом островом Кипр. Волны от третьего источника сильнее предыдущих фокусируются в сторону Израиля, что объясняется особенностями батиметрии по трассе распространения (наличие подводных возвышенностей, которые могут играть роль волноводов). Расположение четвертого источника, почти примыкающего к побережью, приводит к сосредоточению волновой энергии в прибрежной зоне, по которой она и распространяется к югу в сторону Египта. Аналогичные соображения могут быть высказаны и для «свечения минимумов».

**Результаты предыдущего раздела послужили основой для предварительного цунами-районирования побережья Израиля по степени опасности от цунами в случае критических событий.**

Детальное представление об амплитудных характеристиках волновых режимов дает анализ мареограмм, записанных в «защищаемых» пунктах. Эти мареограммы, рассчитанные для четырех характерных пунктов от каждого из модельных источников, изображены на Рис. 10. Специфическое расположение четвертого источника привело к решению выделить соответствующие графики в отдельный фрагмент рисунка. Именно в этом случае высоты волн достигают максимальных значений (около 8 м). Такой эффект наблюдается в се-

верных, ближайших к источнику пунктах (Хайфа, Кирьят Ям). Наибольшее значение понижения уровня (8 м) наблюдается на мареографе, размещенном вблизи Хайфы. Достаточно большое повышение уровня оказалось отмеченным и для самого южного мареографа (Ашкелон), здесь амплитуда четвертой волны достигает почти 7-ми метровой амплитуды.



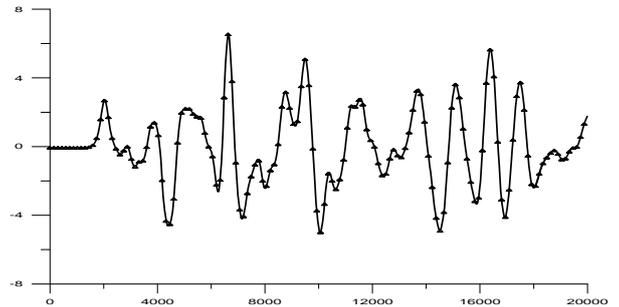
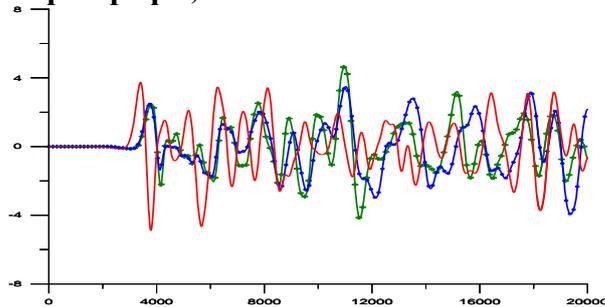
**Рис. 9.** Распределения максимальных (верхний ряд) и минимальных (нижний ряд) значений высот волн, порожденных четырьмя модельными источниками.

Следующим по опасности для исследуемого побережья оказался третий источник. На мареографе, установленном вблизи Хайфы, отмечены колебания амплитуды порядка 6 м. На всех мареограммах наибольшие порожденные им амплитуды соответствуют колебаниям в хвостовой части сигнала. Этот эффект можно объяснить влиянием волн, распространяющихся вдоль берега. В своей головной части мареограммы, порожденные вторым и третьим источниками, почти совпадают.

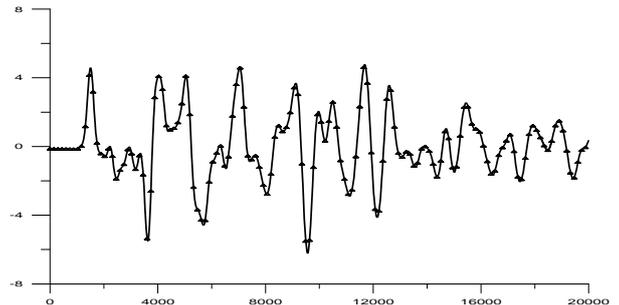
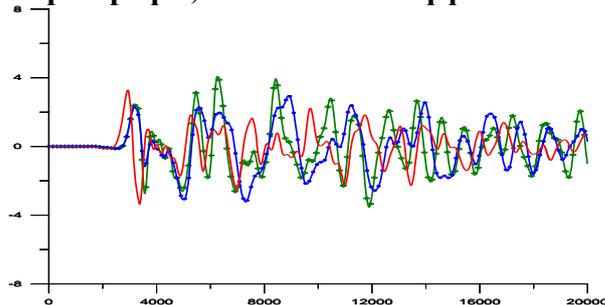
В целом, волны цунами, генерируемые вторым источником, не превышают четырех метров, достигая наибольших значений в северной части побережья.

Напротив, высоты волн, рассчитанные с использованием первого (южного) источника, принимают наибольшее значение (около 4 м) в южных защищаемых пунктах, Свое минимальное значение (около 2 м) достигают в районе Хайфы, несколько повышаясь при подходе к пункту Кирьят Ям (около 3 м).

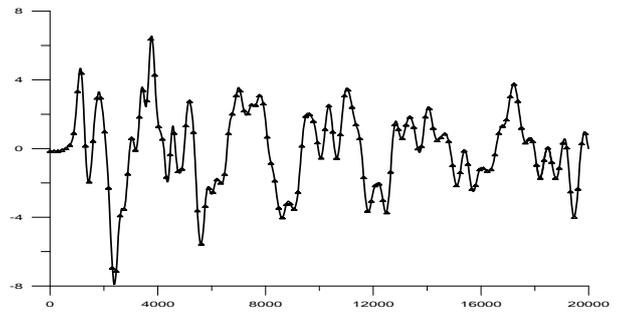
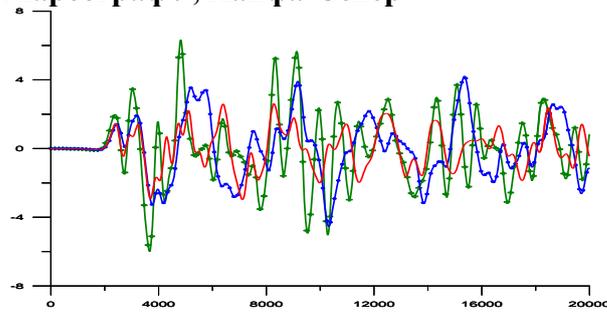
### Мареограф 1, Ашкелон



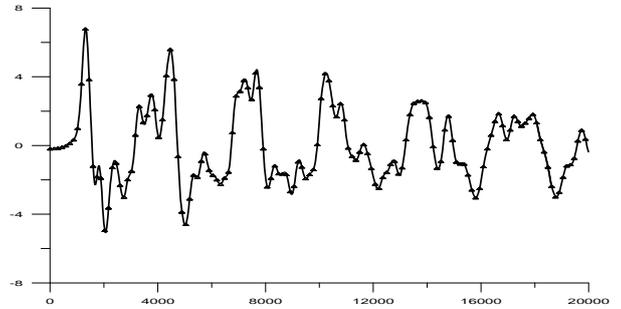
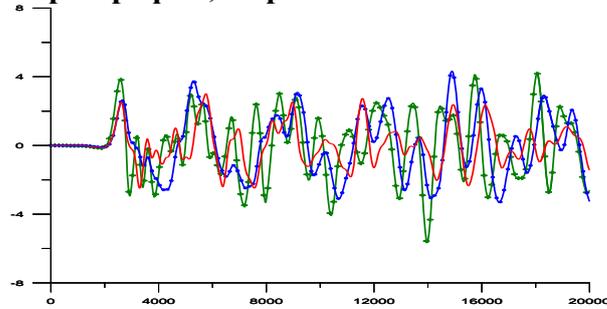
### Мареограф 3, Тель-Авив – Яффо



### Мареограф 9, Хайфа-Север

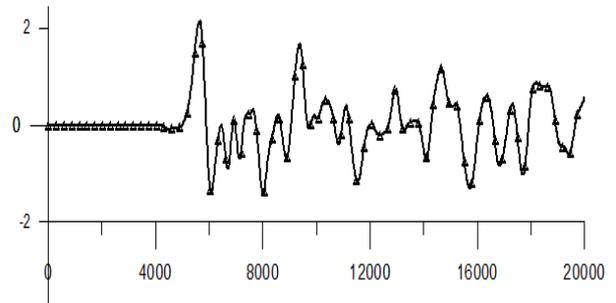
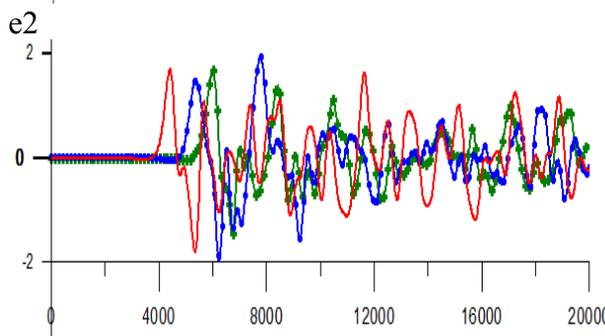
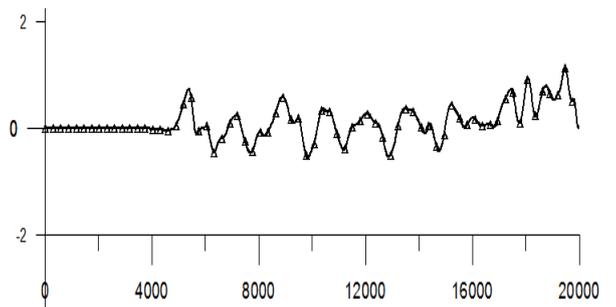
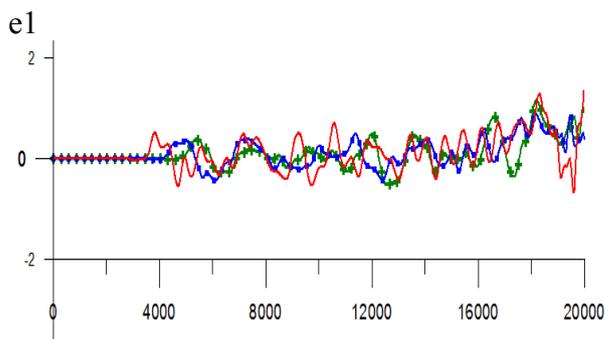


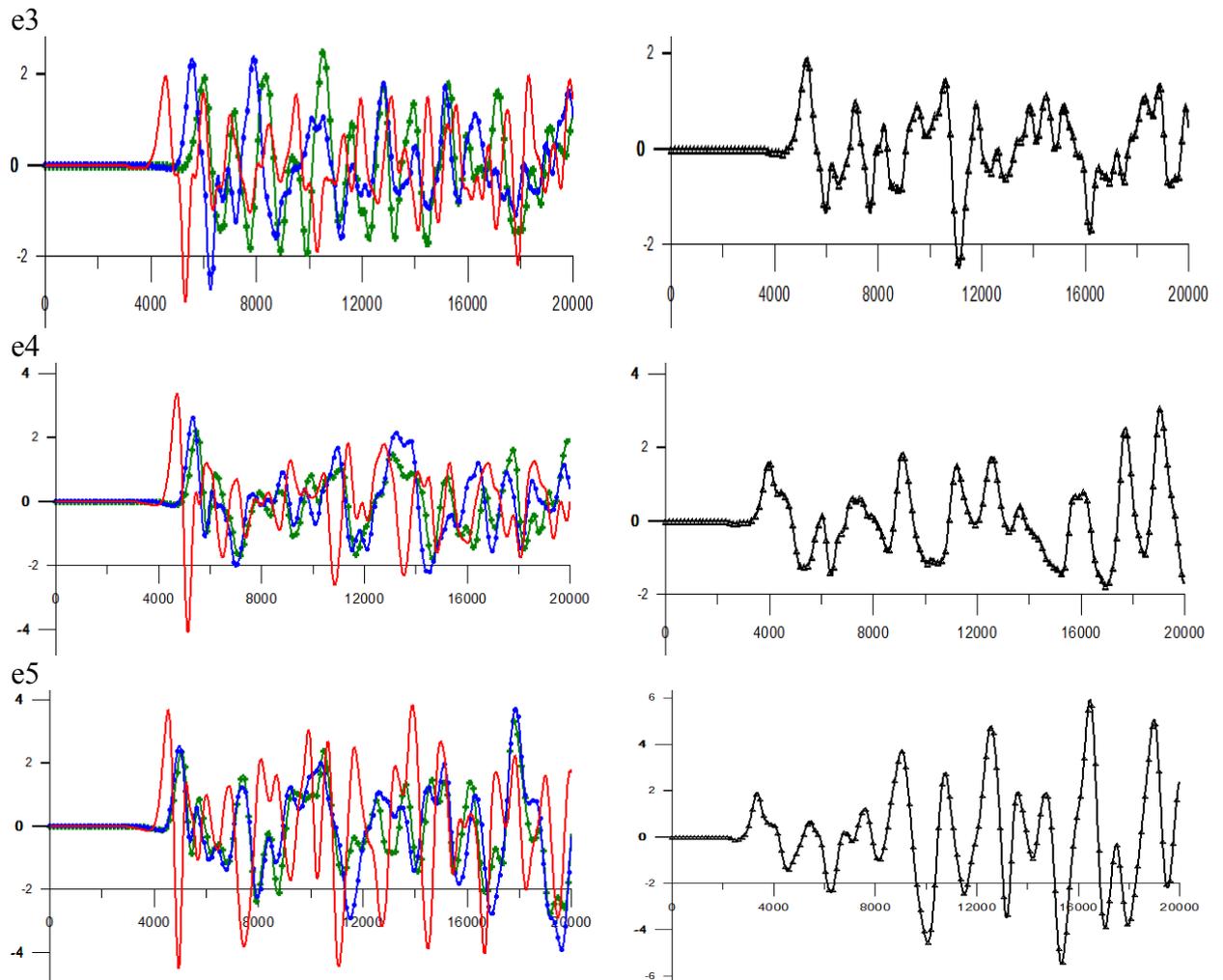
### Мареограф 11, Кирьят Ям



**Рис. 10.** Мареограммы, рассчитанные для четырех характерных пунктов на побережье Израиля от каждого из модельных источников. Слева – от первого–третьего, справа – от четвертого источника. Кривые, соответствующие первому источнику, изображены красной линией без маркеров; второму – синей с кружочками; третьему – зеленой с крестиками.

Несколько проще представляется ситуация вдоль египетского побережья (см. Рис. 11). Здесь амплитуды волн монотонно понижаются при движении с Востока на Запад (от 5-го до 1-го мареографа). Наибольшие значения наблюдаются на четвертом и пятом мареографах. За исключением мареограмм, порожденных первым источником, в остальных случаях экстремальные величины волн наблюдаются в хвостовой части сигналов.

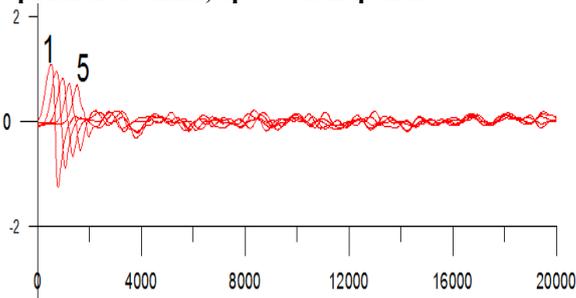




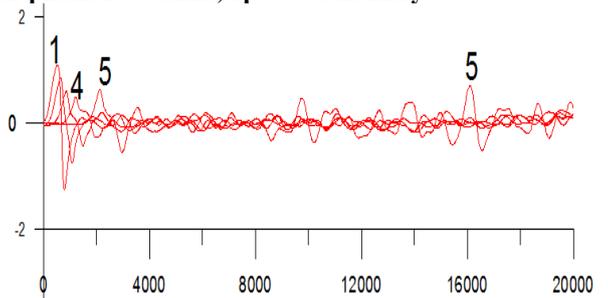
**Рис. 11.** Мареограммы, рассчитанные для пяти характерных пунктов на побережье Египта от каждого из модельных источников. Слева – от первого–третьего, справа – от четвертого источника. Кривые, соответствующие первому источнику, изображены красной линией без маркеров; второму – синей с кружочками; третьему – зеленой с крестиками.

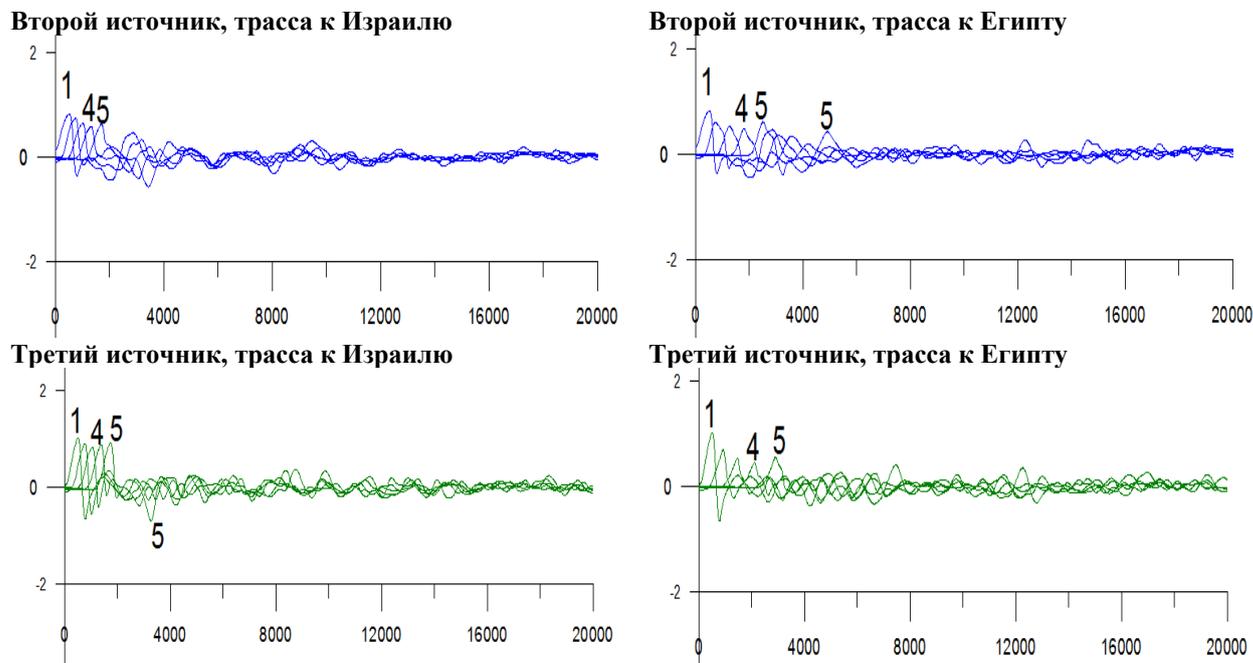
Трансформация волн на трассах от источников к берегу иллюстрируется графиками на Рис. 12. Здесь на каждом фрагменте отрисованы колебания уровня, рассчитанные на соответствующем наборе датчиков, индивидуальном для каждого источника. Монотонное убывание как амплитуд головных волн по мере приближения к берегу, так и в каждой мареограмме с ростом времени отмечаются только для первого источника. На всех остальных трассах имеет место возрастание амплитуд головных волн в ближайшем к берегу мареографе. Отдельные всплески немонотонности наблюдаются и в хвостовой части сигнала, рассчитанного для «пятых» мареографов. Скорее всего, этот эффект может быть объяснен взаимодействием подходящих волн с волнами, отраженными от берега и распространяющимися вдоль него.

**Первый источник, трасса к Израилю**



**Первый источник, трасса к Египту**





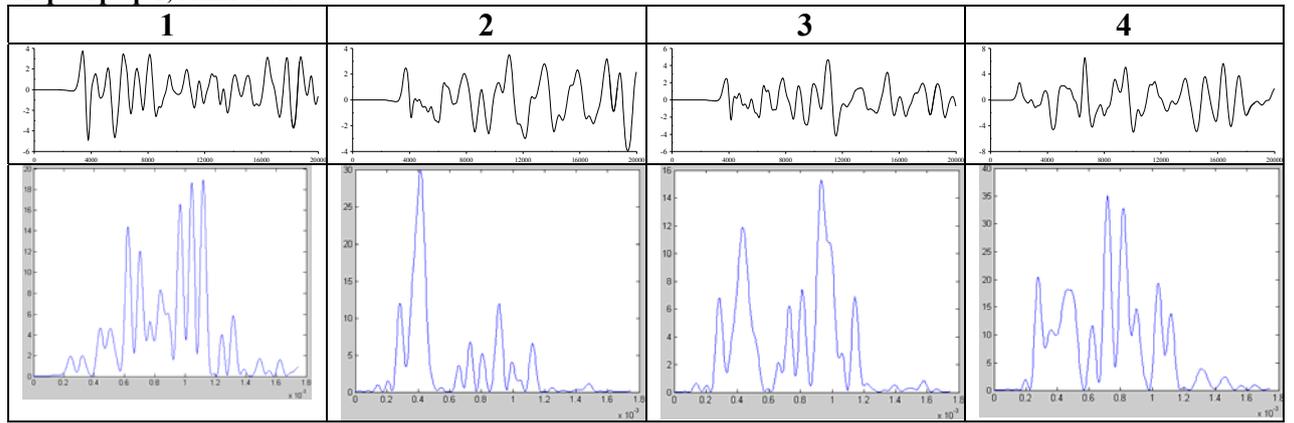
**Рис. 12.** Мареограммы, рассчитанные для глубоководных датчиков, размещенных вдоль трасс от источника к берегу и перенумерованных от 1 до 5 в порядке удаления от источника. Слева – мареограммы на трассах к Израилю, справа – к Египту. Цифрами в поле графиков указаны номера соответствующих мареографов.

Начатый при решении тестовых задач анализ спектральных характеристик был продолжен и в обсуждаемой здесь серии спектральных характеристик. На Рис. 13 представлены результаты спектрального анализа мареограмм, рассчитанных для каждого из критических источников. Очевидна динамика этих характеристик от юга к северу побережья, состоящая в выделении доминирующих частот. Практически на всех спектрах довольно четко выделяются 20–30-минутная частота, которую можно связать с параметрами источников (все они имеют одинаковые линейные размеры, но различную ориентацию) и частота с периодом около часа (ассоциированная выше с резонансными свойствами шельфа). Этот результат хорошо согласуется с многолетними наблюдениями в этом регионе.

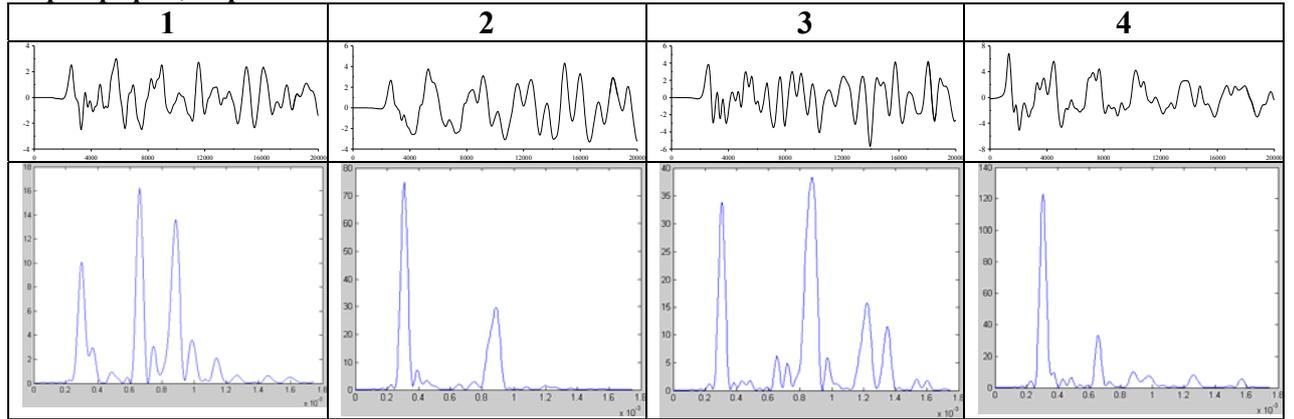
Наибольший практический интерес представляют гистограммы экстремальных значений высот волн, рассчитанных для каждого из мареографов от каждого из модельных источников (см. Рис. 14). Здесь изображены максимальные и минимальные значения амплитуд, зарегистрированные на датчике за все время моделирования процесса. Полусумма этих значений (зеленая линия) по мнению экспертов соответствует «ощущению» воздействия волн наблюдателем. По вертикальной оси отложены высоты в метрах, по горизонтальной – названия мареографов: с 1-го по 13-й – защищаемые пункты на побережье Израиля, с 14-го по 18-й – мареографы на побережье Египта, с 19-го по 23-й – мареографы по трассе от источника до побережья Израиля, с 24-го по 28-й то же, к побережью Египта.

Как и было отмечено выше при анализе мареограмм, наибольшие высоты волн на побережье Израиля порождаются четвертым источником, а наименьшие – первым. При этом практически во всех пунктах эта тенденция является монотонной. В то же время, если первый источник наибольшие амплитуды порождает в южной части побережья (Ашдод), то для второго, третьего и четвертого источников экстремальные значения перемещаются к северу (Хайфа, Кишон). Что касается глубоководных мареографов, то экстремальные значения, представленные на рисунке, подтверждают тенденции, отмеченные при анализе мареограмм.

**Мареограф 1, Ашкелон**

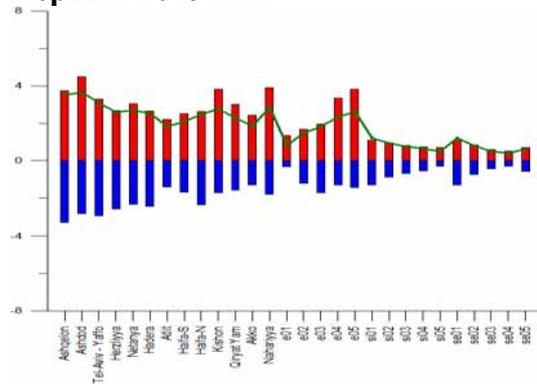


**Мареограф 11, Кирьят Ям**

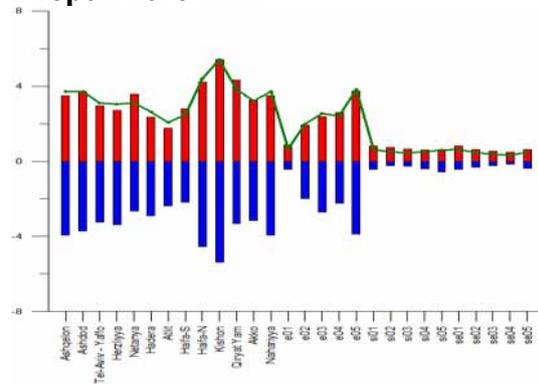


**Рис. 13.** Мареограммы и спектральные характеристики, рассчитанные для двух характерных пунктов на побережье Израиля (юг побережья – Ашкелон, верхняя часть рисунка; север – Кирьят Ям, нижняя часть). Цифры соответствуют номеру источника.

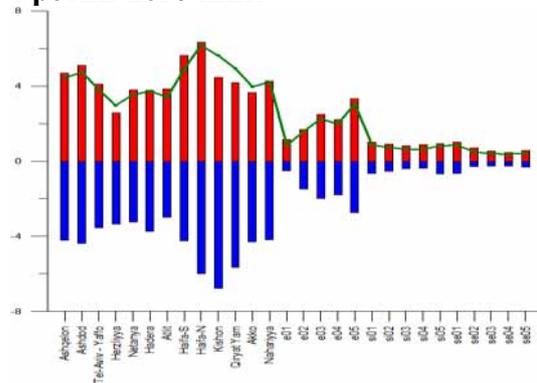
**Первый источник**



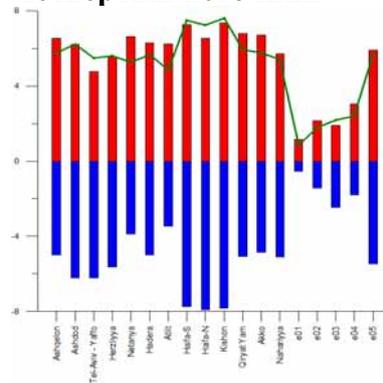
**Второй источник**



**Третий источник**



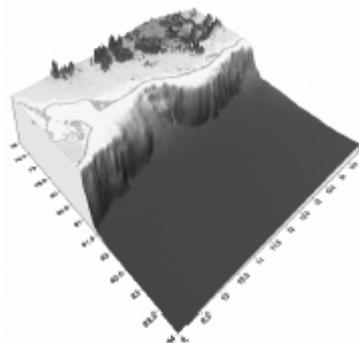
**Четвертый источник**



**Рис. 14.** Экстремальные значения высот цунами для каждого из четырех источников, красные столбцы – максимальные значения амплитуд, синие – минимальные, зеленая линия – «размах» волны – полусумма максимального и минимального значений.

**Направление работ, связанное с численным моделированием наката волн цунами на реальное побережье было связано с проведением расчетов для модельных акваторий, наследующих важные свойства реальных объектов.**

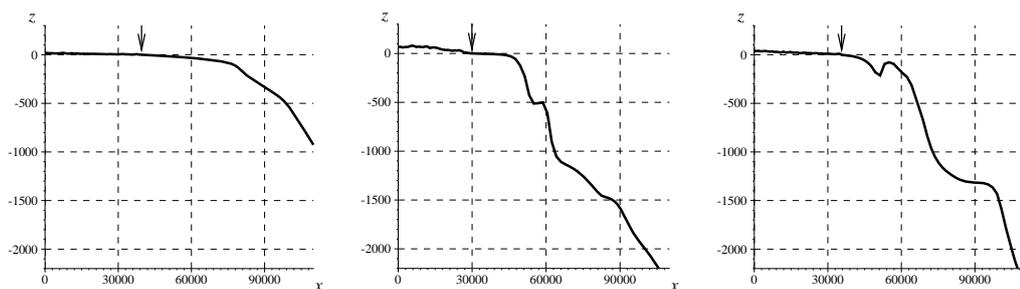
Предварительное исследование процессов взаимодействия волн цунами с берегом – фазы наката и отката волн – проводилось на примере области, включающей участок акватории Бенгальского залива и ограниченной по широте координатами  $10.5^\circ$ ,  $12^\circ$  с.ш., а по долготе –  $79.5^\circ$ ,  $80.5^\circ$  в.д. Рельеф дна характеризуется протяженной зоной прибрежного мелководья с резким уходом на глубину, береговая линия сильно изрезана, а прибрежная территория представляет собой низменность с реками, впадающими в залив.



**Рис. 15. Топография расчетной области.**

На первом этапе эксперимента решался ряд одномерных задач, позволяющих выявить основные особенности процесса распространения, трансформации и наката на берег волны цунами, оценить амплитуды волн, отраженных от неровностей дна, а также величины заплесков.

Для построения упрощенных модельных расчетных областей были рассмотрены три характерных профиля акватории – «Section-1» ( $10.8^\circ$  с.ш.), «Section-2» ( $11.7^\circ$  с.ш.) и «Section-3» ( $11.87^\circ$  с.ш.), изображенные на Рис. 16. Эти профили отражают основные особенности топографии дна выделенного региона, а именно, наличие участков дна с монотонно убывающей глубиной, наличие крутых участков, ярко выраженных ступенек и подводных желобов. Соответствующие распределения глубин были получены сечением исходной области плоскостями  $y = 10.8^\circ$ ,  $11.7^\circ$ ,  $11.87^\circ$ , точка  $x = 0$  соответствует координате  $79.5^\circ$  в.д.



**Рис. 16. Профили дна в одномерных модельных задачах. «Section-1», «Section-2» и «Section-3» (слева направо). Точка уреза указана стрелкой.**

В первых двух случаях топография дна такова, что мелководная часть акватории простирается достаточно далеко от берега. Например, в варианте «Section-1» пятиметровая изобата располагается на расстоянии примерно 3800 метров от линии уреза невозмущенной воды, во 2-ом («Section-2») – еще дальше, примерно 6700 метров. Кроме того, суша в этих вариантах достаточно пологая. Поэтому волна (см. Рис. 17) проходит достаточно далеко по суше (большая зона затопления) и откатывается назад на значительное расстояние (большая зона осушения). В 3-ем варианте («Section-3») пятиметровая изобата располагается на расстоянии всего лишь 1400 метров от линии уреза, т.е. дно имеет более крутой профиль, так же, как и прилегающая суша. Поэтому в этом варианте зоны затопления и осушения значительно меньше.

Во всех случаях начальное возмущение жидкости задавалось в виде плоской одиночной волны, приходящей на восточную границу области.

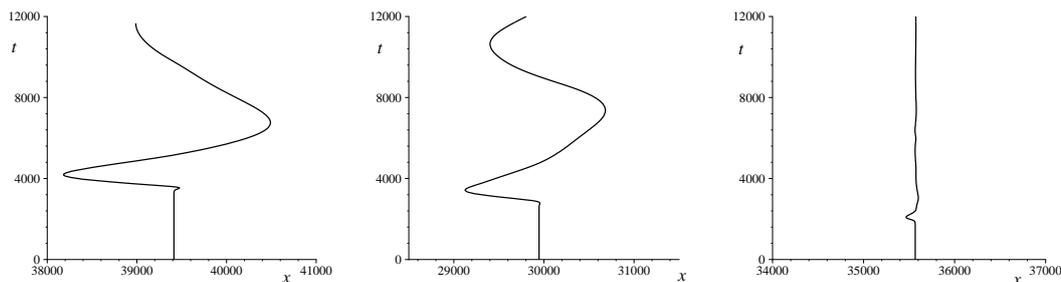


Рис. 17. Движение точки уреза в одномерных модельных задачах «Section-1», «Section-2» и «Section-3» (слева – направо).

Процесс распространения волны к зоне наката для каждого из рассматриваемых вариантов рельефа дна изображен на Рис. 18. Здесь можно отметить появление последовательности отраженных от берегового склона волн, распространяющихся в мористую часть акваторий. С усложнением рельефа дна число таких волн возрастает, усложняются и их конфигурации. Наличие протяженных мелководных зон в первом и втором (особенно) вариантах приводит к естественному замедлению скорости набегающей волны. Так, когда здесь волна находится только на подходе к береговой зоне, в третьем варианте уже происходит накат на берег.

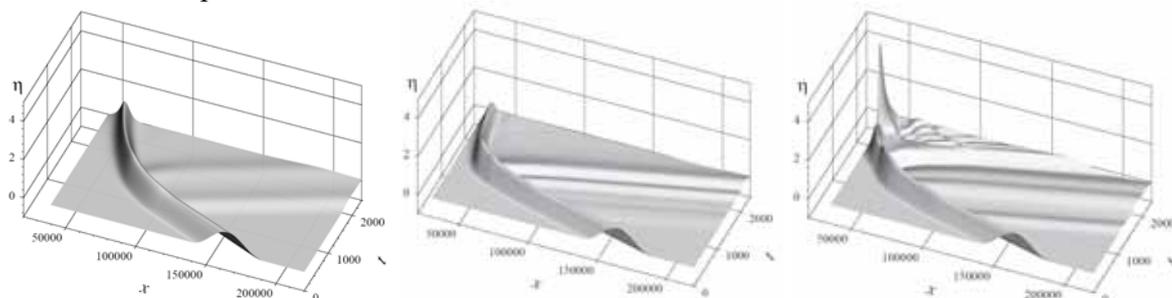


Рис. 18. Распространение уединенной волны в первые 40 мин. в одномерных модельных акваториях «Section-1», «Section-2» и «Section-3» (слева – направо).

Проведение вычислительных экспериментов осуществлялось с использованием сеток двух видов: равномерной (алгоритм I) и адаптирующейся (алгоритм II). Опробовалось два варианта адаптации сетки: к движущейся волне или к топографии дна. И в том и в другом случаях сетка адаптировалась еще и к линии уреза. В первом варианте адаптации сгущения узлов движутся вместе с волной. На Рис. 19 (слева) показаны траектории узлов сетки при накате одиночной волны, распространявшейся по ровному дну, на вертикальную стенку. Видно, что после отражения волны от стенки сгущения узлов также движутся вместе с волной. Во втором варианте адаптации (Рис. 19, центральный фрагмент) узлы подстраивались под топографию дна, сгущаясь на мелководье, где требуется наибольшая точность расчетов. На правом фрагменте Рис. 19 изображены те же траектории для небольшой части узлов, расположенных непосредственно вблизи линии уреза. В этой части сетка – наиболее мелкая. Видно, что ее узлы движутся вместе с линией уреза.

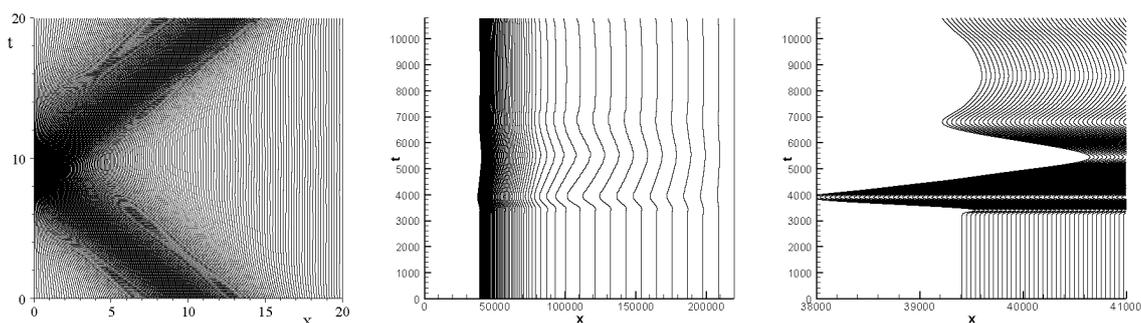


Рис. 19. Траектории движения узлов сетки в одномерных расчетах.

Анализ результатов расчетов показал, что второй способ адаптации сетки больше подходит для практических расчетов, поскольку сетка, с одной стороны, хорошо сгущается к линии уреза, а с другой стороны, она не столь подвижна, как в первом способе, что позволяет проводить расчеты с большими шагами по времени.

Вначале был рассмотрен ряд простейших задач, полученных дальнейшим упрощением уже одномерной донной поверхности. На Рис. 20 показана схема задачи «Section-2» (именно в этом варианте при первых расчетах наблюдалась наибольшая разница в численном решении, полученном по разным алгоритмам). Для задания начальной волны одномерный канал исходной длины  $L = 1^\circ \approx 110000$  м был продолжен каналом постоянной глубины 2353 м также длиной 110000 м, и в центре этого канала располагалось начальное возмущение. При этом в начальный момент времени урез попадал в точку, отстоящую от начала области примерно на 29946 м (строго говоря, он расположен между узлами сетки). На этом же рисунке показана схема упрощенной задачи, в которой донная поверхность представляет собой склон, сопряженный с ровным дном. В этом случае  $tg\varphi = 0.0294$ , где  $\varphi$  – угол заложения откоса. Здесь рассматривались две задачи: отражение от стенки, установленной на глубине 5 м, и накат на откос. Черными кружками на рисунке показано расположение мареографов. Их установка обеспечивает отслеживание поведения волн в начале процесса и во всех «критических» ситуациях. Первый из мареографов был установлен на суше, второй – в точке расположения линии уреза на спокойной воде (на стенке – для задачи об отражении). Последний из мареографов устанавливается в канале для наблюдения за началом развития процесса.

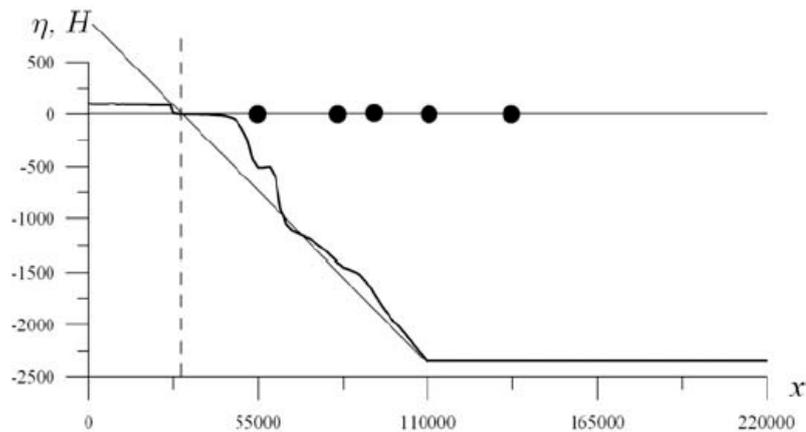


Рис. 20. Схема задачи.

На Рис. 21 показаны мареограммы, рассчитанные в мареографных точках 2 (линия уреза) и 9 для акватории «Section 2». Сплошной линией здесь нанесено решение, полученное по алгоритму II, линией с «треугольничками» – по алгоритму I. Представленные мареограммы качественно имеют одинаковый характер. Некоторое расхождение наблюдается на графике (a) в момент заплеска. Это объясняется тем, что значения параметров обоих алгоритмов, в том числе коэффициенты в процедурах сглаживания, подбирались с учетом их пригодности для решения более сложных задач. Путем специальной подгонки параметров разницу в численных решениях этой задачи можно уменьшить. Из графика (b) видно, что пока волна распространяется по глубоководью, разница в численных решениях очень мала. Это имеет место и для больших амплитуд.

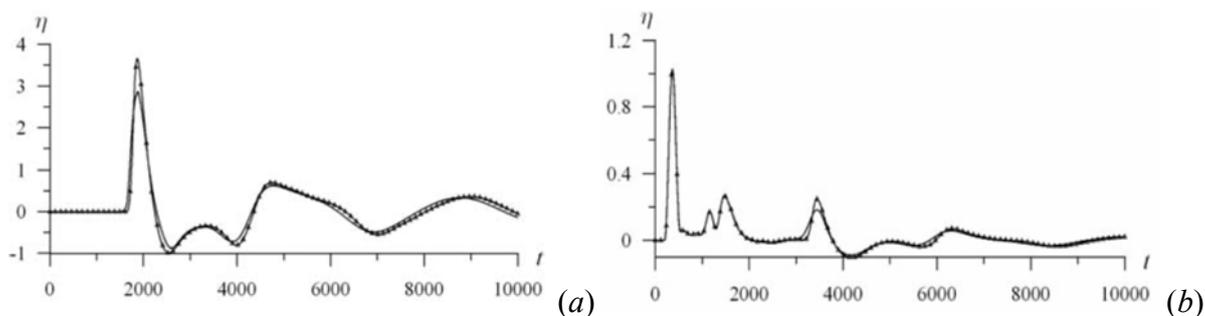


Рис. 21. Мареограммы в точках 2 (a) и 9 (b); акватория «Section 2».

Мареограммы, представленные на графиках Рис. 22, были рассчитаны при накате волны на откос аппроксимирующий рельеф акватории «Section 2». При этом график (a) показывает, что в точке уреза алгоритм II воспроизводит многократное набегание на сухой берег последовательности волн с уменьшающимися амплитудами. Алгоритм I эти колебания не воспроизводит. Однако оба алгоритма и по амплитудным, и по фазовым характеристикам показывают одинаковое поведение процесса в целом. Из графика (b) видно, что мареограммы в точке 5 отличаются только тем, что отраженная от берега волна, воспроизводимая по алгоритму II, носит осциллирующий характер. Поведение записей во всех остальных мареографах имеет похожий характер.

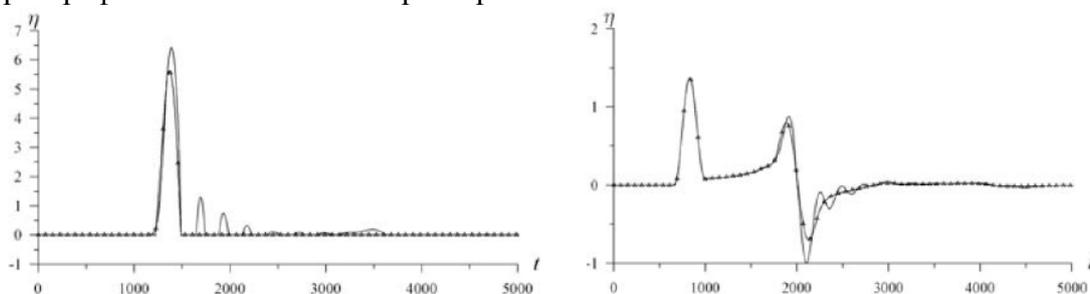


Рис. 22. Мареограммы в точках 2 (a) и 5 (b); акватория «Откос».

Одной из основных характеристик, интересных с практической точки зрения, является величина горизонтального заплеска (область затопления суши). В таблице (Таблица 5) приведены эти характеристики для обоих алгоритмов. Заплеск по вертикали примерно одинаков для всех 3-х акваторий и составляет около 4 метров.

Таблица 5.

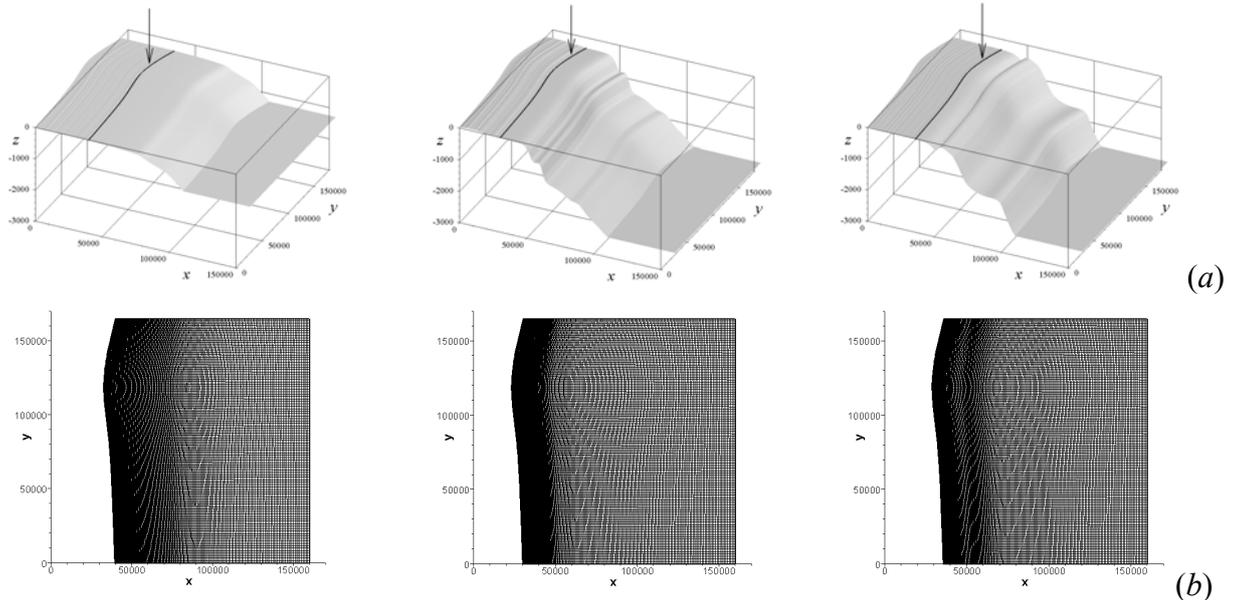
Акватория	Начальное положение уреза (м)	АЛГОРИТМ I		АЛГОРИТМ II	
		Затопление по горизонтали (м)	Затопление по горизонтали (м)	Момент максимального заплеска (сек)	Затопление по вертикали (м)
«Section 1»	39413	1374	1469	3894	4.46
«Section 2»	29946	733	1146	2998	3.91
«Section 3»	35567	276	297	2045	4.07

Для облегчения интерпретации результатов моделирования наката в таблице (Таблица 6) представлены характеристики взаимодействия волны с вертикальной стенкой, установленной на изобате 5 метров. Оба алгоритма здесь привели к практически одинаковым результатам. Как и следовало ожидать, заплеск на вертикальную отражающую стенку существенно меньше, чем вертикальный заплеск при накате (ср. данные в последних столбцах таблиц 5 и 6).

Таблица 6.

Акватория	Момент максимального заплеска (сек)	Координата стенки (м)	Заплеск по вертикали (м)
«Section 1»	3056	43270	3.33
«Section 2»	1877	36663	2.70
«Section 3»	1833	36971	3.65

На следующем этапе вычислительного эксперимента определялись эффекты, связанные с двумерным характером течения в модельных акваториях. Топография дна двумерных акваторий получалась параллельным сдвигом по широте выбранных ранее одномерных профилей дна так, что точка уреза одномерного рельефа скользила по сглаженной линии уреза реальной акватории. Все изобаты здесь параллельны начальной линии уреза. Полученные двумерные рельефы были названы в соответствии с координатами порождающих одномерных профилей (см. Рис. 23а): «10.8», «11.7», «11.87». Для каждой акватории построена двумерная криволинейная сетка, адаптирующаяся к особенностям топографии дна (см. Рис. 23б).



**Рис. 23.** *a* – квазидвумерные рельефы «10.8», «11.7», «11.87» (слева направо), Начальные положения линий уреза указаны стрелками; *b* – соответствующие расчетные сетки.

Двумерность топографии приводит к рефракции волны, переменной высоте волны вдоль гребня, к откату волны на одних участках побережья, тогда как в соседних еще продолжается накат, и, как следствие, к сложной картине взаимодействующих между собой волн.

При моделировании наката волны в акватории «11.7» вдали от берега фронт волны прямой. Поскольку в каждом горизонтальном сечении профиль дна (рассматриваемый от точки уреза) одинаковый, то часть волны, расположенная напротив «залива», движется по более глубокой воде и, значит, с большей скоростью. Поэтому фронт волны начинает искривляться и становится похожим на форму линии уреза (см. Рис. 24а). На мелководье высота волны существенно увеличивается, причем по гребню высота неодинакова: напротив «залива» волна имеет меньшую высоту. Кроме того, появляется волна, отраженная от первого крутого подводного склона и уходящая вправо (см. Рис. 24б). С этого момента фронт волны практически повторяет контур линии уреза. Кроме того, появляется вторая отраженная волна, возникшая после взаимодействия набегающей волны со вторым крутым подводным участком (почти ступенька), расположенным ближе к берегу.

При подходе к берегу на расстояние около 10 км высота волны уменьшается, волна существенно замедляет свою скорость, которая становится намного меньше скорости отраженных волн, уходящих в глубоководную часть акватории, начинается процесс наката всюду, за исключением «залива».

При исследовании фазы отката обнаруживается существование некоторого промежутка времени, когда на части берега начинается откат волны, а на другой части еще продолжается накат. В процессе отката формируется сравнительно короткая волна довольно большой амплитуды, причем на «заливе» высота откатывающейся волны меньше, чем в других частях побережья. При движении в сторону больших глубин высота откатывающейся волны уменьшается и за ней возникает движение воды, приводящее к осушению прибрежной части акватории.

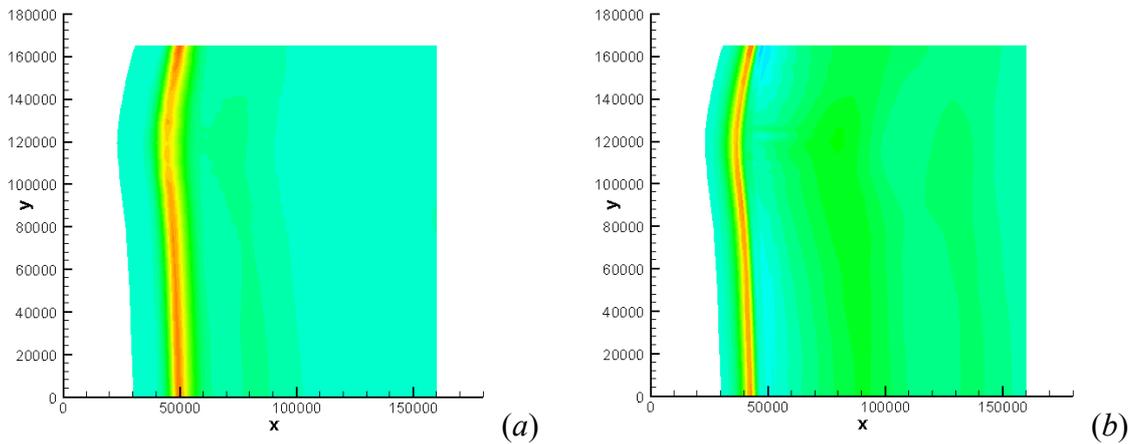


Рис. 24. Изолинии волнового поля на 20-ти (а) и 12-ти (б) километровом удалении от берега.

Для других модельных акваторий волновые картины схожи с приведенными выше. Интересной особенностью акватории «11.87», содержащей желоб, параллельный линии уреза, является рост высоты волны над подводным «хребтом» (здесь глубина мала), уменьшение ее высоты над «желобом» (здесь глубина больше) и восстановление высоты волны после прохождения ею «желоба» (здесь глубина опять мала), причем вблизи «залива» волна опять имеет меньшую высоту, чем в других частях, т.е. как во 2-м варианте.

Уверенность в достоверности результатов двумерного моделирования подкрепляется хорошим согласованием с результатами расчетов одномерных модельных задач по значениям заплесков, по общей картине трансформации набегающей волны и поведению отраженных волн. В частности, как и в одномерном случае, в двумерных модельных акваториях зоны затопления и осушения для двух первых акваторий более значительны, чем для третьей (Рис. 25). Эта уверенность также подкрепляется хорошим согласованием результатов расчетов на адаптивных сетках (алгоритм II) с результатами, полученными по алгоритму I на мелких равномерных сетках.

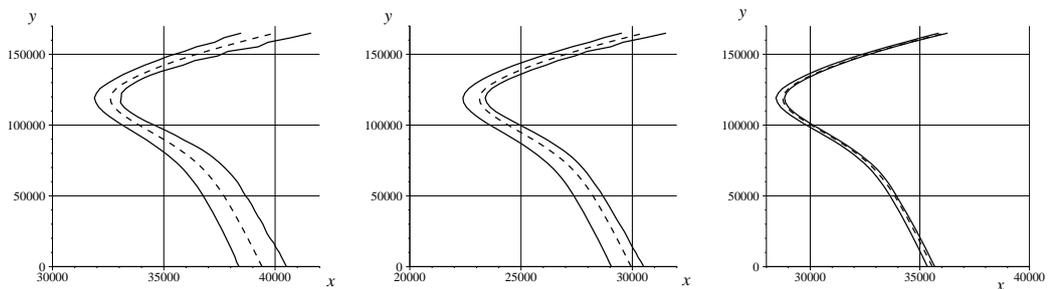


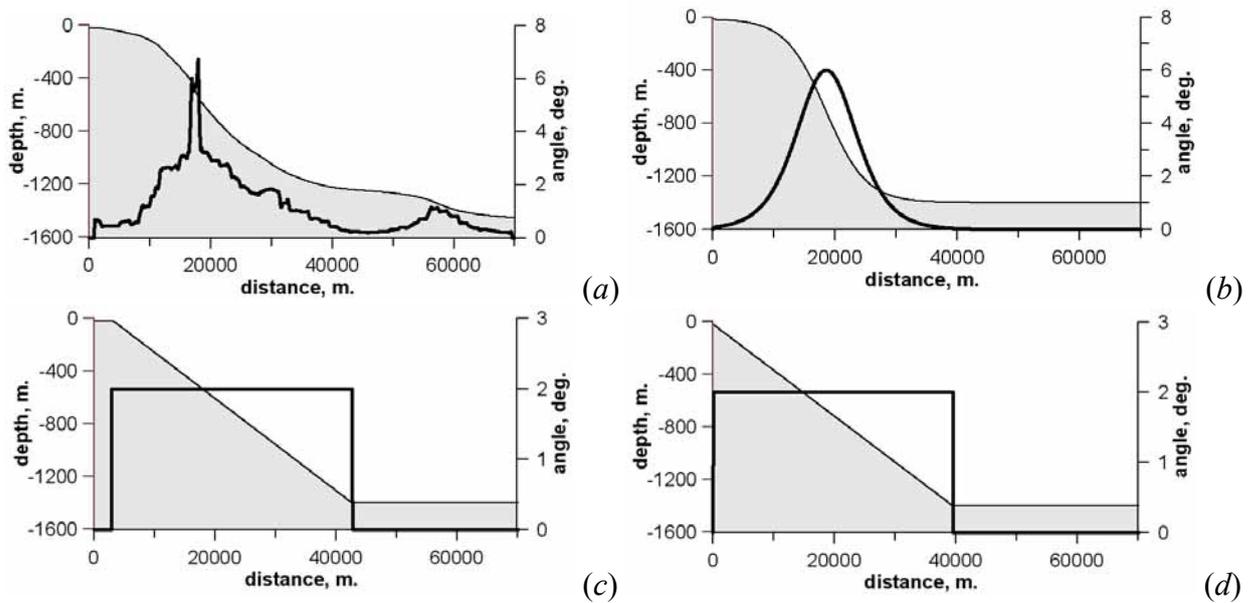
Рис. 25. Границы зон затопления (левая сплошная линия) и осушения (правая сплошная линия), положение первоначальной линии уреза (штриховая линия) для акваторий «10.8», «11.7», «11.87» (слева направо).

**Заключительный раздел отчета по проекту посвящен исследованию оползневого механизма генерации вон цунами и влиянию на характеристики этого механизма особенностей реального рельефа в районе г. Хадера (Израиль).**

Для изучения влияния неоднородностей рельефа дна на поверхностные волны, порождаемые движением подводного оползня, рассматривался ряд модельных рельефов (Рис. 26). Все они в той или иной мере связаны с «реальным» рельефом дна акватории, полученным в результате оцифровки вертикального сечения прибрежного рельефа Средиземноморского побережья Израиля в нормальном по отношению к берегу направлении в районе города Хадера.

Предполагалось, что в начальный момент времени жидкость покоится и известна функция, описывающая начальную форму оползня [С.А. Бейзель, Л.Б. Чубаров, Г.С. Хакимзянов. Моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному склону. *Rus. J. Num. An. Math. Model.* 2010 (в печати)]. Положение тела при  $t > 0$  определялось законом его движения, который учитывал силы тяжести, выталкивания, присоединенной массы, трения и сопротивления воды. Этот закон был выведен

исполнителями настоящего проекта и, в отличие от используемого ранее в исследованиях оползневого механизма генерации волн закона движения тела исключительно по плоскому откосу, учитывает неоднородности рельефа дна.



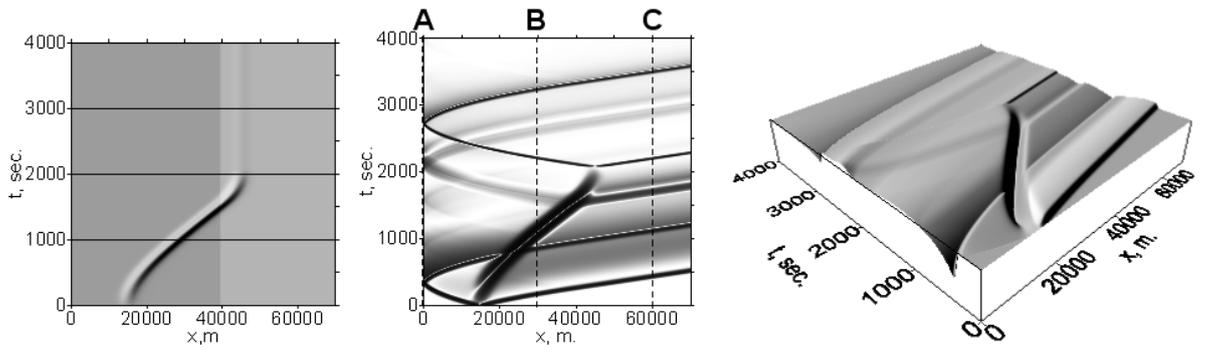
**Рис. 26.** Изображения характеристик рельефов дна модельных акваторий, использовавшихся в ходе вычислительных экспериментов – распределения глубин (заливка, оси слева) и углов наклона (жирные кривые, оси справа): (a) – «реальный» склон; (b) – «криволинейный» склон; (c) – «составной линейный» склон; (d) – «линейный» склон.

На Рис. 27–Рис. 30 показана общая картина течения на всех четырех рельефах. Как видно, при старте оползня возникают две волны, одна из которых – волна повышения – толкается оползнем в сторону увеличения глубин. С завершением основной фазы ускорения эта волна отделяется от тела и уходит через правую открытую границу. Волна понижения разделяется на две, одна из которых движется по направлению к берегу. Другая волна понижения движется непосредственно над оползнем вплоть до его остановки. Возвращаясь к «береговой» волне понижения, заметим, что движется она со скоростью малых возмущений, которая в теории мелкой воды определяется глубиной акватории по формуле  $\sqrt{g(h(x))}$ . Отражаясь от стенки, расположенной на левой границе, эта волна постепенно догоняет оползень и взаимодействует с сопровождающей его волной (при этом при движении отрицательной волны вниз по склону ее «хвост» выходит на положительные значения и приводит к появлению на левой стенке волны повышения). На последующих этапах отраженная от стенки волна продолжает свой путь в сторону глубоководья.

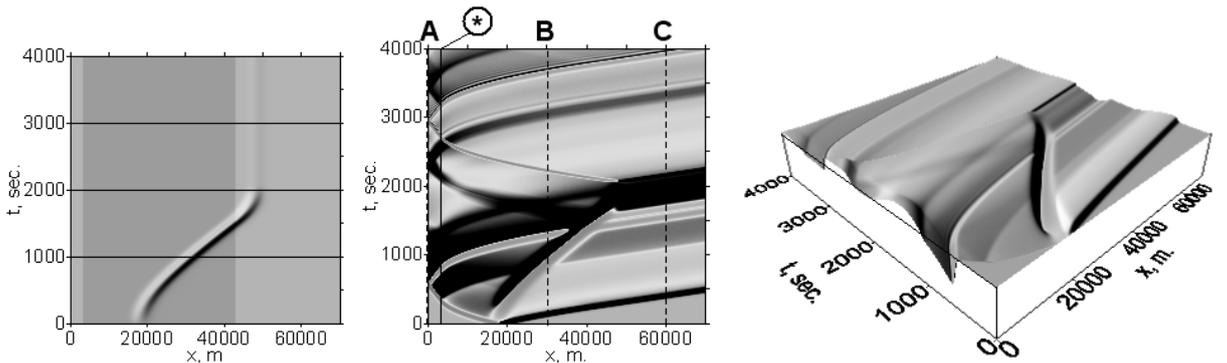
При торможении оползня формируются две противоположные длинные волны с небольшими амплитудами, достаточно пологими передними фронтами и крутыми задними (следствие резкой остановки). Отрицательная волна идет в открытое море, а положительная – к берегу, при этом после ее отражения от стенки и движения назад над понижающимся дном на стенке возникает волна понижения.

Эта картина в целом наблюдается на всех рельефах, за исключением того факта, что в случае содержания батиметрией шельфовой зоны, над этой зоной образуются также «захваченные» волны.

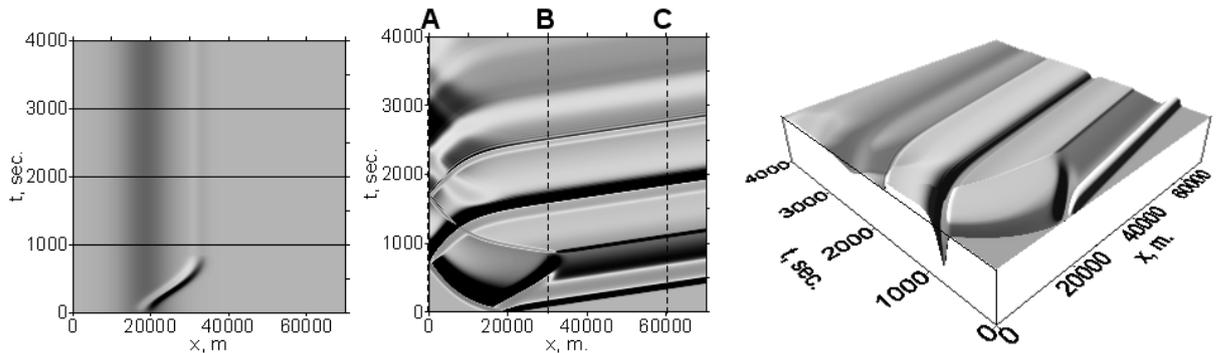
Выполненные вычислительные эксперименты продемонстрировали особенности проявления на разных рельефах изменений размеров оползней, их начальных заглублений, плотностных характеристик и коэффициентов трения. Результаты расчетов показали, что криволинейность склона в некоторых случаях оказывает существенное влияние на характер зависимости генерируемых движением по этому склону подводного оползня волновых режимов от указанных выше параметров явления, причем особенности волновых режимов, генерируемых движением оползня по криволинейным рельефам, обусловлены, главным образом, учетом этой криволинейности в законе движения оползня.



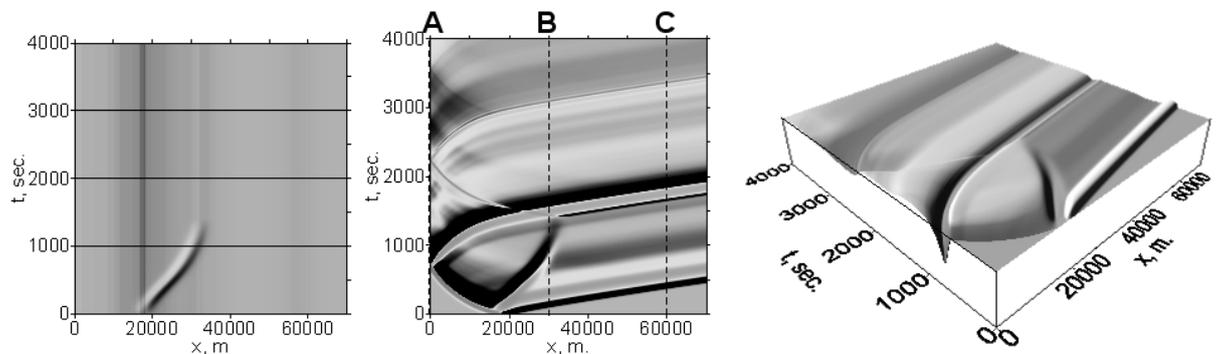
**Рис. 27.** Движение оползня (слева) и динамика свободной поверхности при движении оползня по линейному склону.



**Рис. 28.** Движение оползня (слева) и динамика свободной поверхности при движении оползня по составному линейному склону, символом \* на среднем рисунке указано положение мористого края прибрежной площадки с постоянной глубиной 20 м.



**Рис. 29.** Движение оползня (слева) и динамика свободной поверхности при движении оползня по криволинейному склону.



**Рис. 30.** Движение оползня (слева) и динамика свободной поверхности при движении оползня по реальному склону.

Так, изменение начального заглабления оползня приводит к тому, что при этом может изменяться угол наклона в занимаемом оползнем участке склона, что, в свою очередь, изменяет начальное ускорение. В итоге, если на линейных склонах меньшее заглабление оползня однозначно приводит к большим амплитудам генерируемых волн, то на криволи-

нейных наиболее «опасный» оползень не обязательно располагается вблизи берега.

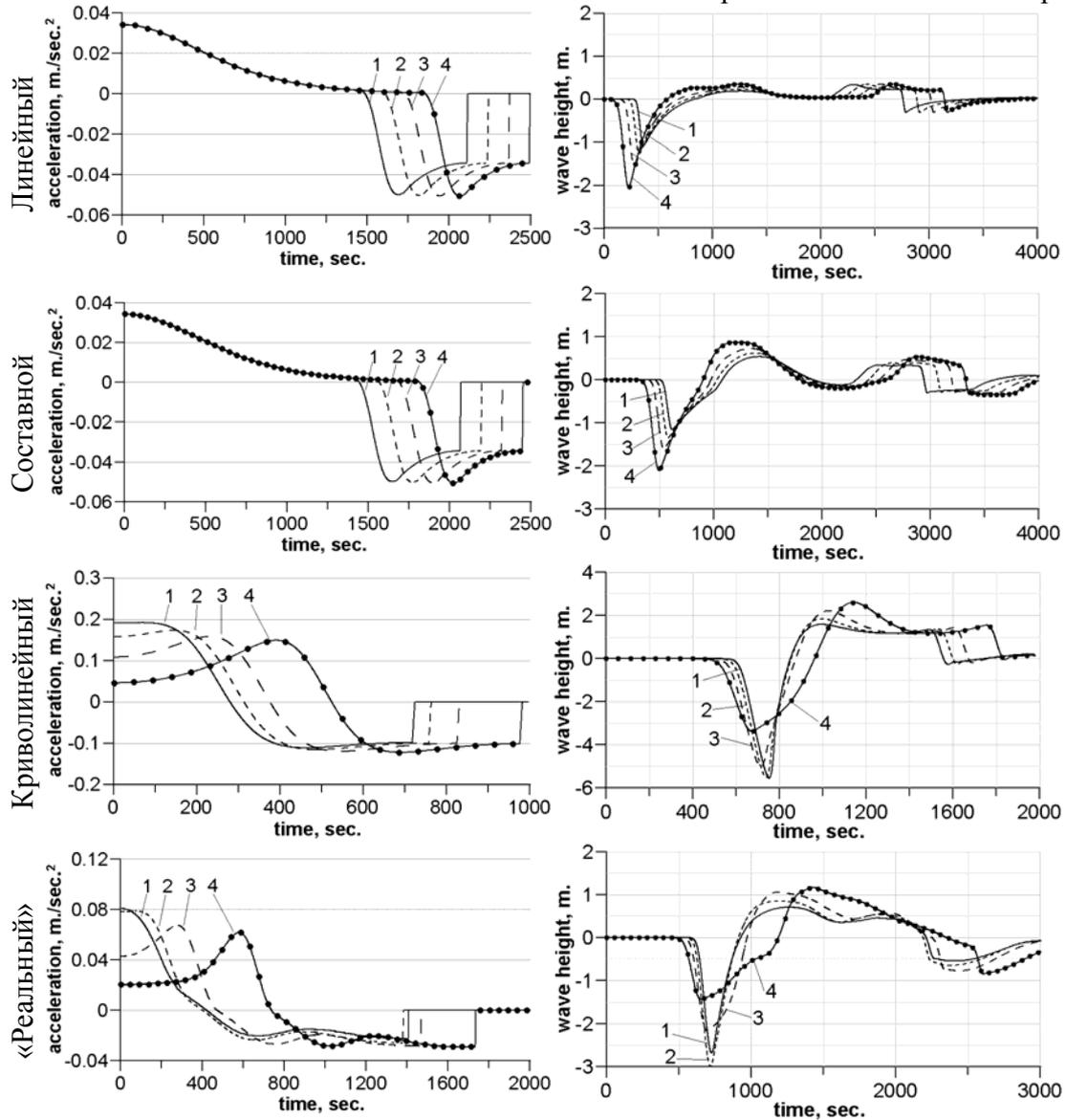
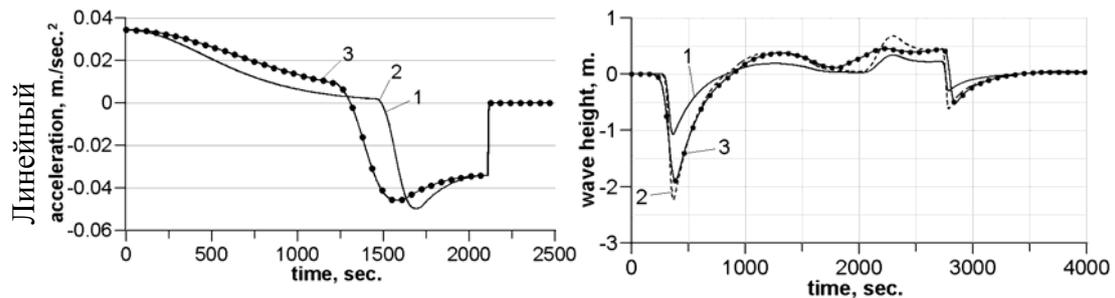
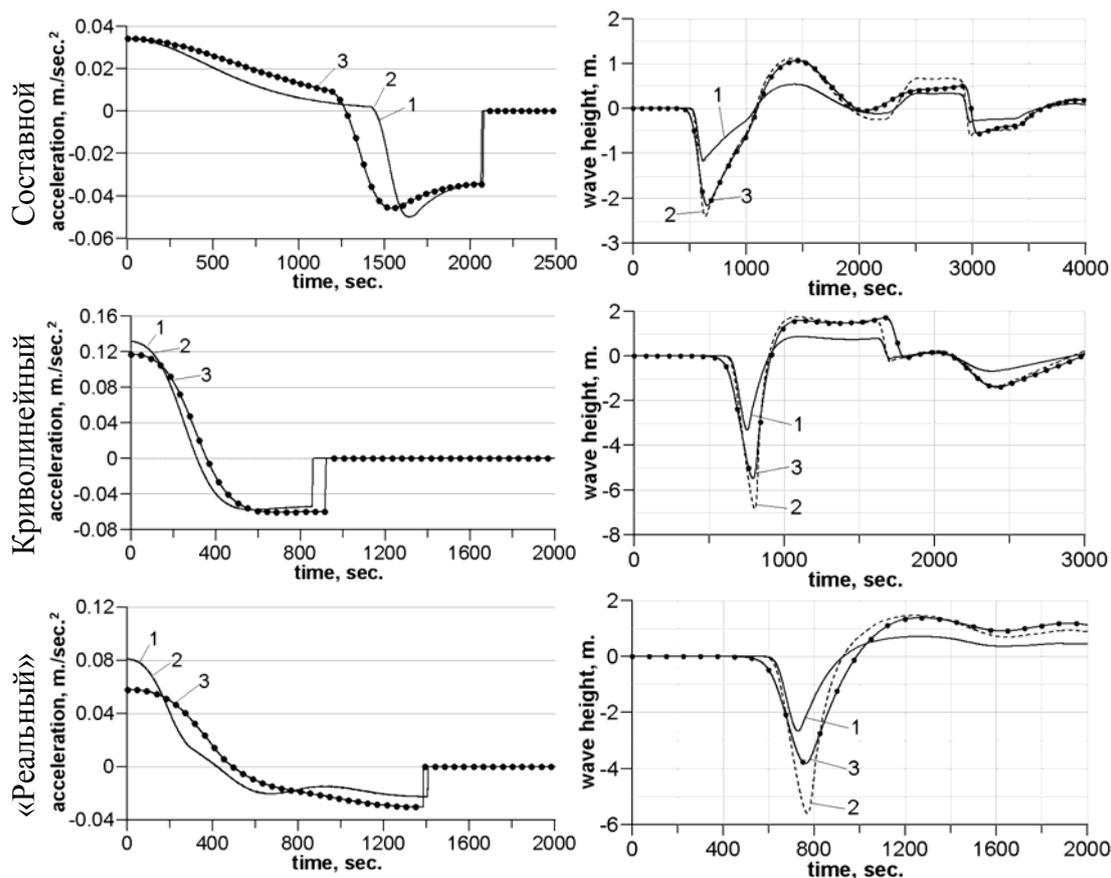


Рис. 31. Графики зависимости ускорения от времени (слева), а также мареграммы на левой границе (справа) для различных заглублений начального положения центра масс. Для составного линейного и «реального» склонов: (1) – 535 м., (2) – 435 м., (3) – 335 м., (4) – 235 м.; для линейного и криволинейного склонов: (1) – 500 м., (2) – 400 м., (3) – 300 м., (4) – 200 м.

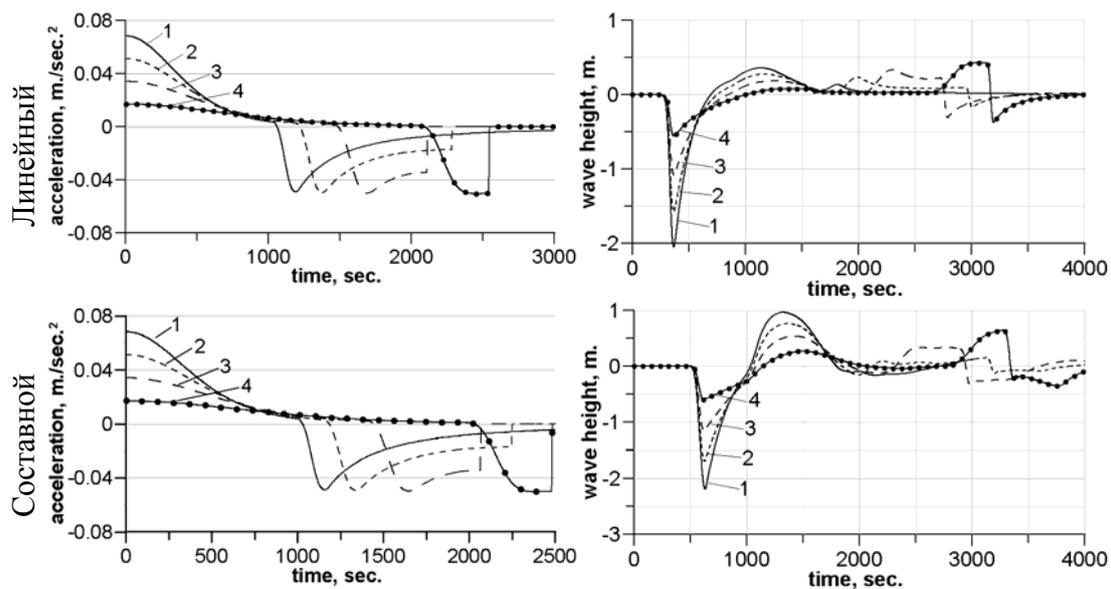
При варьировании длины оползня средний угол наклона дна под ним также меняется, что оказывает дополнительное влияние на генерируемый волновой режим. В итоге, если изменить длину оползня, движущегося по линейному склону, то амплитуды генерируемых этим движением поверхностных волн изменятся в то же количество раз. На криволинейных склонах увеличение длины сказывается слабее.





**Рис. 32.** Графики зависимости ускорения от времени (слева), а также мареграммы на левой границе (справа) для различных размеров тела: (1) – «эталонный» оползень; (2) – оползень с удвоенной толщиной; (3), линия с маркерами – оползень с удвоенной длиной.

При изменении силы трения и относительной плотности характеристики волновых режимов, возникающих над линейными и реальными склонами, меняются схожим образом. Отметим также, что коэффициент трения является единственным из рассмотренных в работе параметром, определяющим место остановки тела.



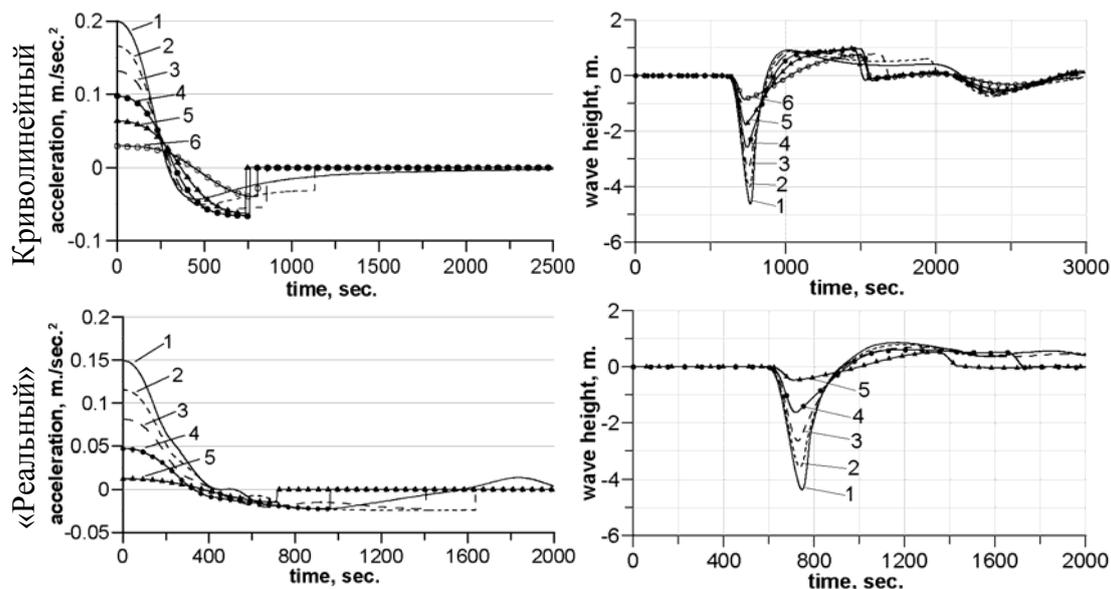


Рис. 33. Графики зависимости ускорения от времени (слева), а также мареграммы на левой границе (справа) для различных углов трения: для случая линейных склонов (1) – 0.0°, (2) – 0.5°, (3) – 1.0°, (4) – 1.5°; для случая криволинейного склона (1) – 0.0°, (2) – 1.0°, (3) – 2.0°, (4) – 3.0°, (5) – 4.0°, (6) – 5.0°; для «реального» склона (1) – 0.0°, (2) – 1.0°, (3) – 2.0°, (4) – 3.0°, (5) – 4.0°.

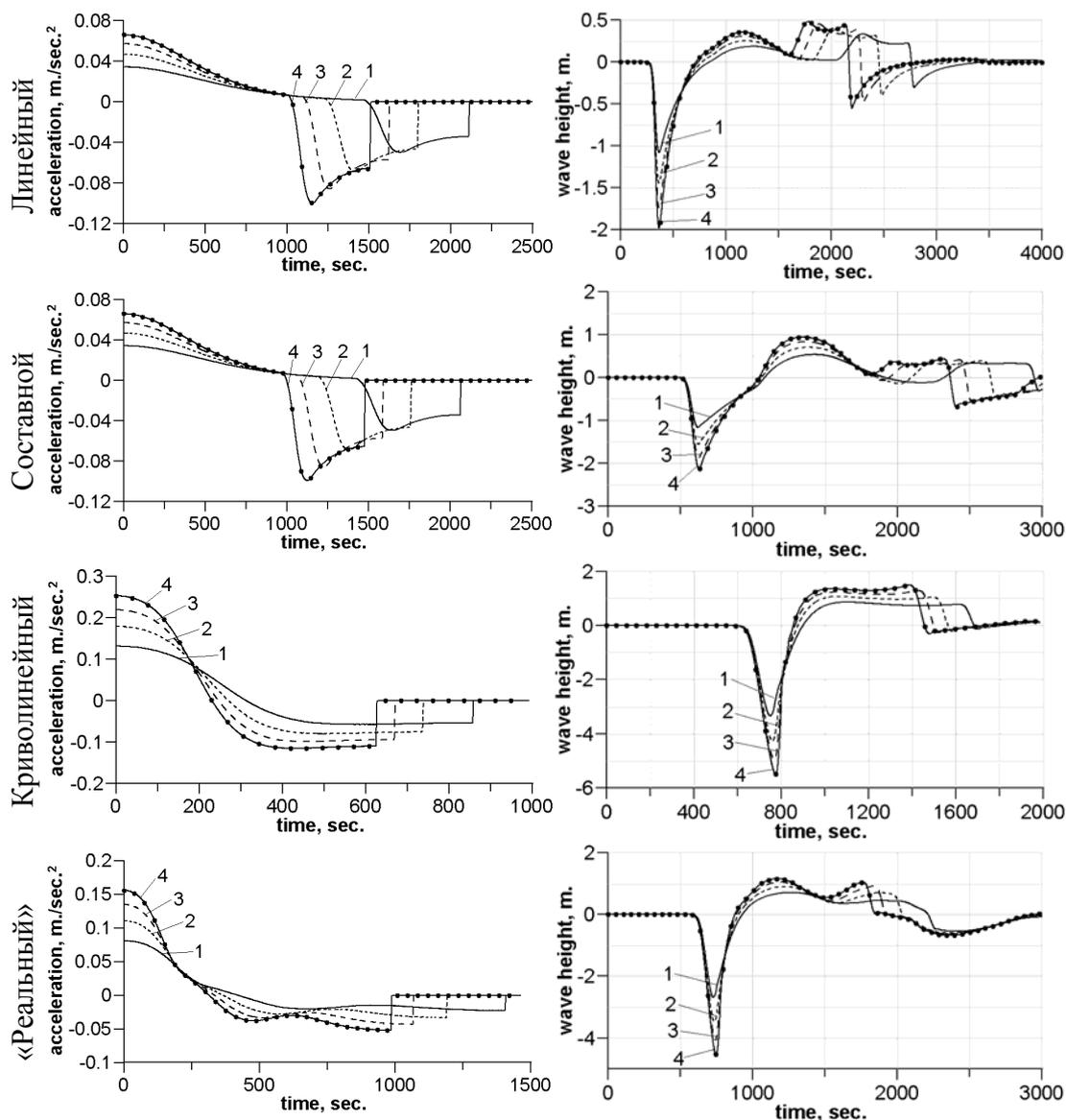


Рис. 34. Графики зависимости ускорения от времени (слева), а также мареграммы на левой границе (справа) для различных значений отношения плотностей оползня и воды: (1) – 1.5; (2) – 1.75; (3) – 2.0; (4) – 2.25.

### 3.7. *Степень новизны полученных результатов*

Все результаты являются новыми и получены впервые, они соответствуют мировому уровню исследований в данной области. Внедрение полученных результатов обеспечит существенное повышение эффективности деятельности служб, ответственных за предупреждение чрезвычайных ситуаций, вызываемых цунами, и ликвидацию их последствий.

### 3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

Все результаты соответствуют мировому уровню исследований в данной области. Разработанные математические модели, численные алгоритмы и результаты моделирования оползневой механизма генерации волн цунами в прибрежной зоне прошли апробацию на крупных международных и национальных научных форумах:

\* Международная конференция "Математические и информационные технологии (MIT 2009)", Август, 27 – 31, 2009, Копачинк, Сербия; Август, 31 – Сентябрь, 5, 2009, Будва, Черногория;

\* 24-й Международный симпозиум по цунами. Июль, 14-16, 2009. Новосибирск, Россия

\* 4-е Российско-Немецкое Совещание по перспективным исследованиям в вычислительных науках и высокопроизводительных вычислениях (12-16 октября 2009 г., Фрайбург, Германия).

### 3.9. *Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта*

В рамках выполнения проекта созданы новые методы и подходы к моделированию воздействия волн цунами на хозяйственную инфраструктуру и население. Усовершенствованы существующие вычислительные алгоритмы, позволяющие осуществлять моделирование трансформации волн цунами с учетом реальной батиметрии дна и топографии берега.

В блоке моделирования цунами для определения параметров начального возмущения поверхности океана (генерации цунами) использовалась, как наиболее адекватная, математическая модель, являющаяся решением замкнутой системы уравнений динамической теории упругости, описывающей колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии). Этот подход, получивший название «поршневой модели» возбуждения цунами, широко применяется в задачах численного моделирования цунами, и в случаях, когда известны параметры очага землетрясения и детальная батиметрия дна океана, позволяет получить достаточно точное соответствие расчетных мареограмм наблюдаемым.

Опыт исполнителей проекта показал, что для определения максимальных высот волн в окрестности защищаемых пунктов с помощью математических моделей волновой гидродинамики достаточно использовать классические уравнения мелкой воды. Вычислительный модуль системы реализует алгоритм расчета распространения цунами, основанный на различных модификациях конечно-разностной схемы Мак-Кормака с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы на границах вода/суша и проход волн за границы расчетной области.

Для обеспечения необходимой точности расчетов без одновременного существенного усиления требований к вычислительным ресурсам исполнителями предложен оригинальный прием, называемый «заморозка». Этот прием состоит в том, что мелкая сетка используется только в небольшой области, где она необходима, а в качестве начальных данных (возвышения свободной поверхности и распределения скоростей) для такого детального расчета используются переинтерполированные на мелкую сетку данные, полученные («замороженные») при расчете на грубой сетке во всей области в некоторый момент времени, при котором волны, идущие к исследуемому участку побережья, заходят в эту область.

Оценка характеристик цунами у берегов Израиля основана на изучении распределения потенциальных очагов цунами в зоне Восточного Средиземноморья и моделировании особенностей распространения волн цунами на конкретных участках акватории, прилегающих к

защищаемому побережью.

В рамках исследования задачи о накате волны цунами на берег использовалась методика, основанная на предварительном изучении особенностей волновой картины вблизи берега для иерархии упрощенных модельных акваторий, наследующих основные свойства изучаемого фрагмента прибрежной зоны. На таких модельных задачах выявлены базовые характеристики исследуемого явления, в дальнейшем детализируемые и уточняемые по мере приближения к реальным условиям; определена степень чувствительности вычислительных алгоритмов к параметрам реальных практических задач. Предложенный подход облегчил интерпретацию результатов и разделение проявившихся эффектов на физические и численные. Расчеты проводились с помощью двух методик. Первая из них состоит в реализации алгоритмов сквозного счета на равномерной сетке, а вторая позволяет вести расчет в области с подвижной границей (линией уреза) – на неравномерной динамически изменяющейся сетке, адаптирующейся к особенностям батиметрии и береговой линии.

Для решения задачи о генерации поверхностных волн движением подводного оползня, имитируемого скольжением деформируемого тела по неровному подводному откосу, использовался разработанный исполнителями закон движения тела, учитывающий неоднородность батиметрии, при этом тело движется под действием сил тяжести, выталкивания, трения, гидродинамического сопротивления и присоединенной массы. В рамках модели мелкой воды выполнен комплекс многопараметрических расчетов, позволивших определить зависимость процесса волнообразования от глубины залегания оползня, его длины и толщины, относительной плотности, коэффициента трения, а также от геометрии склона.

3.10.1 *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*

16

3.10.2 *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2008 г.*

3

3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*

2

3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*

0

3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*

450000 руб.

3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда не приобреталось*

3.15. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*

3.16. *Библиографический список всех публикаций по проекту*

1. Beisel S.A., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., and Khakimzyanov G.S. On the approaches to a numerical modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation // Communications in Applied Analysis. 11 (2007). No. 1, pp.121-135
2. Chubarov Leonid B. Mathematical modelling in constructing Kamchatka regional tsunami warning systems // In: Abstracts of The Fourth International Conference of Applied Mathematics and Computing, V. 1, August 12-18, 2007 Plovdiv, Bulgaria. Editor Svetoslav Nenov, pp. 76-77
3. Шокин Ю.И., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Об использовании методов численного моделирования для оценки катастрофических воздействий длинных волн на прибрежную территорию // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007, № 4, стр. 104-113
4. Л.Б.Чубаров, Ю.И.Шокин Математическое моделирование в задачах поддержки принятия решений в ходе кризисных ситуаций, связанных с катастрофическими волновыми процессами в океане // В кн.: Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии

- гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 5-10
5. С.А.Бейзель, С.В.Елецкий, З.И.Федотова, Л.Б.Чубаров Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях // В кн.: Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 432-436
  6. В.В.Бабайлов, Д.Б.Дамбиева, Г.С.Хакимзянов, Л.Б.Чубаров Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами // В кн.: Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 444-447
  7. В.В.Бабайлов, С.А.Бейзель, А.А.Гусев, В.К.Гусяков, С.В.Елецкий, И.А.Зыскин, Д.А.Камаев, З.И.Федотова, Л.Б.Чубаров, Ю.И.Шокин Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами // Вычислительные технологии, 2008, Т. 13, Специальный выпуск 2, С. 4-20.
  8. С.В.Елецкий, Ю.Б.Майоров, В.В.Максимов, И.С.Нуднер, З.И.Федотова, Г.С.Хакимзянов, Л.Б.Чубаров Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня // В кн.: Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 428-432
  9. Gussyakov V.K., Fedotova Z.I., G.S. Khakimzyanov, Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Some approaches to local modeling of tsunami wave runup on a coast // Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2008, Vol. 3, No. 6, pp. 551–565.
  10. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsy S.V., Fedotova Z.I., and Gussyakov V.K. Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design (Novosibirsk, July, 23-27, 2007), Berlin, 2007, Vol. 101, P. 52–69.
  11. Березин Е.Н., Бейзель С.А. Параллельная реализация алгоритма для расчета генерации длинных поверхностных волн цунами движением оползня // Вычислительные технологии, 2009, Т. 14, № 1, С. 7-20.
  12. Beisel S., L. Chubarov, I. Didenkulova, E. Kit, A. Levin, E. Pelinovsky, Yu. Shokin, M. Sladkevich The 1956 Greek Tsunami Recorded at Yafo (Israel) and Its Numerical Modeling // Journal of Geophysical Research, 2009, Vol. 114, C09002, doi:10.1029/2008JC005262.
  13. Beisel S., Chubarov L., Khudyakova V., Shokin Yu. Some features of the landslide mechanism of the surface waves generation in real basins // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14-16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, P.51.
  14. Beisel S., Chubarov L., Kit E., Levin A., Shokin Yu., Sladkevich M. Numerical modeling of tsunami near the Israeli coast // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14-16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, P.81.
  15. Beisel S., Chubarov L, Kit E., Levin A., Shokin Yu., Sladkevich M. Анализ возможных волн цунами у Израильского берега Средиземного моря // In: «Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009), August, 27 - 31, 2009, Kopaonik, Serbia August, 31 - September, 5, 2009, Budva, Montenegro», Conference Information: Univerzitet u Pristini, Prirodno-matematski fakultet, Kosovska Mitrovica, Vol. 1, 2009, P. 55.
  16. Beisel S, Chubarov L, Khudyakova V., Shokin Yu. Modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation near the Mediterranean coast of Israel // In: «Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009), August, 27 - 31, 2009, Kopaonik, Serbia August, 31 - September, 5, 2009, Budva, Montenegro», Conference Information: Univerzitet u Pristini, Prirodno-matematski fakultet, Kosovska Mitrovica, Vol. 1, 2009, P. 56.
  17. С.А. Бейзель, Л.Б.Чубаров, Г.С.Хакимзянов Моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному склону // Russian Journal of numerical analysis and mathematical modelling, 2009 (в печати).
  18. S.A. Beisel, L.B. Chubarov, G.S. Khakimzyanov, Yu.I. Shokin Some features of the landslide mechanism of surface waves generation in real basins // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2009 (в печати).

19. Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Numerical modelling of surface water waves arising due to movement of underwater landslide on irregular bottom slope // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2009 (в печати).

- 3.17. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*  
рациональное природопользование
- 3.18. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*  
технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор* S.A. Beisel @Бейзелъ Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* S.A. Beisel
- 9.3.1. *Другие авторы*  
L.V. Chubarov @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Z.I. Fedotova @Федотова Зинаида Ивановна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
G.S. Khakimzyanov @Хакимзянов Гаяз Салимович; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
L.V. Chubarov  
Z.I. Fedotova  
G.S. Khakimzyanov
- 9.4. *Название публикации*  
On the approaches to a numerical modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation.
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Communications in Applied Analysis
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2007
- 9.10.1 *Том издания*  
11
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
121-135
- 9.12.1. *Полное название издательства* Dynamic Publishers
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В статье излагаются результаты численного моделирования оползневой генерации волн цунами. Исследование основано на многопараметрических расчетах с использованием иерархии моделей волновой гидродинамики. Определены зависимости процесса волнообразования от длины и толщины оползня, глубины его залегания и законов движения. Сравниваются результаты, полученные с помощью полной и приближенных гидродинамических моделей, оценен вклад вертикальных компонент движения, определены области адекватности приближенных моделей.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 15

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Leonid B. Chubarov @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Leonid B. Chubarov
- 9.3.1. *Другие авторы*
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
- 9.4. *Название публикации*  
Mathematical modelling in constructing Kamchatka regional tsunami warning systems
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Abstracts of The Fourth International Conference on Applied Mathematics and Computing
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2007
- 9.10.1 *Том издания*  
13
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 76-77
- 9.12.1. *Полное название издательства* Technical University
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Излагаются результаты, полученные сотрудниками Института вычислительных технологий СО РАН и других новосибирских институтов в работе по проекту конструирования нового поколения системы предупреждения о цунами для Тихоокеанского побережья п-ва Камчатка. Целью проекта является разработка технологии пополнения базы данных о возможностях проявления катастрофических волн цунами с использованием специальных серий вычислительных экспериментов. На первом этапе работы предполагается конструирование совокупности характерных источников цунамигенных землетрясений, используемых впоследствии для расчета начальных возмущений поверхности океана. На следующем этапе выполняется моделирование трансформации волны цунами на трассе от зоны генерации до берега. Результаты работы представляются в систему поддержки принятия решений для обеспечения адекватных действий по смягчению вероятных последствий катастрофических волн.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Шокин Ю.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Шокин Ю.И.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Федотова З.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Чубаров Л.Б.  
Федотова З.И.
- 9.4. *Название публикации*  
Об использовании методов численного моделирования для оценки катастрофических воздействий длинных волн на прибрежную территорию.
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
104-113
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Всероссийский институт научной и технической информации
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В статье формулируются принципы использования вычислительного инструментария для решения прикладных задач, ориентированных на поддержку принятия решений антикризисными управляющими при угрозе катастрофического воздействия на берега и прибрежные сооружения неуправляемого движения огромных масс воды, вызванного природными или антропогенными катаклизмами.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
7

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор* Shokin Yu.I. @Шокин Юрий Иванович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Shokin Yu.I.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Babailov V.V. @Бабайлов Вадим Валерьевич; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Beisel S.A. @Бейзель Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Chubarov L.B. @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Eletsky S.V. @Елецкий Станислав Викторович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Fedotova Z.I. @Федотова Зинаида Ивановна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Gusyakov V.K. @Гусьяков Вячеслав Константинович; 2; Россия; Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Babailov V.V.  
Beisel S.A.  
Chubarov L.B.  
Eletsky S.V.  
Fedotova Z.I.  
Gusyakov V.K.
- 9.4. *Название публикации* Mathematical modelling in application regional tsunami warning systems operations.
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10.1 *Том издания* 101
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 52–69
- 9.12.1. *Полное название издательства* Springer
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В работе обсуждается опыт применения современных информационно-вычислительных технологий для наполнения информационных баз о проявлениях цунами у побережья Камчатки с использованием результатов специально организованных вычислительных экспериментов по моделированию трансформации волн цунами на трассах от источника начального возмущения до побережья.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 11

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор* Gusyakov V.K. @Гусьяков Вячеслав Константинович; 2; Россия; Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Gusyakov V.K.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Fedotova Z.I. @Федотова Зинаида Ивановна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
G.S. Khakimzyanov @Хакимзянов Гаяз Салимович; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Chubarov L.B. @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Shokin Yu.I. @Шокин Юрий Иванович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Fedotova Z.I.  
G.S. Khakimzyanov  
Chubarov L.B.  
Shokin Yu.I.
- 9.4. *Название публикации* Some approaches to local modeling of tsunami wave runup on a coast
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Russian Journal of numerical analysis and mathematical modelling
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2008
- 9.10.1 *Том издания* 23
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 551–565
- 9.12.1. *Полное название издательства* de Gruyter
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Работа посвящена разработке методики для расчета наката цунами на реальное побережье. В целях детального исследования особенностей волновой картины вблизи берега предлагается поэтапное решение ряда упрощенных задач для модельных расчетных акваторий, на следующих базовые характеристики изучаемого фрагмента реальной прибрежной зоны. Излагаются результаты, непосредственно связанные с моделированием наката цунами на побережье Бенгальского залива.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
19

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Иинститут вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Л.Б. Чубаров
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Ю.И. Шокин; 1; Россия; Иинститут вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Ю.И. Шокин
- 9.4. *Название публикации*  
Математическое моделирование в задачах поддержки принятия решений в ходе кризисных ситуаций, связанных с катастрофическими волновыми процессами в океане.
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
5-10
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В докладе обсуждаются подходы к решению прикладных и фундаментальных задач проблемы цунами. Определяется роль и место современных математических технологий в поддержке принятия решений на различных этапах развития цунами. Указываются особенности проблемы, связанные с разнообразием механизмов генерации волн и разнообразием факторов, определяющих их трансформацию при распространении и взаимодействии с берегом.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
С.А. Бейзель; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
С.А. Бейзель
- 9.3.1. *Другие авторы*  
С.В.Елецкий; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
З.И.Федотова; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б.Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
С.В.Елецкий  
З.И.Федотова  
Л.Б.Чубаров
- 9.4. *Название публикации*  
Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
432-436
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В докладе обсуждается проблема чувствительности волнового процесса к вычислительной точности применяемых дискретных алгоритмов. На примере задачи о распространении волны в модельной области изучен вопрос о выборе подходящих параметров численных схем, обеспечивающих требуемую точность вычислений.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
2

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
С.В. Елецкий; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
С.В. Елецкий
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Ю.Б. Майоров; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ  
В.В. Максимов; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ  
И.С. Нуднер; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ  
З.И. Федотова; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Г.С. Хакимзянов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Ю.Б. Майоров  
В.В. Максимов, И.С. Нуднер  
З.И. Федотова, Г.С. Хакимзянов  
Л.Б. Чубаров
- 9.4. *Название публикации*  
Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 428-432
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Представлены результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования процесса генерации и трансформации поверхностных волн движением твердого фрагмента дна по береговому склону. Для проведения лабораторных экспериментов был использован гидроволновой лоток, в котором движение подводного оползня моделировалось движением твердого тела, целиком погруженного в жидкость. Математическое моделирование выполнялось в рамках уравнений линейной, нелинейной и нелинейно-дисперсионной моделей мелкой воды и полной гидродинамической модели идеальной жидкости со свободной поверхностью. В качестве вычислительных алгоритмов использовались конечно-разностные схемы, включая (для полной модели) криволинейные адаптивные сетки. Определены основные характеристики изучаемого явления, изучены особенности различных математических моделей.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 11

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
В.В. Бабайлов; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
В.В. Бабайлов
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Д.Б. Дамбиева; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Г.С. Хакимзянов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Д.Б. Дамбиева  
Г.С. Хакимзянов  
Л.Б. Чубаров
- 9.4. *Название публикации*  
Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
444-447
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В докладе рассматриваются результаты моделирования поверхностных волн, возникающих при кратковременном стоке жидкости в донные трещины, образующиеся в результате землетрясения. Моделирование выполнялось на основе нелинейной модели потенциальных течений жидкости со свободной границей и нелинейной модели мелкой воды. Выполнено сравнение результатов расчетов по разным моделям с экспериментальными данными.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
3

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор* В.В. Бабайлов; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* В.В. Бабайлов
- 9.3.1. *Другие авторы*  
С.А. Бейзель; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
А.А. Гусев; 2; Россия; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
В.К. Гусяков; 2; Россия; Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
С.В. Елецкий; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
И.А. Зыскин; 2; Россия; НПО "Тайфун"  
Д.А. Камаев; 2; Россия; НПО "Тайфун"  
З.И. Федотова; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Ю.И. Шокин; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
С.А. Бейзель, А.А. Гусев, В.К. Гусяков, С.В. Елецкий, И.А. Зыскин, Д.А. Камаев, З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров, Ю.И. Шокин
- 9.4. *Название публикации* Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
5-20
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В статье обсуждается применение современных информационно-вычислительных технологий для наполнения информационных баз о проявлении цунами у побережья результатами специально организованных вычислительных экспериментов по моделированию трансформации волн цунами на трассах от источника начальных возмущений до побережья полуострова Камчатка.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
13

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Березин Е.Н.; 2; Россия; Кемеровский государственный университет
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Березин Е.Н.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Бейзель С.А.
- 9.4. *Название публикации*  
Параллельная реализация алгоритма для расчета генерации длинных поверхностных волн цунами движением оползня
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2009
- 9.10.1 *Том издания*  
14
- 9.10.2 *Номер издания*  
1
- 9.11. *Страницы*  
7-20
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Работа посвящена численному исследованию оползневой генерации волн цунами с использованием современных вычислительных технологий и методов параллельного программирования.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
17

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
L. Chubarov; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
I. Didenkulova; 2; Эстония; Институт кибернетики  
E. Kit; 2; Израиль; Университет Тель-Авива  
A. Levin; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований  
E. Pelinovsky; 2; Россия; Институт прикладной физики СО РАН  
Yu. Shokin; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
M. Sladkevich; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
L. Chubarov, I. Didenkulova, E. Kit, A. Levin, E. Pelinovsky, Yu. Shokin, M. Sladkevich
- 9.4. *Название публикации* The 1956 Greek Tsunami Recorded at Yafo (Israel) and Its Numerical Modeling
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Journal of Geophysical Research
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания* 114
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* C09002, doi:10.1029/2008JC005262
- 9.12.1. *Полное название издательства* American Geophysical Union
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации* В статье представлены результаты анализа и математического моделирования данных о цунами в Греции в 1956 году, записанные в Яффо. При численном моделировании генерации и распространения волн цунами, вызванного сейсмическим источником, получились амплитуды, близкие к записанным в окрестности Яффо. Однако, их спектр не содержал важные энергетические компоненты с периодом порядка 15 минут, в отличие от спектра натуральной записи. В случае, когда волны цунами представлялись как результат движения оползня, вызванного основным и/или самым сильным афтершоком, спектр мареограммы, рассчитанной вблизи Яффо, был получен очень близким к измеренному.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
28

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Chubarov L.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Khudyakova V.; 2; Россия; Новосибирский государственный университет  
Shokin Yu.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Chubarov L.  
Khudyakova V.  
Shokin Yu.
- 9.4. *Название публикации*  
Some features of the landslide mechanism of the surface waves generation in real basins
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
51
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт вычислительной математики и математической геофизики
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В работе представлены результаты исследования влияния особенностей реального рельефа дна на характеристики волн цунами, порождаемых движением подводного оползня.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
L. Chubarov; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
E. Kit; 2; Израиль; Университет Тель-Авива  
A. Levin; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований  
Yu. Shokin; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
M. Sladkevich; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
L. Chubarov, E. Kit, A. Levin, Yu. Shokin, M. Sladkevich
- 9.4. *Название публикации*  
Numerical modeling of tsunami near the Israeli coast
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
81
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В работе представлен обзор исторических цунами в Средиземном море. Проведено численное моделирование цунами в Эгейском море 9-го июля 1956г. На основании исторических данных определены положения "критических" для израильского побережья цунами-генных землетрясений. Проведены численные эксперименты по моделированию возможного воздействия вызванных ими волн цунами на побережья Израиля и Египта.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
L. Chubarov; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
E. Kit; 2; Израиль; Университет Тель-Авива  
A. Levin; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований  
Yu. Shokin; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
M. Sladkevich; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
L. Chubarov  
E. Kit; 2; Израиль; Университет Тель-Авива  
A. Levin; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований  
Yu. Shokin; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
M. Sladkevich; 2; Израиль; Институт прибрежных и морских исследований
- 9.4. *Название публикации* Анализ возможных волн цунами у Израильского берега Средиземно-го моря
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009)
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 55
- 9.12.1. *Полное название издательства* Университет Приштины
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Рассмотрены возможные источники волн цунами в Средиземном море, которые могут проявиться у израильского берега. В рамках модели мелкой воды проведено предварительное численное моделирование распространения волны цунами от источников, расположенных в разных регионах Средиземного моря. В качестве источников цунами были рассмотрены как тектонические механизмы, так и подводные землетрясения. В результате было получено, что заметные значения высот волн цунами могут быть получены от источников, расположенных на израильском шельфе, а также от источников, расположенных на юге от Кипра.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Chubarov L.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Khudyakova V.; 2; Россия; Новосибирский государственный университет  
Shokin Yu.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Chubarov L.  
Khudyakova V.  
Shokin Yu.
- 9.4. *Название публикации*  
Modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation near the Mediterranean coast of Israel
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009),
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 56
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Университет Приштины
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Работа посвящена исследованию влияния реальной батиметрии на волновую картину, порождаемую движением по дну подводного оползня. Рассмотрены различные типы движения, отличающиеся способами учета геометрических свойств рельефа подстилающей поверхности. По результатам вычислительных экспериментов определены базовые неизменные характеристики волновых процессов и параметры, зависящие от особенностей законов движения тела.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
С.А. Бейзель; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
С.А. Бейзель
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Л.Б.Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Г.С.Хакимзянов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Л.Б.Чубаров  
Г.С.Хакимзянов
- 9.4. *Название публикации* Моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному склону
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Russian Journal of numerical analysis and mathematical modelling
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* de Gruyter
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Настоящая работа посвящена исследованию влияния неровности подводного склона на характеристики волнового режима, порождаемого движением оползня по такому склону. Используя в качестве модели оползня простейшее представление в виде твердого тела, авторы рассматривают два модельных рельефа, в той или иной степени учитывающих особенности средиземноморского побережья Израиля. Моделирование волновых процессов выполняется в рамках уравнений теории мелкой воды. Обсуждаются результаты сопоставления волновых режимов, анализируются зависимости характеристик этих режимов от геометрических и физических параметров изучаемых явлений – от глубины залегания оползня, его длины и толщины, а также от геометрии склона и величины силы трения.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
25

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА**

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-72014
- 9.2.1. *Первый автор*  
S.A. Beisel; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
S.A. Beisel
- 9.3.1. *Другие авторы*  
L.B. Chubarov; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
G.S. Khakimzyanov; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Yu.I. Shokin; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
L.B. Chubarov  
G.S. Khakimzyanov  
Yu.I. Shokin
- 9.4. *Название публикации*  
Some features of the landslide mechanism of surface waves generation in real basins
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* Springer
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Излагаются результаты численного моделирования генерации волн цунами движением затопленного оползня, которое имитируется скольжением деформируемого тела по неровному подводному откосу. В рамках модели мелкой воды выполнен комплекс многопараметрических расчетов, позволивших определить зависимость процесса волнообразования от глубины залегания оползня, его длины и толщины, относительной плотности, коэффициента трения, а также от геометрии склона. Основное внимание уделяется эффектам, обусловленным неоднородностью глубин, моделирующей особенности реальных акваторий.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
15

*Подпись руководителя проекта*

