

НОМЕР ПРОЕКТА 06-05-72014		УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА
НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА Исследование особенностей поведения катастрофических волн цунами у средиземноморского побережья Израиля методами математического и лабораторного моделирования		
ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ 05 - науки о земле		КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА 05-513 01-201
ВИД КОНКУРСА МНТИ_а - Совместный конкурс российско-израильских проектов		
ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА Шокин Юрий Иванович		ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА (383)3306150
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ПРОЕКТ Институт вычислительных технологий СО РАН		
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ФИНАНСИРОВАНИЕ Институт вычислительных технологий СО РАН		
ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2006 г. 450000 руб.	ОБЪЕМ ФИНАНСИРОВАНИЯ, ЗАПРАШИВАЕМЫЙ НА СЛЕДУЮЩИЙ ГОД 500000 руб.	
ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРОЕКТА (включая руководителя) 7	ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ 5	ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ 3
Федотова Зинаида Ивановна		
Чубаров Леонид Борисович		
Хакимзянов Гаяз Салимович		
Шокина Нина Юрьевна		
Бейзель Софья Александровна		
Елецкий Станислав Викторович		
ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА 26.06.2008
ПРОХОЖДЕНИЕ ОТЧЕТА (заполняется в РФФИ)		
РЕКОМЕНДАЦИЯ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА Проект прошел полный цикл экспертизы отчета и к финансированию: - рекомендован - не рекомендован (ненужный вариант зачеркнуть)		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА
РЕШЕНИЕ СОВЕТА ФОНДА По результатам рассмотрения на заседании Совета Фонда проект к финансированию: - принят - не принят (ненужный вариант зачеркнуть)		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА ФОНДА

ОТЧЕТ ЗА ПЕРВЫЙ ГОД РАБОТ ПО ПРОЕКТУ РФФИ 06-05-72014-МНТИ_a
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_a - Совместный конкурс российско-израильских проектов

1.5. *Год представления отчета*
2008

1.6. *Вид отчета*
первый этап (2007 – 2008 гг.)

1.7. *Краткая аннотация*

Настоящий отчет представляет результаты совместных исследований, выполненных российскими и израильскими исполнителями проекта за первый год работы. Совместная работа была начата в конце весны 2007 г. после получения израильскими партнерами уведомления от МНТИ (19 апреля 2007 г) и открытия финансирования российских участников решением РФФИ (29 мая 2007 г.). Полная программа работ рассчитана на два года.

Итоги первого этапа обеспечили значительное продвижение в понимании особенностей генерации и распространения волн цунами в Восточном Средиземноморье. Обладая знаниями, полученными в результате проделанной работы, можно с определенностью формулировать план на заключительный этап совместной деятельности, определять приоритеты необходимых к решению задач, приступить к подготовке входных данных для планируемых вычислительных экспериментов. Можно утверждать, что по результатам выполненных работ удастся сформулировать некоторые практически важные рекомендации по смягчению ущерба от морских катастрофических волн цунами.

Основные достижения первого года работы изложены ниже.

- Сбор исторических сведений (более 500 событий) о цунами в Средиземноморье.
- Определение параметров основных и вспомогательных расчетных областей. Анализ акваторий и определение перечня тринадцати защищаемых пунктов на Средиземноморском побережье Израиля, обладающих развитой прибрежной инфраструктурой, нуждающихся в защите от катастрофического воздействия волн цунами.
- Определение особенностей применяемого исполнителями вычислительного инструментария и его способности адекватно воспроизводить амплитудные и частотные характеристики волновых полей. Получение оценки вычислительного алгоритма, применяемого для моделирования распространения волн цунами, по воспроизведению не только динамических, но и спектральных характеристик волновых режимов.
- Проведение специальных вычислительных экспериментов, которые позволили определить достаточную для достижения необходимой точности детальность батиметрических данных. Это оказалось особенно важным для расчета трансформации волн в шельфовой зоне. Предложена и отлажена специальная экономичная вычислительная технология, обеспечивающая расчет с необходимой точностью на вложенных сетках различной детальности при невысоких требованиях к вычислительным ресурсам.
- Анализ доступных записей гидрофизических датчиков, сделанных вблизи Яффо в ходе цунами 09 июля 1956 г., вызванного цунамигенным землетрясением в Эгейском море. Сопоставление материалов, полученных в ходе численного моделирования, с результатами наблюдений продемонстрировало хорошее согласование вычисленных и наблюдаемых волновых характеристик.

- Численное моделирование вероятных сценариев развития волн цунами вблизи Левантийского побережья, порожденных модельными землетрясениями, эпицентры которых размещались в соответствии с известными историческими данными.
- Проведение предварительных вычислительных экспериментов с целью исследования возможного эффекта шельфового резонанса, с которым связывают присутствие в спектре колебаний уровня моря, записанных датчикам у берегов Ашдода, Тель-Авива, Акко, гармоник с периодами 50-60 минут.
- Конструирование сейсмической модели очага цунамигенного землетрясения в Эгейском море (09 июля 1956 г.) в соответствии с известной магнитудой землетрясения и представлениями о локальной геологической структуре дна Эгейского моря. Проведение расчетов порождаемых этим очагом волн цунами. Анализ результатов этих расчетов привел к выводу о невысокой опасности «эгейских цунами» для защищаемого побережья.
- Проведение вычислительных экспериментов с целью оценки вероятных положений «критических» для побережья Израиля очагов цунамигенных землетрясений южнее и восточнее острова Кипр.

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

2008

2.5. Вид отчета

first stage (2007 – 2008 гг.)

2.6. Краткая аннотация

The report represents results of joint research carried out by Russian and Israeli executors for the first year. The joint work started in late spring 2007 after receipt by Israeli partners a notification from IMRT (19. 04.2007) and opening of Russian partners financing by RFBR decision (29. 05.2007). Complete work program is rated at 2 years.

The first stage results allowed considerable advance in understanding of features of tsunami wave generation and propagation in the East Mediterranean. Having knowledge obtained as a result of the work done, one may definitely formulate a plan for final stage of joint work, determine priorities of problems needed to be solved and proceed to input data origination for planned numerical experiments. One may confirm that from results of work performed it will be possible to formulate some of practically important recommendations on mitigation of disastrous tsunami wave hazard.

Main achievements of first year stage are stated below.

- Collection of historical information (more than 500 events) about tsunami in Mediterranean.
- Determining parameters of base and adjuvant calculation domains. Analysis of water area and determining catalogue of 13 protected points on Mediterranean coast of Israel, possessing well-developed littoral infrastructure and demanding defense against catastrophic influence of tsunami waves.
- Determining features of computational tools used by executors and its ability to simulate adequately amplitude and response characteristics of wave fields. Obtaining estimate of computational algorithm used for modeling of tsunami wave propagation to simulate dynamic, as well as spectral characteristics of wave regime.
- Carrying out special computational experiments that allowed determining bathymetry data detail reasonable for desired accuracy. It turned to be important for computation of wave transformation in shelf zone. Special economic computational technology is proposed and tested which allow computation with desirable accuracy on imbedded grids with different detail under slight requirements to computational resources.
- Analysis of available records of hydrophysical gauges made near Yaffo on the course of tsunami of 9 July 1956 triggered by earthquake in Aegean Sea. Comparison of materials obtained by way of numerical modeling with observation results demonstrated good agreement of calculated and observed wave characteristics.
- Numerical modeling of probable scenarios of tsunami wage evolution near Levant coast generated by model earthquakes whose epicenters were situated in accordance with known historical data.
- Carrying out preliminary computational experiments to investigate probable effect of shelf resonance connected with presence of 50-50 minute harmonics in spectrum of sea level fluctuations recorded by gauges near Ashdod, Tel-Aviv, and Akko.
- Development of seismic model of tsunamigenic earthquake source in Aegean Sea (9 July 1956) in accordance with known earthquake magnitude and perception about local geological structure of Aegean Sea bottom. Carrying out calculations of tsunami waves generated by this source. Analysis

of computational results led to the conclusion of slight danger of Aegean tsunamis for the protected coast.

- Carrying out computational experiments with a view to estimate probable location of critical for Israeli coast sources of tsunamigenic earthquakes southward and eastward of Cyprus.

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

Сформулированные в заявке цели первого этапа работ предполагали

*отбор базовых предметных задач, характерных для исследуемых акваторий,

*сбор необходимой батиметрической и исторической информации,

*формулировку корректных постановок соответствующих математических задач (моделей),

*модификацию, а при необходимости разработку и тестирование на модельных задачах адекватных численных алгоритмов и программных компонент для решения перечисленных в заявке задач.

3.5. Степень выполнения поставленных в проекте задач

Цели этапа 2007 г. достигнуты, сформулированные задачи в целом выполнены. Полученные результаты обеспечивают достаточный научно-технический задел для успешной реализации проекта в целом. Исполнителям удалось значительно превысить предусмотренные планом задания в части моделирования исторического цунами в Эгейском море.

3.6. Полученные за отчетный период важнейшие результаты

Настоящий отчет представляет результаты совместных исследований, выполненных российскими и израильскими исполнителями проекта за первый год работы, начатой в конце весны 2007 г. после получения израильскими партнерами уведомления от МНТИ (19 апреля 2007 г.) и открытия финансирования российских участников решением РФФИ (29 мая 2007 г.). Полная программа работ рассчитана на два года.

Итоги первого этапа обеспечили значительное продвижение в понимании особенностей генерации и распространения волн цунами в Восточном Средиземноморье. Обладая знаниями, полученными в результате проделанной работы, можно с определенностью формулировать план на заключительный этап совместной деятельности, определять приоритеты необходимых к решению задач, приступить к подготовке входных данных для планируемых вычислительных экспериментов. Можно утверждать, что по результатам выполненных работ удастся сформулировать некоторые практически важные рекомендации по смягчению ущерба от морских катастрофических волн цунами.

Основные достижения первого года работы изложены ниже.

1. Сбор исторических сведений (более 500 событий) о цунами в Средиземноморье.

В результате исследования доступных материалов была собрана информация о нескольких сотнях цунами, происшедших в акватории Средиземного моря. Источниками этой информации послужили материалы Национального центра географических данных [(National Geographic Data Center (U.S.),

<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>], информационной системы WinITDB, созданной в лаборатории цунами Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [<http://omzg.ssc.ru/tsulab/inttab.html>], базы данных Национального института геофизики и вулканологии (Рим, Италия)

[<http://www.ingv.it/~roma/SITOINGLESE/activities/pererischio/macrosismica/tsunami/intro.html#Anchor-QLCAT-27355>].

В ряду источников данных следует указать и работу [Ambraseys, N., 1962: Data for Investigation on Seismic Sea Waves in the Eastern Mediterranean, Bull. Seism. Soc. Am., 52: 895-913].

Анализ данных, зачастую имеющих противоречивый характер, показывает, что за четыре тысячелетия в Средиземном море наблюдались свыше 500 событий, так или иначе связываемых с явлением цунами. Большой части катастрофических волн приписывается сейсмический механизм генерации (70%-75%), хроники указывают на вулканическую природу 5-10% цунами, причиной примерно 2-3% цунами могли быть оползни, менее 1% связываются с метеорологическими факторами, а около 15-20% источников цунами остаются неизвестными.

В работе Л.И.Лобковского и Д.Ю.Фашука, [2004: Великие волны // Химия и жизнь, 7: стр. 38–41] представлены результаты аналогичного анализа событий (Таблица 1) за последние 1800 лет. С их точки зрения за указанный период в акватории Средиземного моря произошли около 300 цунами, из числа которых около 79% были порождены землетрясениями, 2% – извержениями вулканов, 2% – оползнями, природа 17% пока неизвестна.

Таблица 1. Интервал повторяемости цунами

Расположение источника	Частота повторения – 1 раз в
Эгейское море, Западное побережье Греции, Сицилия	10 лет
Северное и Восточное побережья Греции, Малая Азия, Албания, Далмация, Кипр	20-25 лет
Западное и Восточное побережья Италии, Африканское побережье	50 лет
Мраморное море, побережье Испании, Восточное средиземноморье	100 лет

В XX веке в Средиземном море произошло три цунами, амплитуда которых превышала 30 метров. Это события 1908 г. в проливе Мессина (остров Сицилия, Италия), когда погибло более 80-ти тысяч человек, цунами 1956 г. около архипелага Киклады в южной части Эгейского моря и цунами 1979 г. у берегов Ниццы. Существующих данных об этих событиях недостаточно, чтобы точно установить причину образования катастрофических волн – было ли это результатом сейсмической активности, оползня или и того, и другого. В целом основная причина образования цунами в Средиземном море – это подводная сейсмическая активность, главный источник которой – тектонический разлом между Евразией и Африкой, схожий с тем, что находится у берегов Суматры и подвижка которого вызвала цунами в Юго-Восточной Азии. Большинство землетрясений в Средиземном море происходит около греческой дуги. Один из примеров такого события – большое землетрясение, которое разломило восточную часть этой дуги между островами Крит и Родос 8-го августа 1303 года, образовав большое цунами, не только ударившее по этим островам, но и прошедшее восточнее, достигнув Левантийского побережья и берегов Египта. Другие сильнейшие цунами, возникшие вследствие землетрясений около Крита, произошли в 1481, 1494, 1810, 1856 и 1870 годах. Все они так же проявились не только около Греции, но и на восточном побережье Средиземного моря.

В самой восточной части Средиземного моря сеймотектоническими участками являются Кипрская дуга и Левантский разлом. И хотя возможность возникновения здесь цунами меньше, чем у других цунамигенных средиземных регионов (Кипрско-Левантийский регион считается наименее опасным среди 18-ти цунамигенных зон Средиземного моря), здесь также произошло несколько разрушительных событий.

Вторая зона образования цунами в этом регионе – южная часть Кипра вдоль Кипрской дуги, где в образовании цунами участвуют в основном землетрясения на малой и средней глубинах. Заметная сейсмическая активность наблюдается на западе и юго-западе Кипра. Археологические раскопки в Курионе обнаружили отложения, приписываемые землетрясению 21-го июля 365-го года и цунами, которое предположительно разрушило Курион. Состав горных пород, образующих морское дно около Кесарии Приморской, также свидетельствует о том, что этот город был разрушен в результате сильного землетрясения 13-го декабря 115-го года в системе изломов Кипрской дуги, приведшего к цунами, которое

ударило по Левантийскому побережью и чье проявление было отмечено в Кесарии и Явне. Самые последние события такого рода произошли около Кипра 23-го февраля 1995г., 9-го октября 1996г. и 13-го января 1997г.

Помимо сейсмической активности дополнительными цунамигенными компонентами локального характера в этом регионе также могут быть подводные и прибрежные оползни. В истории левантийского побережья зафиксировано несколько случаев, когда уровень моря около берега опускался на несколько метров, обнажая морское дно на расстояние 1-2 километра, после чего резко возвращался обратно, очень незначительно или совсем не затопивая первоначальную сушу. Продолжительность этих понижений моря достигала нескольких часов, что намного больше, чем для обычных «сейсмических» цунами, и считается характерным признаком именно оползневых процессов на дне моря.

Исследуя профили дна израильского побережья, можно обнаружить несколько локальных областей, где возможны оползни, которые способны привести к понижению уровня моря и отступлению береговой линии на 0.5-1.5 км. Так, в позднем плиоцене здесь сошел один из крупнейших (объемом до 1000 км³) оползней в мире. Всего вблизи Израиля некоторые исследователи насчитывают около 40 средних и больших оползней, произошедших в плиоценовом и голоценовом периодах. Оползневые комплексы расположены вдоль всего побережья Израиля, как на шельфе, так и у основания склонов дна. Пространственное и временное распределение отложений говорит о том, что постепенно оползни начинают происходить здесь чаще, хотя их размеры уменьшаются. Частая повторяемость оползневых явлений связана с сейсмической активностью региона, наличием в отложениях газа, который делает их более пористыми, и большой крутизной склона дна (порядка 5 – 6°). На шельфе Израиля обнаружены два протооползня, которые могут в будущем прийти в движение.

Изложенные выше обстоятельства подчеркивают необходимость продолжения начатых настоящим проектом исследований и, в частности, реализации плана моделирования оползневых механизмов генерации волн цунами у побережья Израиля.

2. Определение параметров основных и вспомогательных расчетных областей. Анализ акваторий и определение перечня тринадцати защищаемых пунктов на Средиземноморском побережье Израиля, обладающих развитой прибрежной инфраструктурой, нуждающихся в защите от катастрофического воздействия волн цунами.

Землетрясения в Средиземноморье происходят значительно чаще, чем цунами и этот факт определяет практически полное отсутствие соответствующего опыта у населения и властей. Однако, исторические хроники свидетельствуют о том, что на побережье Средиземного моря трудно найти участок, который хоть раз не был подвержен воздействию катастрофических волн (Рисунок 1). Это обстоятельство подчеркивает актуальность проводимых в проекте исследований. Из числа цунами, возникших в результате сейсмической и вулканической деятельности в акватории Средиземного моря, около 20 % являются разрушительными. Например, в 365 г. землетрясение магнитудой 7.7, произошедшее вблизи о-ва Крит, вызвало сильное цунами, проявившееся во всей акватории Средиземного моря – в Ливии, Египте, Калабрии и на побережье Испании. Исторические сведения показывают, что западная часть побережья Средиземного моря менее подвержена воздействию волн цунами, чем его восточная часть. Сильнейшие цунами возбуждались в Эгейском море, в окрестности Греческой и Калабрийской островных дуг. Глубина залегания очагов цунамигенных землетрясений в Средиземноморье в среднем существенно меньше, чем в Тихом океане. Предварительный анализ показал также, что в Средиземном море цунами затухает значительно быстрее, чем в Тихом океане.

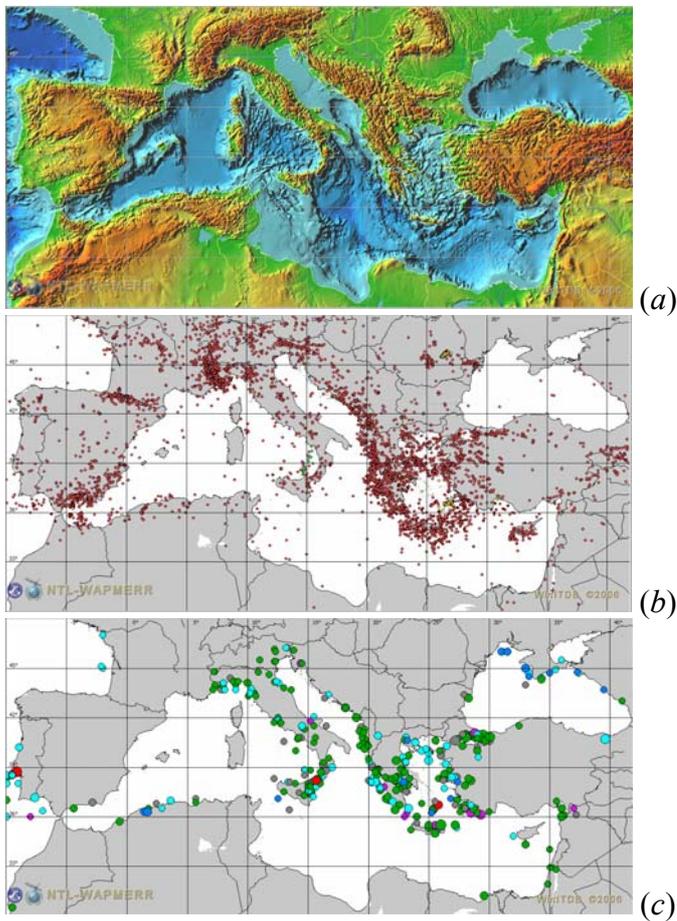


Рисунок 1. Акватория Средиземного моря и прилегающие акватории. (a) – рельеф дна и суши, (b) – распределение известных землетрясений, (c) – распределение известных цунами.

Исходные батиметрические данные аппроксимировали рельеф дна акватории (Рисунок 2) на регулярной равномерной сетке с шагом 1 минута. Для повышения точности расчетов использовались также оцифрованные рельефы с большей разрешающей способностью. Основные расчеты проводились на сетке с пространственным шагом 15 секунд. В отдельных участках, прилегающих к побережью Израиля, были использованы фрагменты с большей детальностью, предоставленные израильскими партнерами.

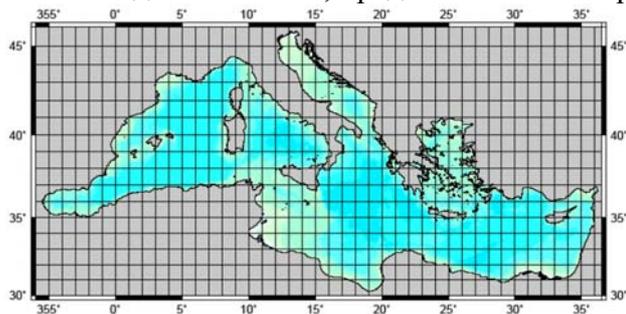


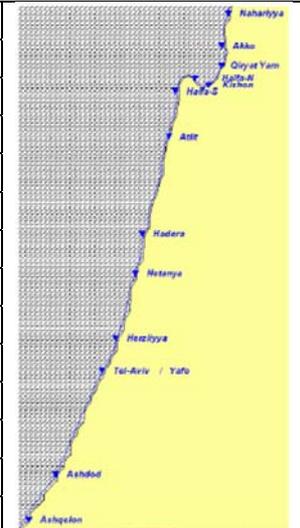
Рисунок 2. Исходная расчетная область.

В качестве «защищаемых пунктов», в которых рассчитывались, записывались и анализировались характеристики волнового режима, были выбраны 13 точек на побережье Израиля (Таблица 2).

Впоследствии к ним были добавлены пять пунктов на побережье Египта, что обеспечило возможность сравнительного анализа проявлений цунами. Дополнительные глубоководные мареографы устанавливались в мористых точках акватории на трассах от источника к побережью. Схемы их размещения определялись в зависимости от взаимного расположения источников в различных вычислительных экспериментах. Эти мареографы были предназначены для исследования трансформации моделируемых волн при их распространении.

Таблица 2 Положение защищаемых пунктов.

	Название	Широта, °N	Долгота, °E
1	Ashqelon	34.583333	31.666667
2	Ashdod	34.650000	31.733333
3	Tel-Aviv, Yafo	34.764722	32.067778
4	Herzliyya	34.836667	32.165833
5	Netanya	34.857778	32.333611
6	Hadera	34.918000	32.435000
7	Atlit	34.933333	32.683333
8	Haifa-South	34.950000	32.716667
9	Haifa-North	34.989167	32.815556
10	Kishon	35.009260	32.816667
11	Qiryat Yam	35.070278	32.850833
12	Akko	35.072778	32.923611
13	Nahariyya	35.094722	33.005833



3. Определение особенностей применяемого исполнителями вычислительного инструментария и его способности адекватно воспроизводить амплитудные и частотные характеристики волновых полей.

Получены оценки вычислительного алгоритма, применяемого для моделирования распространения волн цунами, по воспроизведению не только динамических, но и спектральных характеристик волновых режимов. Эти оценки выполнялись путем сопоставления результатов численного моделирования с точными, вычисленными аналитически частотами и с частотами, рассчитанными для тех же условий авторами статьи [Yalciner A. C., and Pelinovsky E. N., 2007: A Short Cut Numerical Method for Determination of Periods of Free Oscillations for Basins with Irregular Geometry and Bathymetry, Ocean Engineering, 34: 747–757]. При этом рассматривалась акватория, имеющая форму квадрата с длиной стороны 5013 м. Расчетная область была покрыта равномерной прямоугольной сеткой так, что вдоль каждой стороны размещалось 250 ячеек. Глубина акватории была постоянной и равнялась 500 м. Начальное возмущение задавалось в виде плоской синусоидальной волны с амплитудой 1 м, гребень волны был параллелен одной из сторон квадрата (Рисунок 3). Начальное поле скоростей задавалось нулевым, на всех границах расчетной области ставились отражающие граничные условия.

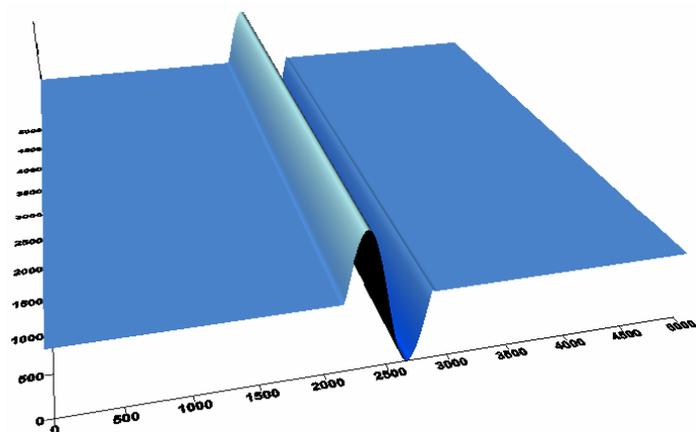


Рисунок 3. Начальное возмущение свободной поверхности в первой тестовой задаче.

Как следует из материалов, полученных исполнителями проекта (Таблица 3), результаты весьма убедительно свидетельствуют о способности применяемого ими алгоритма к адекватному воспроизведению частотных характеристик моделируемых волновых режимов. В этой таблице приведены точные аналитически вычисленные значения основных спектральных компонент волн, распространяющихся в модельном бассейне, результаты,

полученные другими авторами, и частоты, определенные с использованием базовых вычислительных алгоритмов исполнителей проекта. Поведение соответствующих относительных ошибок изображено и на рисунке (Рисунок 4).

Таблица 3. Сравнение расчетных спектральных характеристик волновых режимов тестовой задачи

Номер гармоники	Период, минуты				
	Точное теоретическое значение	Расчитанное значение [Yalciner and Pelinovsky (2007)]	Относительная ошибка	Расчитанное исполнителями проекта значение	Относительная ошибка
1	143.16	140.94	1.55%		
2	71.58	70.09	2.08%	71.43	0.21%
3	47.72	46.98	1.55%	47.39	0.69%
4	35.79	35.33	1.29%	35.84	0.14%
5	28.63	28.31	1.12%	28.57	0.21%
6	23.86	23.62	1.01%	23.98	0.50%
7	20.45	20.26	0.93%	20.41	0.20%
8	17.9	17.83	0.39%	18.05	0.84%
9	15.91	15.85	0.38%	15.95	0.25%
10	14.32	14.26	0.42%	14.47	1.05%
11	13.01	12.94	0.54%	13.04	0.23%
12	11.93	11.88	0.42%	12.05	1.01%
13	11.01	10.97	0.36%	11.03	0.18%
14	10.23	10.18	0.49%	10.18	0.49%

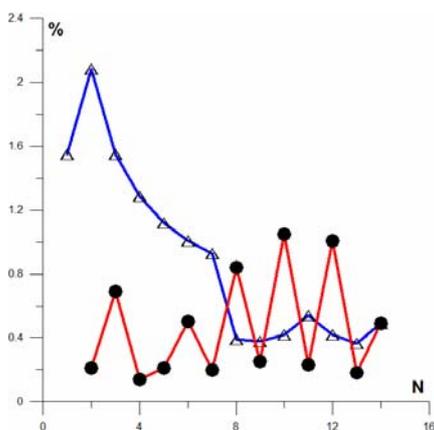


Рисунок 4. Графики относительных ошибок в определении частот для результатов настоящего проекта (красная линия с круглыми маркерами) и результатов из работы Ялчинера, Пелиновского (2007) – синяя линия с треугольными маркерами. По горизонтальной оси отложены номера гармоник.

4. Проведение специальных вычислительных экспериментов, которые позволили определить достаточную для достижения необходимой точности детальность батиметрических данных. Это оказалось особенно важным для расчета трансформации волн в шельфовой зоне. Предложена и отлажена специальная экономичная вычислительная технология, обеспечивающая расчет с необходимой точностью на вложенных сетках различной детальности при невысоких требованиях к вычислительным ресурсам. Тестовая задача, предназначенная для определения зависимости результатов моделирования от детальности реальной батиметрии, решалась в расчетной области, охватывавшей

восточную часть Средиземного моря от 30.5 до 36.5 градусов Восточной долготы и от 31.0 до 37.0 градусов Северной широты. В расчетах использовались сетки с разрешением 1 минута, 30, 20, 15, 7.5 секунд. Варьировались и характеристики начального возмущения: базовая начальная волна «sinus0» имела длину в 1 градус, и амплитуду 1 м. Начальные возмущения «sinus1» и «sinus2» отличались от исходного длиной (в два раза меньше и в 2 раза больше, соответственно) при той же амплитуде, а «sinus3» и «sinus4» имели в 2 раза меньшую и большую амплитуду при той же длине. Начальные скорости полагались нулевыми. Типичная форма начального состояния свободной поверхности изображена на рисунке (Рисунок 5).

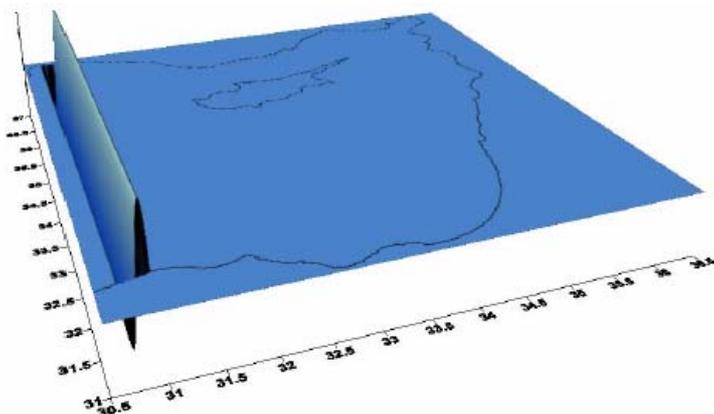


Рисунок 5 Начальное возмущение, характерное для второй тестовой задачи.

Первые результаты были получены в ходе вычислительных экспериментов, когда вместе с уменьшением длины начального возмущения вдвое, вдвое уменьшался и шаг расчетной сетки так, что разрешающая способность алгоритма по отношению к описанию начального возмущения оставалась неизменной. В этих экспериментах исходная длина начальной волны равнялась 30 км. Вычисленные при этом периоды двух основных гармоник для некоторых «защищаемых» пунктов приведены в таблице (Таблица 4).

Таблица 4 Рассчитанные значения периодов двух первых мод у некоторых «защищаемых пунктов» побережья Израиля.

	Период, мин.			
	Длина начального возмущения 30 км, шаг сетки 1 минута		Длина начального возмущения 15 км, шаг сетки 0.5 минуты	
	1-я гармоника	2-я гармоника	1-я гармоника	2-я гармоника
Ашкелон	70.58	31.67	27.78	16.67
Ашдод	72.67	30.87	27.78	15.15
Тель-Авив	77.20	30.12	12.83	11.10
Герцлия	70.58	47.48	14.67	11.67
Нетания	77.20	39.83	37.03	23.33

Обнаруженная в расчетах сильная зависимость частотных характеристик прибрежных мареограмм от длины исходного возмущения, а, возможно, и от детальности воспроизведения подводного рельефа, потребовала дополнительных исследований, весьма тщательных. Исполнителями проекта было принято решение исследовать динамику рассчитываемых характеристик волн на трассе к береговому виртуальному мареографу. С этой целью результаты численного моделирования в виде записи возвышения свободной поверхности фиксировались вблизи населенных пунктов Яффо и Хайфа (в ближайших к ним морских точках сетки), а также в точках, находящихся на нормали к берегу на расстоянии от береговых мареографов в 3, 6 и 10 шагов грубой «одноминутной» сетки (Рисунок 6).

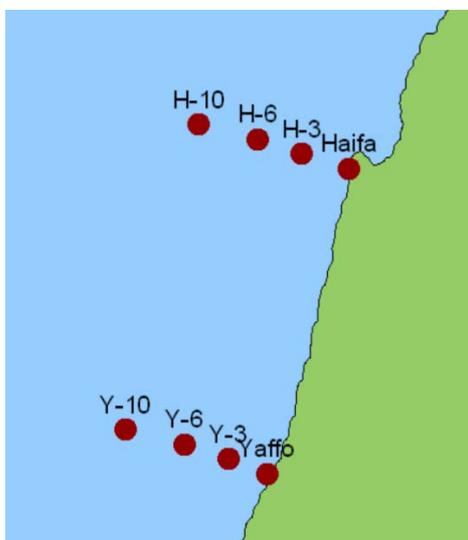


Рисунок 6. Расположение основных и «вспомогательных» мареографов для второй тестовой задачи.

На рисунке (Рисунок 7) представлены мареограммы, рассчитанные у берегового мареографа «Яффо» и на удалении от него, для трех разных начальных возмущений на грубой (1-но минутной) и мелкой (15-ти секундной) сетках.

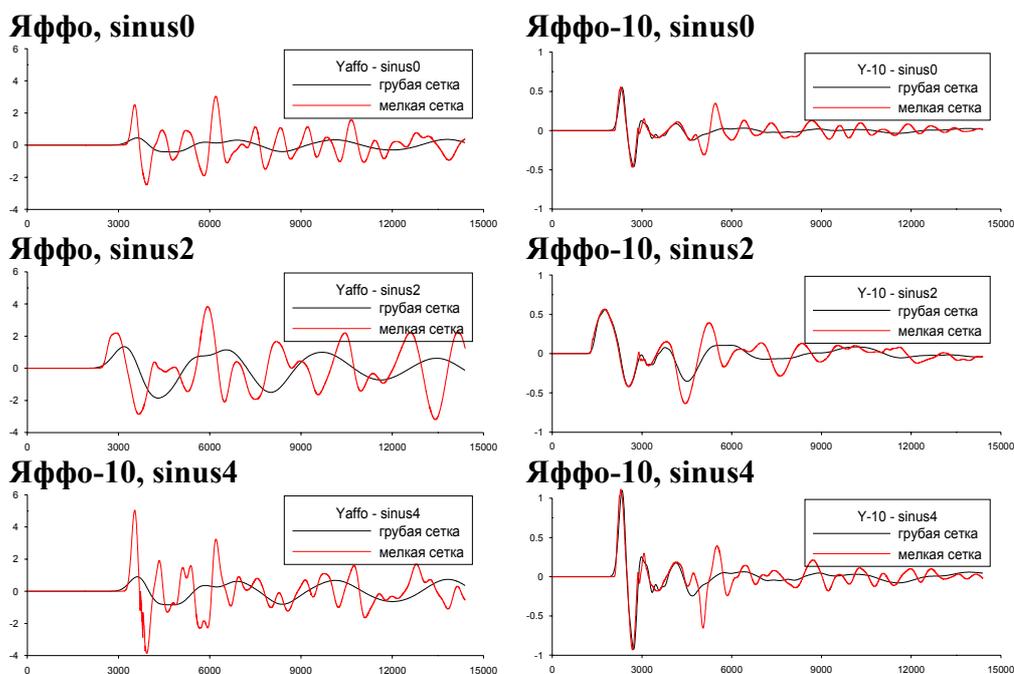


Рисунок 7. Мареограммы, рассчитанные в окрестности пункта «Яффо», для различных начальных возмущений на различных сетках. Черные линии – расчет на грубой (1 мин.) и сетке, красные – на мелкой (15 сек) сетке.

Как видно из графиков, вблизи берега, на малых глубинах, результаты расчетов сильно зависят от подробности сетки, так что измельчение сетки приводит к увеличению амплитуды волны в несколько раз. Утверждение о достаточной разрешающей способности 15-ти секундной сетки основано на многочисленных методических расчетах, проведенных исполнителями для модельных и реальных акваторий различной сложности. На удалении от берега головная часть мареограммы воспроизводится на различных сетках практически одинаково, различия наблюдаются в хвостовой части сигнала, которая в значительной степени определяется отраженными от берега волнами. Естественным образом проявляются изменения характеристик начального возмущения – увеличения длины и амплитуды. Отмеченная здесь картина наблюдалась для всех рассмотренных начальных возмущений. Спектральное представление отмеченных выше эффектов трансформации волн и их

зависимости от параметров начального возмущения (Рисунок 8) показало, что по мере приближения к берегу у спектров, рассчитанных на грубой сетке, пропадают высокие частоты, отмечаемые на глубоководных мареографах. По горизонтали здесь и ниже отложены частоты (1/сек). На мелкой сетке такой высокочастотной фильтрации нет. Рассчитанные на мелкой сетке спектры, как у берега, так и на удалении от него, демонстрируют отмеченное выше смещение преобладающих гармоник при изменении длины начального возмущения.

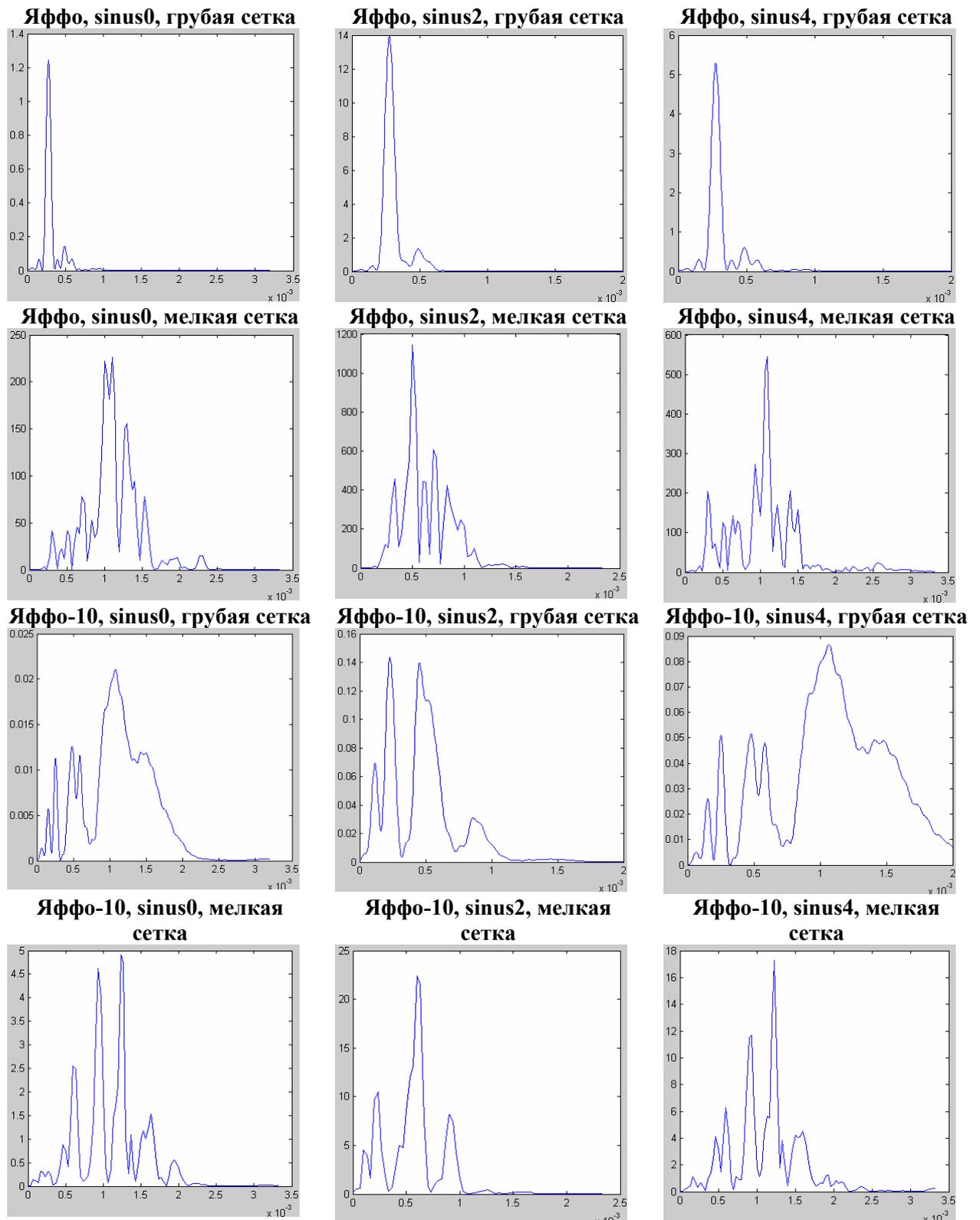


Рисунок 8. Спектральные образы мареограмм (Рисунок 7). По горизонтальным осям отложены величины, обратные частотам (Hz^{-1}), по вертикальным – спектральные амплитуды.

Завершая обсуждение результатов решения этой тестовой задачи, обратим внимание на «спектральную» иллюстрацию эффектов, обусловленных измельчением шага расчетной сетки (Рисунок 9). Здесь видно, как по мере измельчения сетки в спектральном образе мареграмм возрастает вклад гармоник большей частоты.

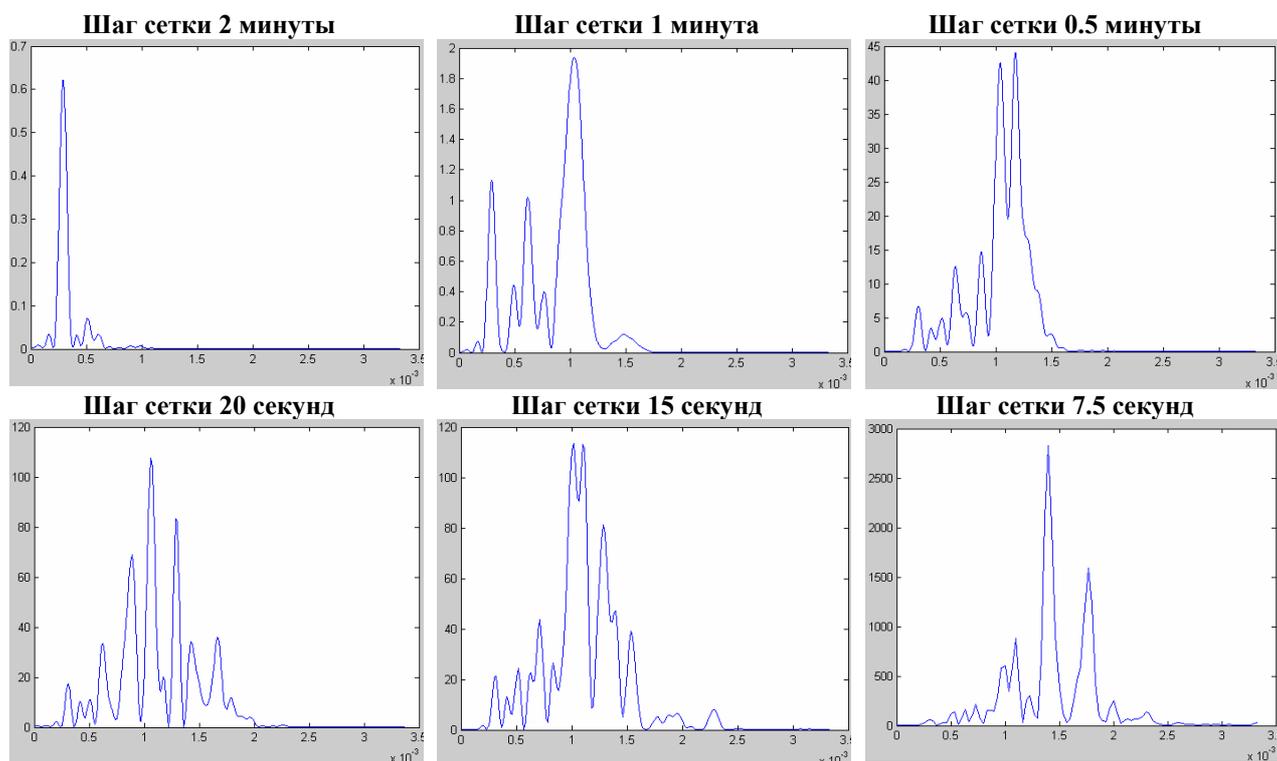


Рисунок 9. Спектральные образы мареграмм, рассчитанные у пункта «Яффо» от «базового» начального возмущения на различных сетках. По горизонтальным осям отложены величины, обратные частотам (Hz^{-1}), по вертикальным – спектральные амплитуды.

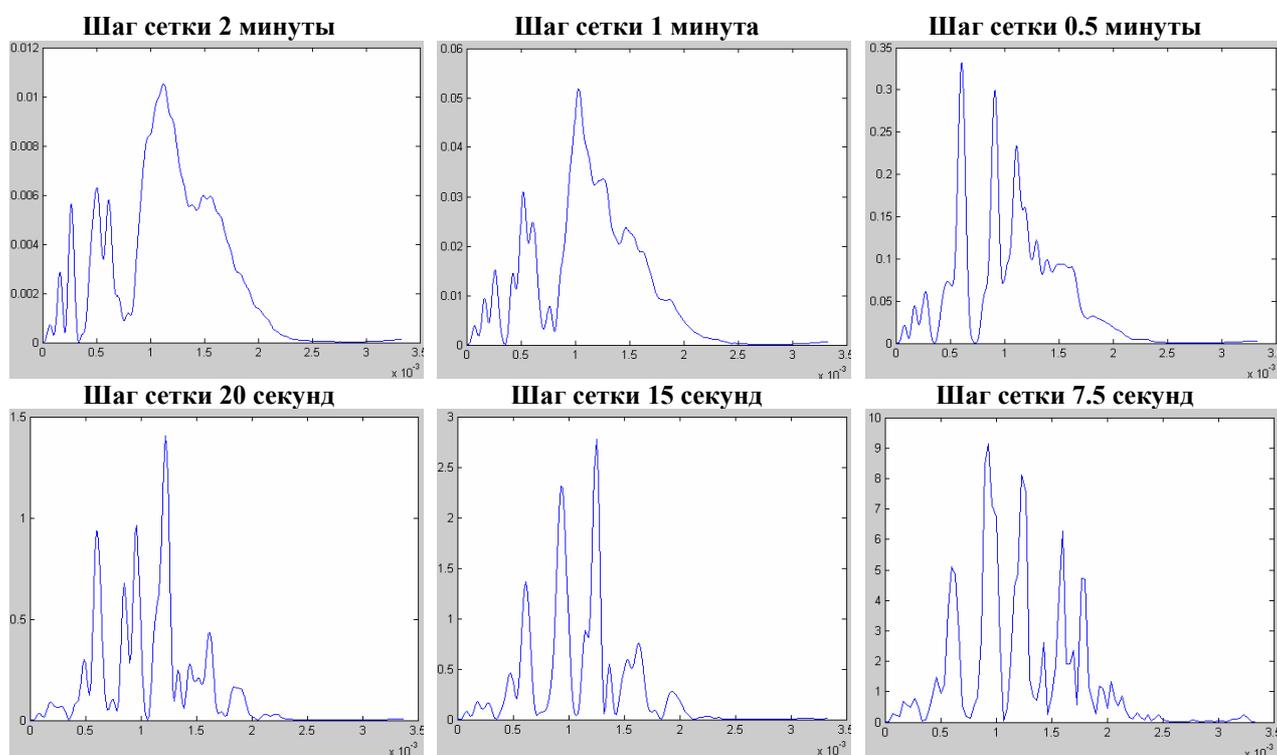


Рисунок 10. Спектральные образы мареграмм, рассчитанные для удаленного глубоководного мареграфа в окрестности пункта «Яффо» от «базового» начального возмущения на различных сетках. По горизонтальным осям отложены величины, обратные частотам (Hz^{-1}), по вертикальным – спектральные амплитуды.

Аналогичное смещение проявляется и на глубоководном мареографе, наиболее удаленном от пункта «Яффо» (Рисунок 10). Здесь, однако, область «высоких частот» присутствует и на результатах расчета с использованием грубой сетки, так, что уменьшение шага приводит к четкому выделению доминирующих частот.

Отмеченная при решении этой тестовой задачи зависимость результатов от детальности расчетной сетки показала целесообразность, а скорее – необходимость использования достаточно подробной, по крайней мере 15-ти секундной (для исследуемой акватории) сетки для определения волновых характеристик в мелководной зоне. С другой стороны, моделирование распространения волн в акваториях, одновременно содержащих мелководную и глубоководную зоны, с использованием мелкой сетки во всей области вряд ли можно считать целесообразным, так как с одной стороны, это требует значительно больших вычислительных ресурсов, а с другой – в глубоководной зоне необходимая точность достигается и на относительно грубой сетке.

С целью разрешения указанной проблемы исполнителями проекта был предложен прием, называемый далее «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.

В предлагаемом методе очень важно правильно подобрать время «заморозки». С одной стороны, оно не должно быть слишком большим, чтобы свести к минимуму неизбежные искажения на грубой сетке. С другой стороны, оно должно быть достаточным для входа в малую область содержательного фрагмента волнового поля, который сможет обеспечить достаточную достоверность детального расчета.

Метод «заморозки» проверялся в той же области с начальным возвышением свободной поверхности « $\sin \theta$ » (длина волны 1° , амплитуда 1 метр) и нулевыми начальными скоростями. В исходной области расчет велся на 1-но минутной сетке, а в маленькой области, включавшей побережье Израиля, использовалась сетка с шагом 15 секунд (Рисунок 11).

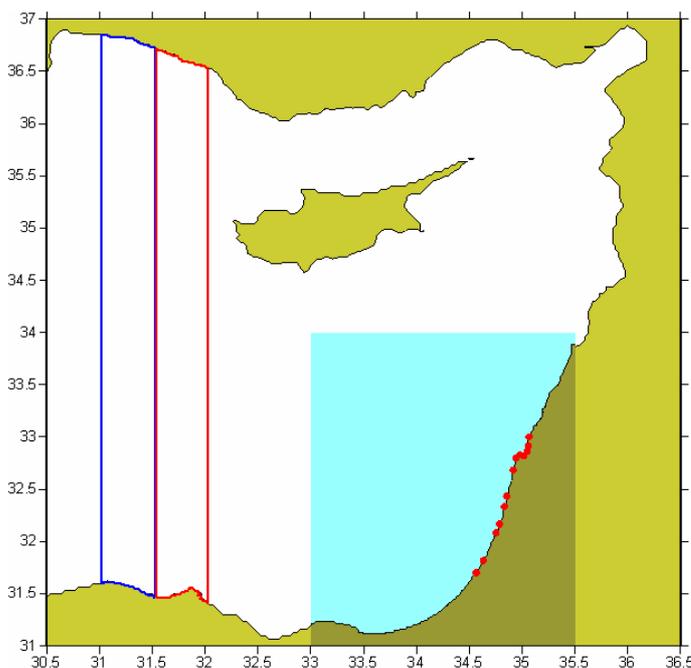


Рисунок 11. Схема расчетной области для проверки метода «заморозки», указано положение начального возвышения, выделена подобласть детального расчета, содержащая, в частности, точки размещения основных береговых мареографов (красные кружочки).

Для сопоставления рассматривались различные моменты «заморозки» – на 150-ом шаге по времени ($t \approx 1880$ секунд) и на 200-ом ($t \approx 2500$ секунд). Соответствующие возвышения свободной поверхности, рассчитанные в выделенной малой подобласти изображены на рисунке (Рисунок 12). Контрольные расчеты были проведены во всей области на грубой и мелкой сетках до момента времени 14400 секунд.

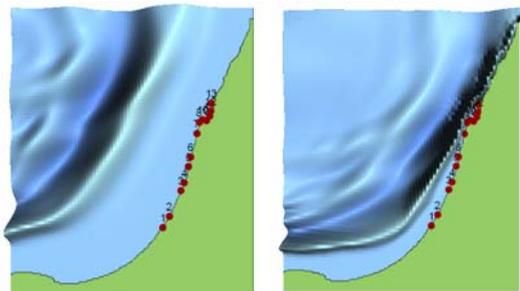


Рисунок 12. Волновые поля, замороженные в малой подобласти на моменты времени $t \approx 1880$ секунд (слева) и $t \approx 2500$ секунд (справа).

На рисунке (Рисунок 13) представлены мареограммы, рассчитанные в ходе решения обсуждаемой здесь тестовой задачи в большой области с использованием 1-но минутной грубой сетки (черная кривая) и 15-ти секундной сетки (красная кривая), а также результаты, полученные с применением метода «заморозки» на 150-ом (синяя кривая) и на 200-ом шаге по времени (зеленая).

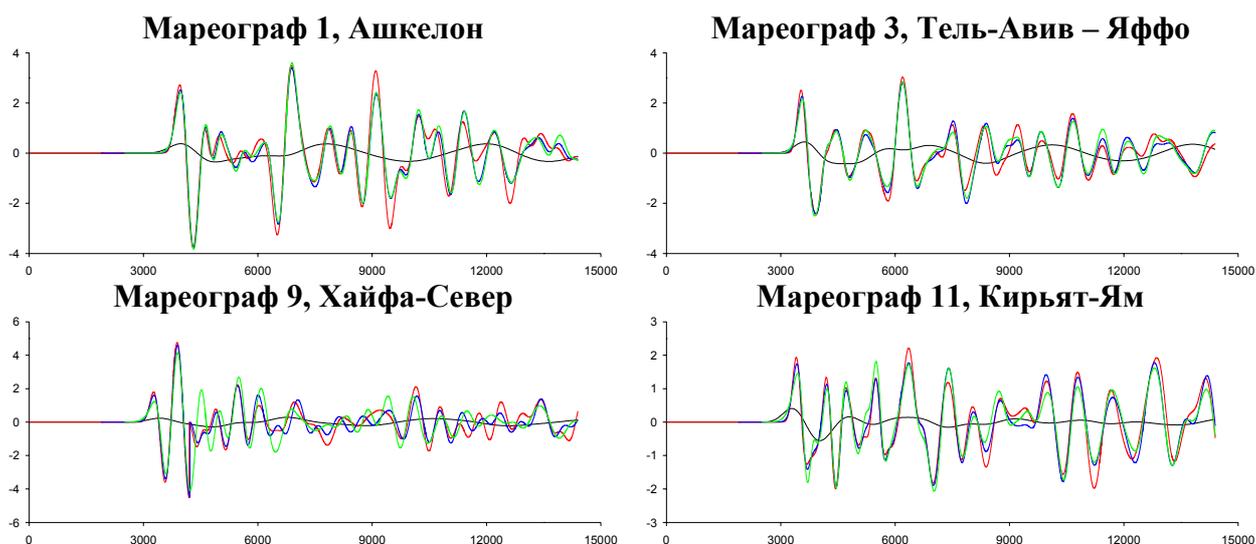


Рисунок 13. Мареограммы для четырех пунктов на побережье Израиля. Расчет в «большой» области: черные кривые – на 1-но минутной сетке, красные – на 15-ти секундной сетке; Расчет в «малой» области методом «заморозки» на 15-ти секундной сетке: синяя кривая – «заморозка» на 150-ом, зеленая – на 200-ом шаге по времени.

Если расчет, выполненный во всей области на детальной сетке (красная кривая), считать «эталонным», то можно утверждать, что на северных мареографных точках (см., например, 11-й мареограф в окрестности г. Кирьят-Ям) более поздняя «заморозка» (зеленая кривая) дает результат несколько хуже, чем ранняя (синяя кривая). Причина этого, судя по всему, состоит в том, что в первом случае «заморозка» произошла в тот момент, когда головная волна пропущена на грубой сетке слишком далеко в мелкую зону и это привело к некоторой потере точности, выразившейся в уменьшении амплитуды волны. В целом, результаты, полученные с применением «заморозки» вне зависимости от выбранного момента времени ее осуществления, оказались намного ближе к «эталонному» решению, чем результаты расчета на грубой сетке, как по амплитудам, так и по частотам.

Таким образом, метод продемонстрировал свою работоспособность и возможность применения в тех случаях, когда параметры расчетной области и требования точности

войдут в трудно разрешимое противоречие с имеющимися вычислительными ресурсами. Альтернативные варианты, связанные с использованием параллельных алгоритмов и нерегулярных сеток, рассматриваются исполнителями вне контекста настоящего проекта.

5. Анализ доступных записей гидрофизических датчиков, сделанных вблизи Яффо в ходе цунами 09 июля 1956 г., вызванного цунамигенным землетрясением в Эгейском море. Результаты сопоставления материалов, полученных в ходе численного моделирования, продемонстрировали хорошее согласование вычисленных и наблюдаемых волновых характеристик. На основе опыта решения содержательных тестовых задач было проведено численное моделирование вероятных сценариев развития волн цунами вблизи Левантийского побережья, порожденных модельными землетрясениями, эпицентры которых размещались в соответствии с известными историческими данными. Моделирование цунами в Средиземном море весьма затруднено, потому как, несмотря на обилие упоминаний об этих явлениях, детальной информации для постановки задач вычислительного эксперимента явно недостаточно. Недавнее цунами в восточном Средиземноморье произошло в 1956 г. Оно было вызвано сильным землетрясением в Эгейском море с магнитудой $M=7.5$. В эпицентральной зоне волны достигали высоты 15 метров, часть малых кораблей была выброшена на сушу, дома затоплены, три человека утонули. По мере удаления от эпицентральной зоны волны быстро затухали. На восточном берегу Крита заплеск достиг 2.5 м, волны небольшой амплитуды были отмечены на побережье Египта. Однако, даже для этого цунами, довольно хорошо документированного, тщательно изученного и представленного данными инструментальных наблюдений, отсутствует непротиворечивая информация о дальности заплеска и глубинах затопления. Имеется единственная запись колебания уровня моря, которые могут быть бесспорно идентифицированы как волны цунами. Именно эта запись и была выбрана для исследований на первом этапе выполнения проекта. На рисунке (Рисунок 14) представлены колебания уровня моря, зафиксированные в период 08 – 09 июля 1956 г. Положение эпицентра землетрясения и точка размещения гидрофизического датчика вблизи Яффо показаны на рисунке (Рисунок 15).

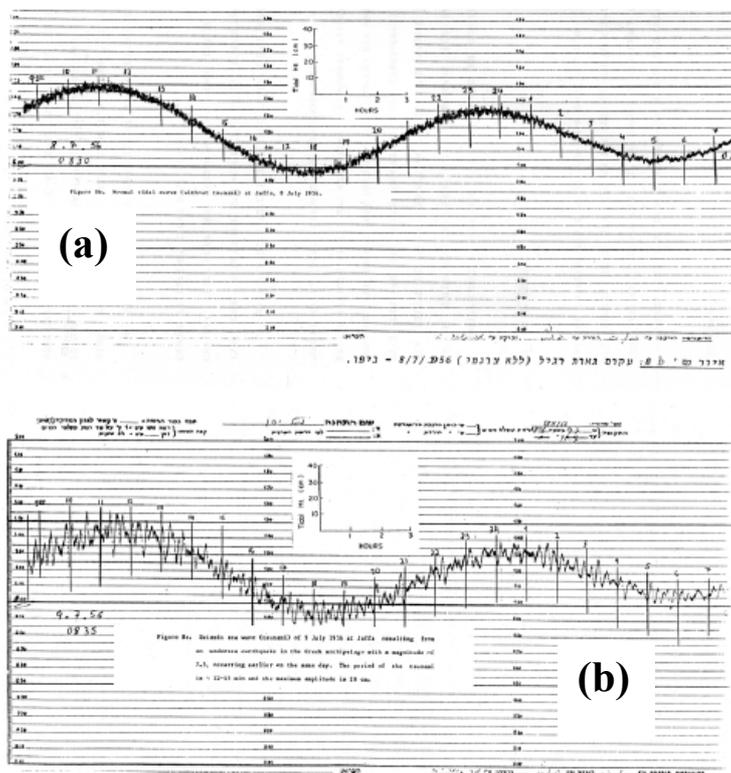


Рисунок 14. Записи колебаний уровня моря: (a) – 08 июля 1956 г., (b) – 09 июля 1956 г. По горизонтальной оси отложено местное время в часах, а по вертикальной – уровень моря в метрах.

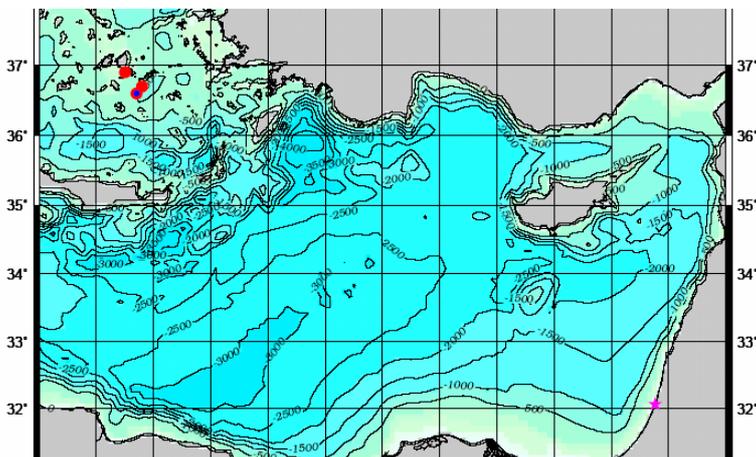


Рисунок 15. Положение эпицентра цунамигенного землетрясения 09 июля 1956 г. и точка размещения гидрофизического датчика вблизи Яффо.

Цунами 09 июля 1956 г. было порождено землетрясением, эпицентр которого был расположен под дном Эгейского моря, Греция. В тот день имели место три основных толчка – в 03:12, 03:24 и 06:23 с максимальной магнитудой 7.5, отмеченной в 03:24. Используя известные корреляционные соотношения, можно определить приближенные значения основных параметров очага: длину L и ширину W в плоскости разлома, а также D_0 – величину подвижки по плоскости разлома.

$$L = 10^{0.5 \times 7.5 - 1.9} = 10^{1.85} = 70.8 \text{ км,}$$

$$W = 10^{0.5 \times 7.5 - 2.2} = 10^{1.55} = 35.5 \text{ км,}$$

$$D_0 = 10^{0.5 \times 7.5 - 3.2} = 10^{0.55} = 3.55 \text{ м.}$$

Как показывают материалы анализа сейсмических характеристик цунамигенного землетрясения, длина очага в плоскости разлома скорее всего была близка к 105 км, а его ориентация определялась азимутом примерно 60° . Величина вертикального смещения оценивается специалистами в 3 м (Рисунок 16).

Главным образом, волны цунами проявились у берегов Греции, острова Аморгос и Эгейских островов. Однако некоторые флуктуации уровня моря были зафиксированы и на гидрофизическом датчике у побережья Яффо.

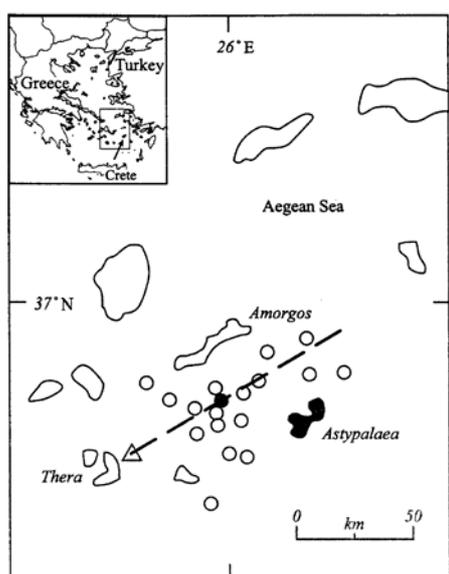


Рисунок 16. Положение эпицентра цунамигенного землетрясения 09 июля 1956 г. (черный кружок). Незаполненные кружочки соответствуют 18-ти афтершокам с магнитудой $M_s > 4.1$. Треугольничком отмечено положение сильнейшего афтершока ($M_s = 7.2$). Штрихованная линия показывает наиболее вероятное положение сейсмического разлома. Стрелочка на врезке указывает на остров Астипалея.

Мареограмма, изображенная на рисунке (Рисунок 14) была оцифрована с шагом 30 секунд. В настоящем исследовании приливная компонента удалялась посредством последовательного применения бегущего [усредняющего фильтра](#). Для сравнения на рисунке (Рисунок 17) приведены оцифрованные записи до и после удаления приливной составляющей.

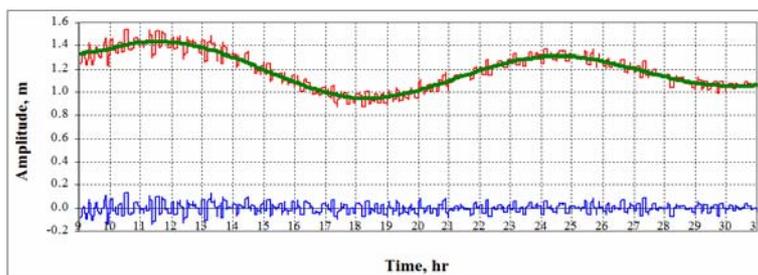


Рисунок 17. Флуктуации уровня моря, записанные гидрофизическим датчиком у берегов Яффо 09.07.56. Красная линия – исходная запись, зеленая – приливные колебания, синяя – колебания, порожденные волной цунами с учетом шельфовых резонансных эффектов.

Максимальная амплитуда была зарегистрирована между 10-ю и 11-ю часами утра. Колебания уровня моря, связываемые с волной цунами достигали высоты 15 см и продолжались около 12 часов, практически без изменения амплитуды. Наблюдаемый период колебаний (Рисунок 18) составил 10 – 15 минут. Однако в записи можно обнаружить колебания уровня моря с периодом 50 – 60 минут, близкие по характеру с уже упоминавшимися ранее осцилляциями, наличие которых может быть обусловлено резонансными эффектами континентального шельфа. Обнаруженные при анализе мареограммы эффекты были использованы авторами для проверки адекватности используемых математических моделей и их возможности воспроизводить характеристики реальных цунами, в том числе – явления шельфового резонанса.

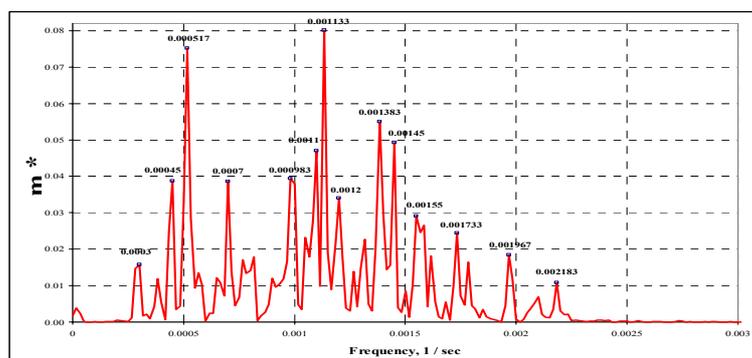


Рисунок 18. Спектральные характеристики записи колебаний уровня моря, записанных гидрофизическим датчиком у берега Яффо 09 июля 1956 г.

6. Проведение предварительных вычислительных экспериментов с целью исследования возможного эффекта шельфового резонанса, с которым некоторые исследователи связывают присутствие в спектре колебаний уровня моря, записанных датчиком у берегов Ашдода, Тель-Авива, Акко, гармоник с периодами 50-60 минут. Спектральные характеристики результатов численного моделирования оказались близки к измеренным. Излагаемые здесь результаты были получены в ходе первой попытки исполнителей проекта выполнить моделирование «Эгейского цунами» 1956 г. В качестве начального возмущения использовалось симметричное смещение поверхности океана «шапочка», размещенное в районе предполагаемого очага реального события. Начальное поле скоростей задавалось нулевым, длина образовавшейся волны цунами в области источника составила примерно 9 – 10 км. Анализ полученных результатов (Таблица 5) показал, что частотные характеристики волн цунами, рассчитанных в «защищаемых пунктах» побережья Израиля вполне соответствуют наблюдаемым значениям, лежащим в интервале от 15 до 70 минут. Заметно некоторое уменьшения периодов при смещении с юга на север.

Таблица 5. Частотные характеристики волн, рассчитанных от модельного начального возвышения.

	Период, мин		
	1-я гармоника	2-я гармоника	3-я гармоника
Ашкелон	68.33	29.17	20.00
Ашдод	61.67	27.77	20.00
Тель-Авив	49.00	23.33	14.17

7. Конструирование сейсмической модели очага цунамигенного землетрясения в Эгейском море (09 июля 1956 г.). Параметры этого очага были выбраны в соответствии с известной магнитудой землетрясения и представлениями о локальной геологической структуре дна Эгейского моря. С использованием построенной модели очага цунамигенного землетрясения были выполнены детальные расчеты порождаемых им волн цунами. Рассчитанная мареограмма в точке сетки, ассоциируемой с защищаемым пунктом Яффо, хорошо согласуется с записью гидрофизического датчика. Анализ результатов этих расчетов привел к выводу о невысокой опасности «эгейских цунами» для защищаемого побережья. Первые попытки моделирования цунами, порожденного начальным возмущением, рассчитанным на основании изложенных выше представлений, были выполнены для расчетной области, простиравшейся от 24 до 36 градусов Восточной долготы и от 30.5 до 38 градусов Северной широты, максимальная глубина акватории достигала 4382 метров (Рисунок 19). Область была покрыта 1 минутной расчетной сеткой, в узлах которой были заданы значения глубин. Как показали предварительные расчеты, использование такой сетки позволяет получить достаточно адекватное качественное описание головной части сигнала, что подтверждается сопоставлением с результатами аналогичного расчета на мелкой 15-ти минутной сетке.

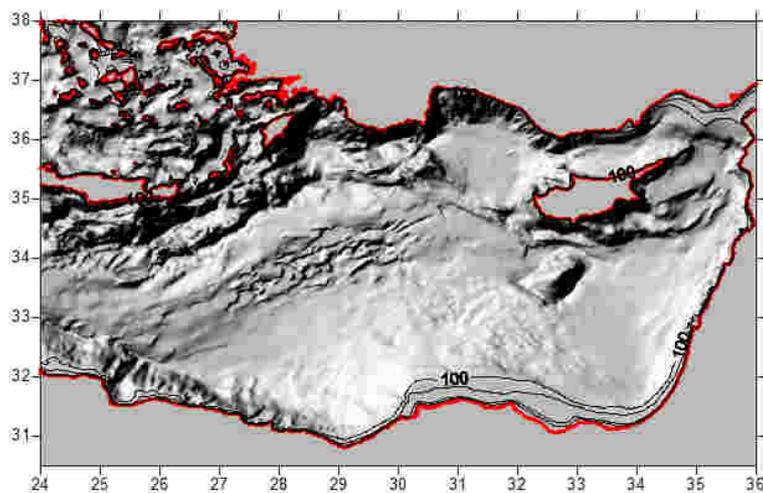


Рисунок 19. Изображение рельефа дна расчетной области предварительного моделирования цунами в Эгейском море. Нулевая изобата выделена красным цветом.

Параметры очага землетрясения приняли следующие значения: магнитуда $M = 7.8$, координаты гипоцентра – 36.7° Северной широты, 25.8° Восточной долготы, длина очаговой области, ее ширина и величина смещения в разломе определялись по упомянутым выше корреляционным соотношениям так, что $L = 100$ км, $W = 50$ км, $D_0 = 5$ м, глубина залегания верхнего края разрыва $h_0 = 20$ км, азимут направления разлома был принят равным 25° , а определяющие углы – $\lambda = 90^\circ$, $\delta = 15^\circ$. Порожденное над таким простейшим очагом возвышение свободной поверхности изображено на рисунке (Рисунок 20).

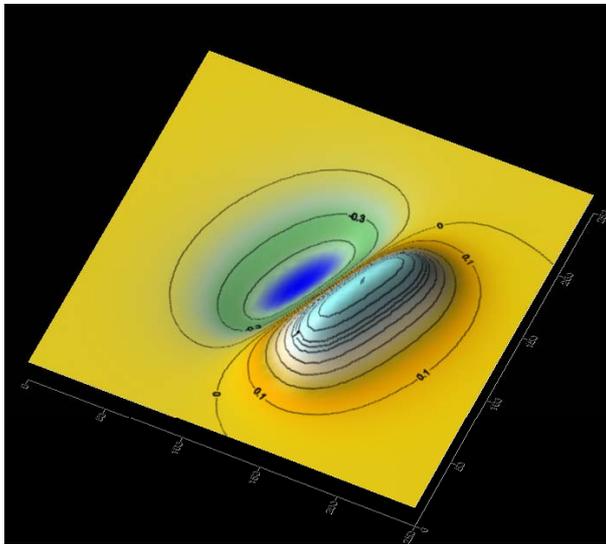


Рисунок 20. Начальное возвышение свободной поверхности от модельного землетрясения с магнитудой 7.8.

Расположение начального источника и точки размещения основных и вспомогательных расчетных мареографов изображены на рисунке (Рисунок 21). Контуры положительного фрагмента источника изображены розовым цветом, а его отрицательной части – голубым. К основным мареографным точкам (i01 – i013) вдоль побережья Израиля были добавлены точки, расположенные по трассе распространения волны от источника (si01 – si05). Аналогичным образом мареографы были расставлены вдоль египетского побережья (e01 – e06) и по трассе к нему (se01 – se05).

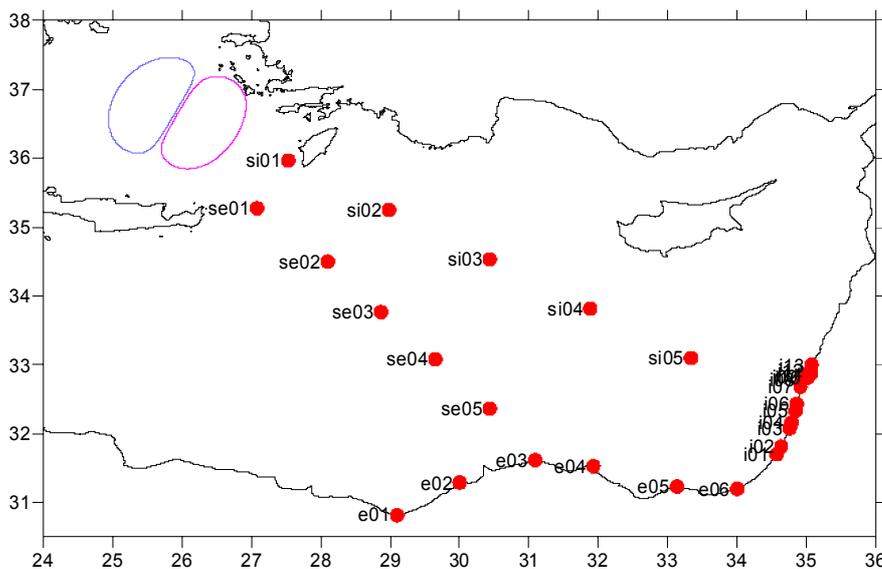


Рисунок 21. Размещение источника начального возвышения и мареографов в задаче о моделировании цунами в Эгейском море от землетрясения с магнитудой 7.8.

Расчитанные мареограммы (Рисунок 22) позволили оценить проявление реального цунами с источником в Эгейском море в береговых «защищаемых» пунктах Средиземноморского побережья Израиля и представили материал для сравнения расчетных материалов с единственной доступной записью гидрофизического датчика, расположенного вблизи Яффо. Несмотря на явную недостаточность сведений о механизме реального цунамигенного землетрясения, совпадение полученных результатов с наблюдаемым представляется вполне удовлетворительным. Высота волны в этом мареографе, как и наблюдаемый между 10-ю и 11-ю часами 09 июля 1956 г. аномальный подъем уровня моря, составила около 15 см. При этом наибольшего значения эта величина достигла вблизи Ашкелона., а затем, по мере продвижения к северу амплитуда волны уменьшается. Почти всюду наибольшей оказывается не первая, а вторая или третья волны.

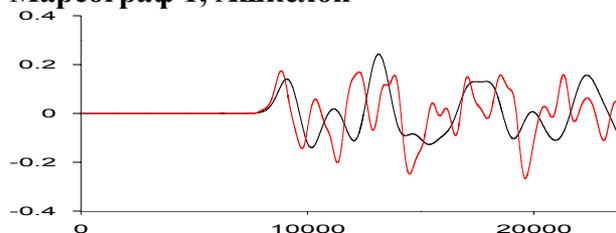
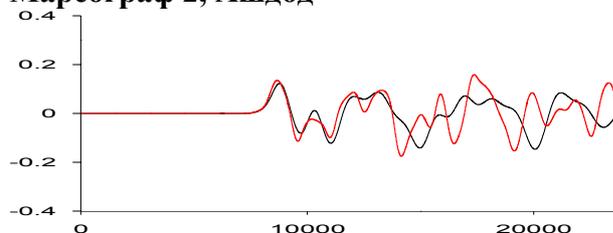
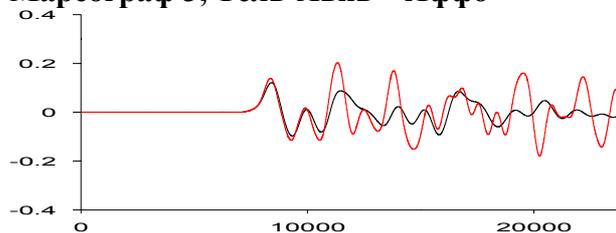
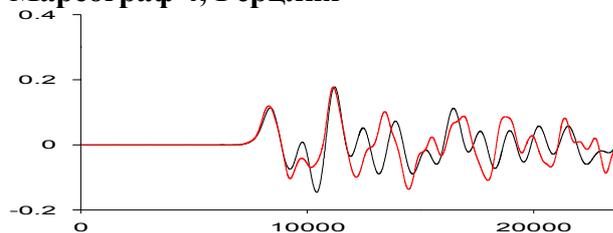
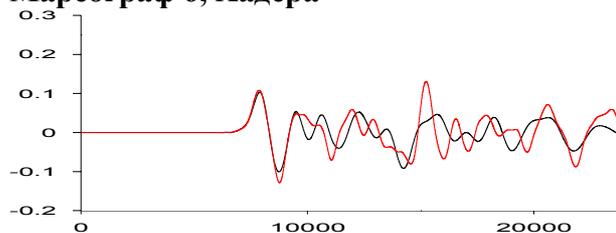
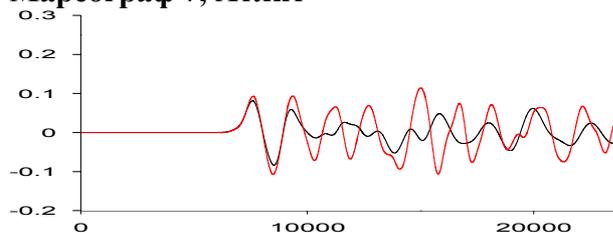
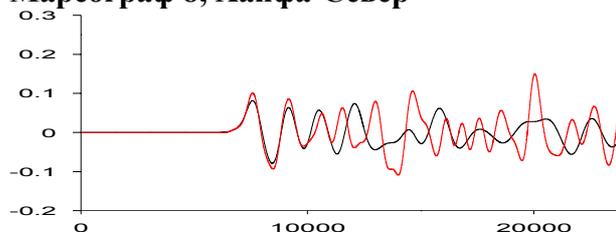
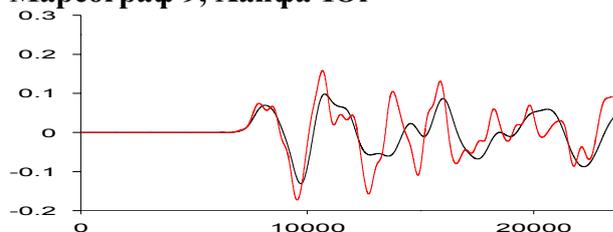
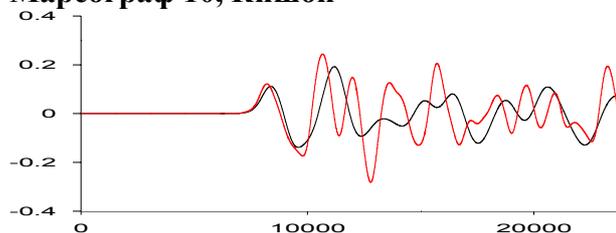
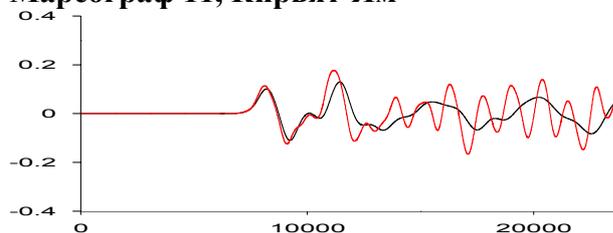
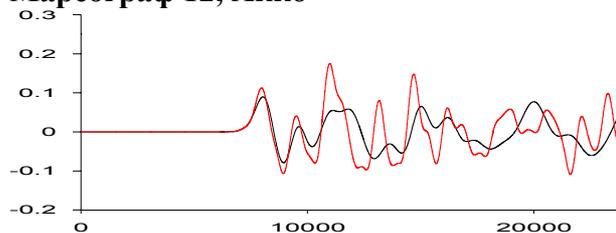
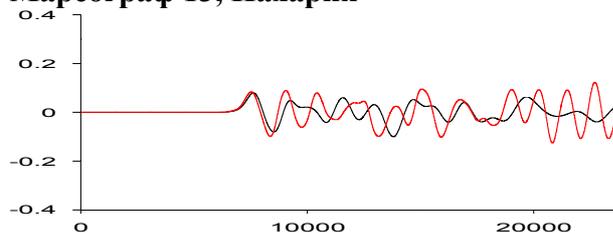
Мареограф 1, Ашкелон**Мареограф 2, Ашдод****Мареограф 3, Тель-Авив – Яффо****Мареограф 4, Герцлия****Мареограф 6, Хадера****Мареограф 7, Атлит****Мареограф 8, Хайфа-Север****Мареограф 9, Хайфа-Юг****Мареограф 10, Кишон****Мареограф 11, Кирьят-Ям****Мареограф 12, Акко****Мареограф 13, Нахария**

Рисунок 22. Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования цунами в Эгейском море для береговых мареографов на побережье Израиля: черные линии – результаты, полученные на 1-но минутной сетке, красные – на 15-ти секундной.

Рассмотрение аналогичных характеристик в мареографах, размещенных вдоль побережья Египта, приводит к выводу о некотором упрощении характера осцилляций. Этот эффект, иногда называемый дисперсией, обусловленной особенностями рельефа, может быть связан с уже упоминавшейся значительной отмелью, прилегающей к Средиземноморскому побережью Египта, и выполняющей некоторым образом фильтрацию высокочастотных гармоник. Экстремальные значения рассчитанных для «египетских» мареографов амплитуд (Рисунок 23) мало отличаются от соответствующих значений для побережья Израиля.

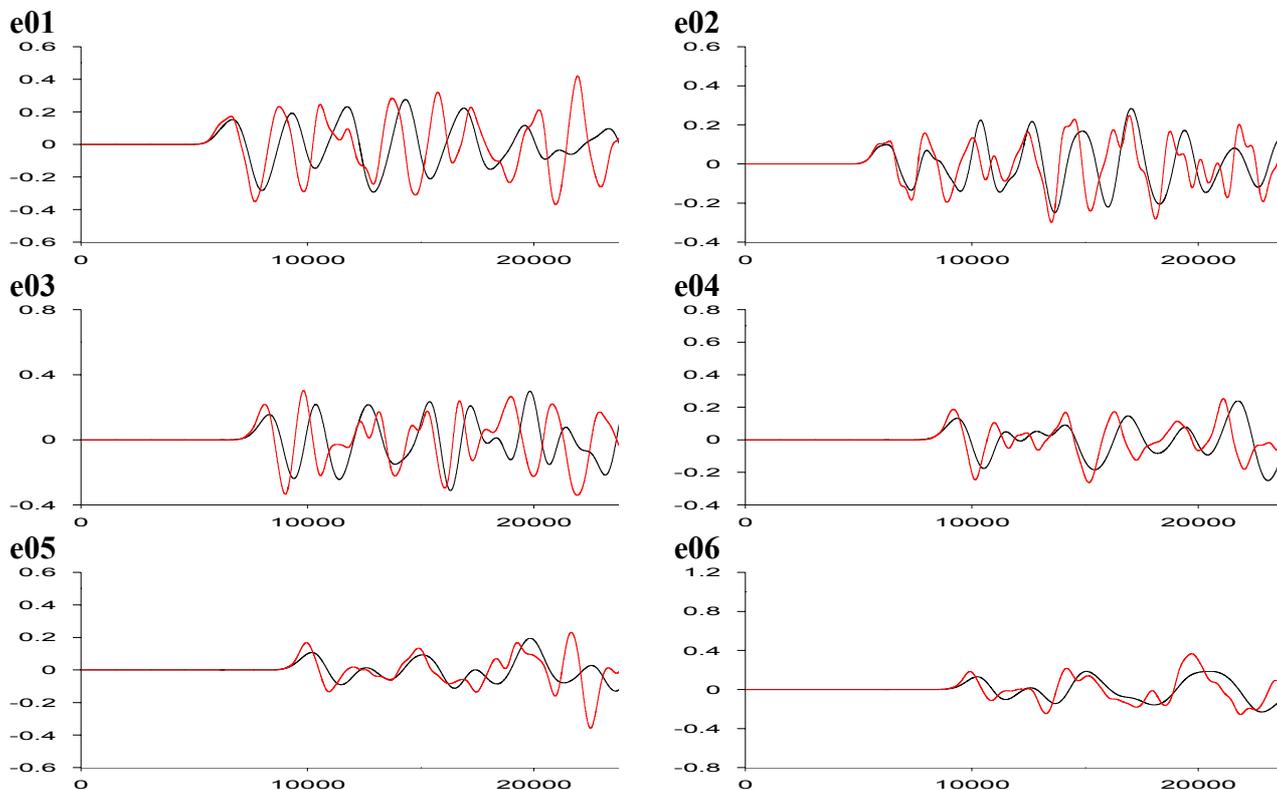


Рисунок 23. Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования цунами в Эгейском море для береговых мареографов на побережье Египта: черные линии – результаты, полученные на 1-но минутной сетке, красные – на 15-ти секундной.

Трансформация волны по мере распространения от источника к берегу иллюстрируется графиками, приведенными на рисунках (Рисунок 24, Рисунок 25). Так, по трассе, направленной к Израилю, амплитуды волн заметно уменьшаются, принимая значения, не превышающих 1 – 5 см в прибрежных точках.

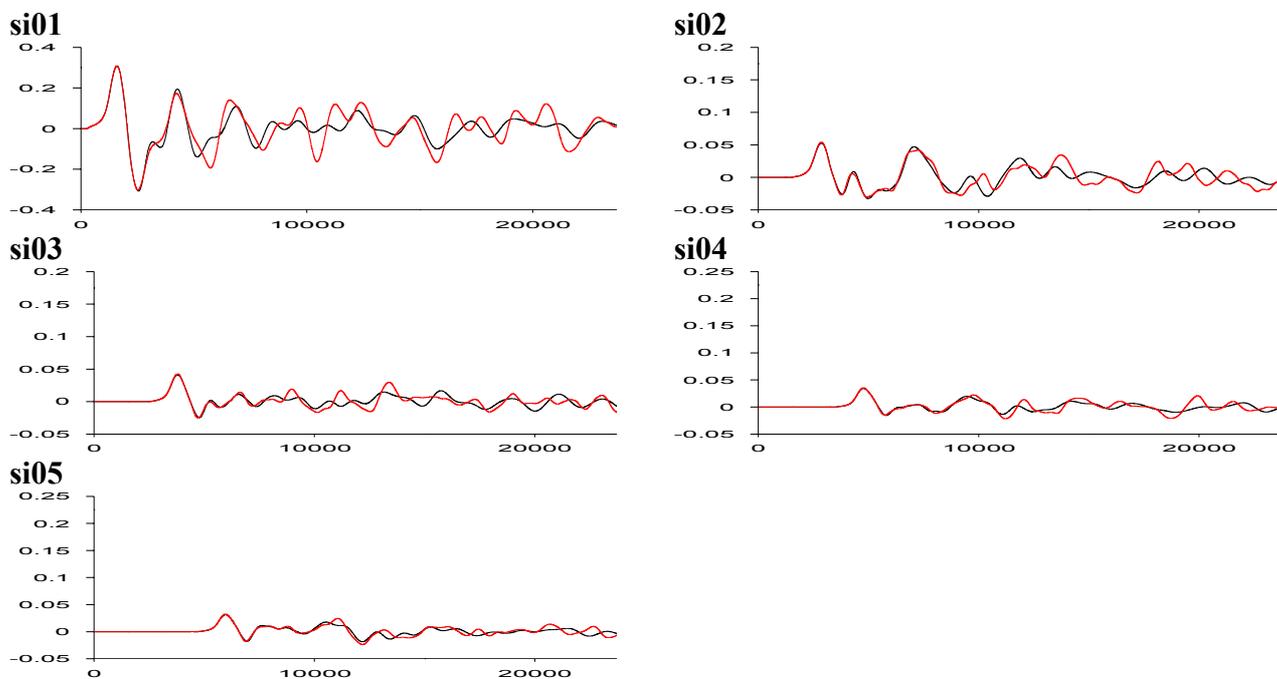


Рисунок 24. Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования цунами в Эгейском море по трассе от источника начального возмущения к побережью Израиля: черные линии – результаты, полученные на 1-но минутной сетке, красные – на 15-ти секундной.

Аналогичная картина наблюдается и по трассе к Египту (Рисунок 25). Представляется, правда, что колебания носят чуть более устойчивый характер, и это проявляется при

сравнении мареограмм в ближайших к берегу точках.

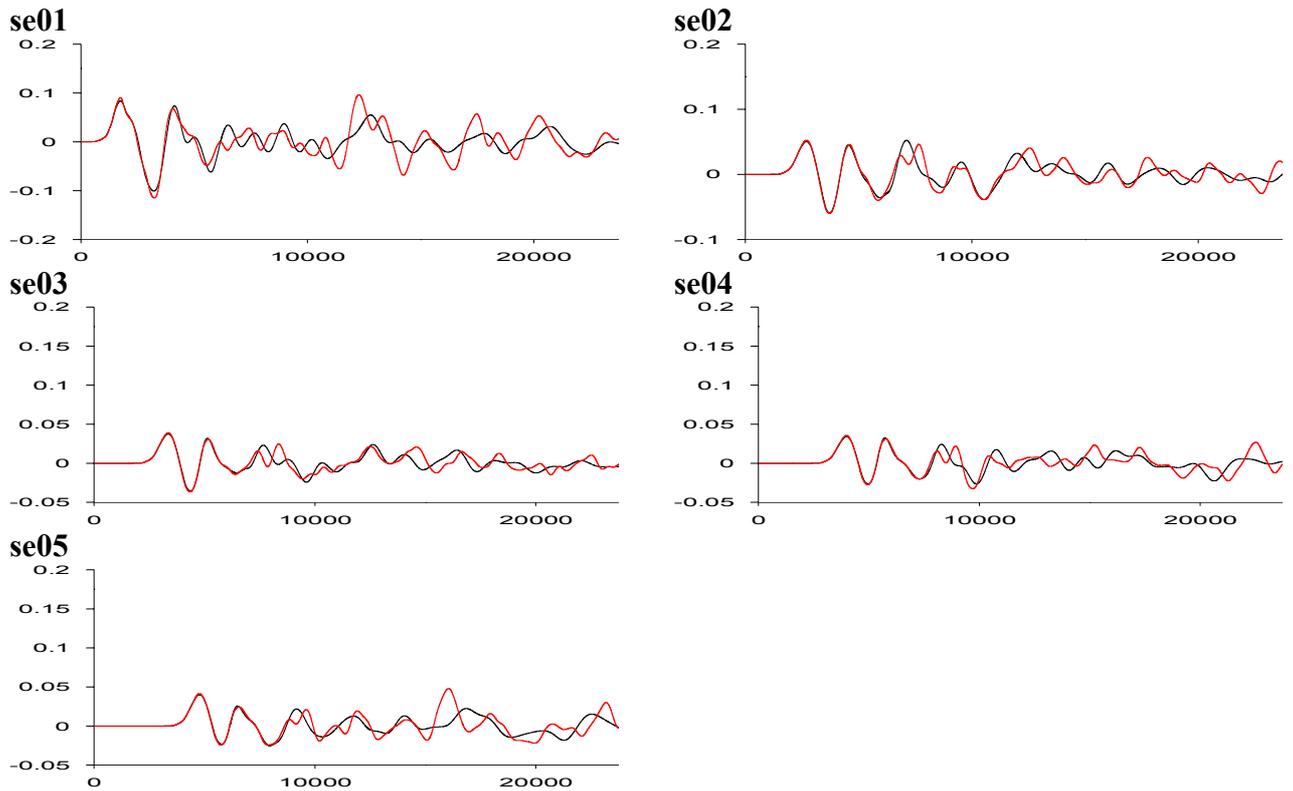


Рисунок 25. Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования цунами в Эгейском море по трассе от источника начального возмущения к побережью Египта черные линии – результаты, полученные на 1-но минутной сетке, красные – на 15-ти секундной.

Полученные в ходе вычислительных экспериментов результаты привели авторов к выводу о малой опасности для побережья Израиля цунами, возникающих в акватории Эгейского моря. Значительная часть волновой энергии практически полностью захватывается системой островов, за пределами которой волна цунами почти не ощущается (см. рисунок 5.29). Дальнейшие исследования были сосредоточены на поиске гипотетических цунамигенных землетрясений в акваториях, примыкающих к острову Кипр.

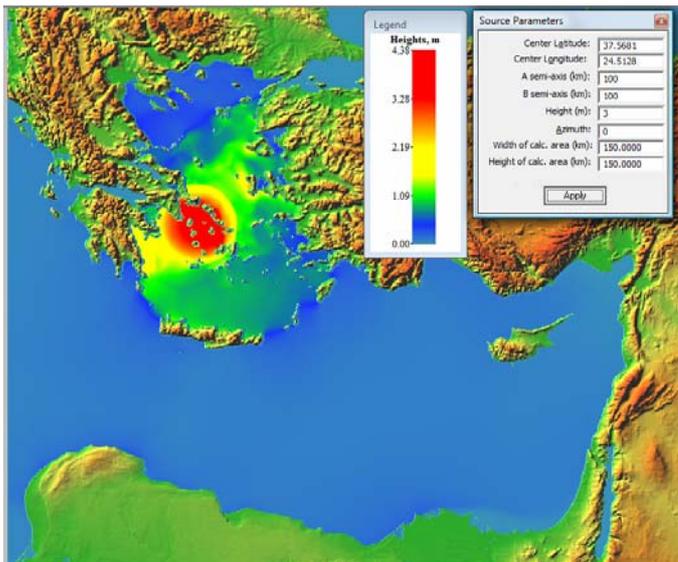


Рисунок 26. Иллюстрация характера распространения волновой энергии от модельного гипотетического очага цунамигенного землетрясения в акватории Эгейского моря.

8. Проведение вычислительных экспериментов с целью оценки вероятных положений «критических» для побережья Израиля очагов цунамигенных землетрясений. Поиск

осуществлялся южнее и восточнее острова Кипр. Для сравнения были выполнены расчеты для гипотетического большого очага на юго-западе от острова. Совокупность модельных расчетов, речь о которых пойдет ниже, отражает логику исследования – от простейших схематических моделей явления к его возможному реальному моделированию. Несмотря на то что в этих расчетах использовались простейшие эллипсоидальные источники начального возвышения, места их расположения были определены в результате многочисленных пробных вычислительных экспериментов, с помощью которых определялись такие «точки привязки» источников в акватории, прилегающей к Левантийскому побережью, которые с одной стороны имели обоснование в имеющихся исторических сведениях о цунамигенных событиях в Средиземном море, а с другой – обеспечивали формирование «значимого» проявления цунами в окрестности изучаемого побережья. Характеристики рассматриваемых источников приведены в таблице (Таблица 6).

Таблица 6. Характеристики начальных эллипсоидальных возмущений, использовавшихся в ходе решения четвертой тестовой задачи.

N	Точка привязки		Полуоси (км)		Высота (м)	Азимут (°N)	Размеры области расчета	
	Широта (°N)	Долгота (°E)	A	B			Ширина (км)	Длина (км)
1	33.6461	32.5881	30	30	1	0	45	45
2	34.6142	33.8661	30	30	3	0	45	45
3	34.3431	33.3758	40	40	3	0	60	60
4	34.5104	32.0833	40	40	3	0	60	60
5	33.9661	31.3717	125	29	3	138	187.5	187.5

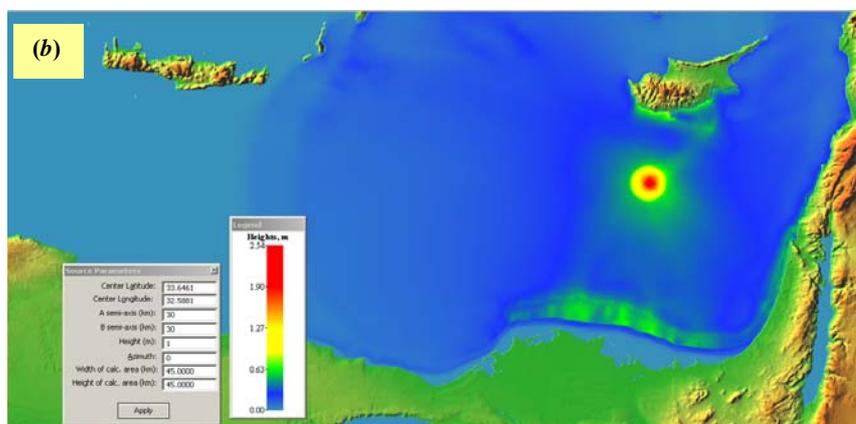
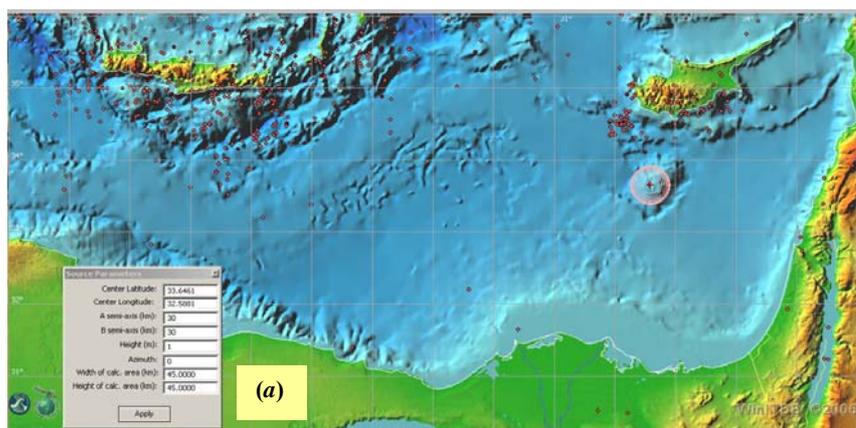


Рисунок 27. (а) – рельеф дна и эпицентры исторических цунамигенных землетрясений, а также положение первого модельного источника; (б) – соответствующая картина свечения цунами.

На рисунках (Рисунок 27 – Рисунок 31) показаны рельефы расчетной области и положения источников начального возвышения (фрагменты – а), а также «свечения» – поля максимальных высот волн, рассчитанных за все время моделирования (фрагменты – б). На фрагментах (а) маленькими красными кружочками отмечены также эпицентры исторических цунамигенных землетрясений. Следует обратить внимание на протяженную мелководную зону у побережья Египта и наличие системы подводных возвышенностей на трассах от Кипра к исследуемому побережью. Именно эти особенности и определяют параметры проходящей над ними волны цунами.

Предварительный анализ показал, что первые два модельных источника – «южный» и «восточный» – приводят к распространению основной части волновой энергии в сторону египетского побережья, где наблюдаются амплитуды от 1.0 до 2-х метров, в то время, как у израильского побережья соответствующие значения равны 0.5 – 1 метру. При использовании третьего и четвертого («юго-восточный» и «юго-западный», соответственно) модельных источников эти величины возрастают до 1.0 – 1.5 метров у побережья Израиля и до 2.0 – 3.0 метров у побережья Египта. Экстремальный гипотетический очаг увеличивает рассчитанные высоты волн, которые в этом случае достигают местами 2.0 – 3.0 метров у израильских берегов и 4.5 метров вблизи Египта.

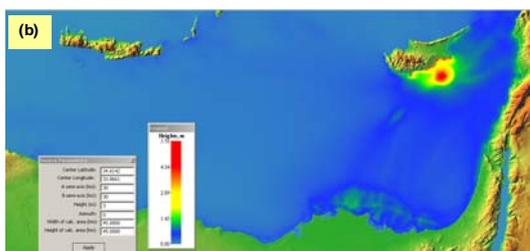
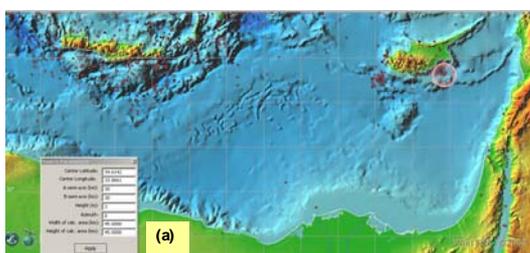


Рисунок 28. (а) – рельеф дна и эпицентры исторических цунамигенных землетрясений, а также положение второго модельного источника; (б) – соответствующая картина свечения цунами.

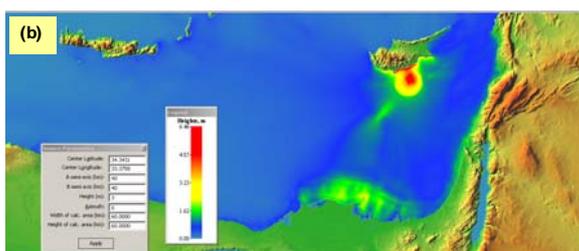
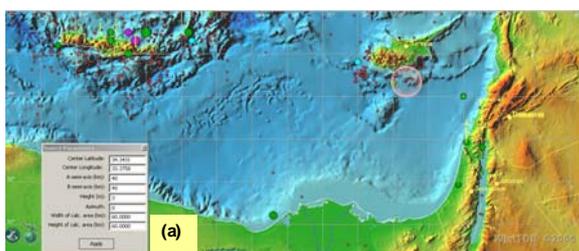


Рисунок 29. (а) – рельеф дна и эпицентры исторических цунамигенных землетрясений, а также положение третьего модельного источника; (б) – соответствующая картина свечения цунами.

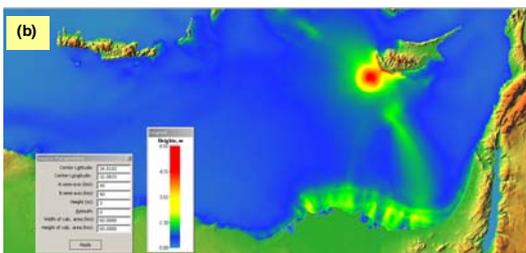
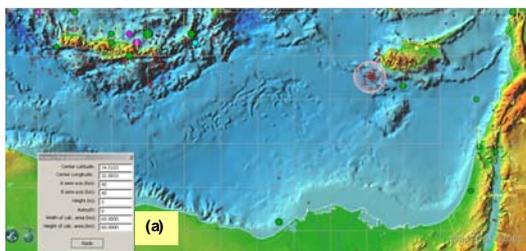


Рисунок 30. (a) – рельеф дна и эпицентры исторических цунамгенных землетрясений, а также положение четвертого источника; (b) – соответствующая картина свечения цунами.

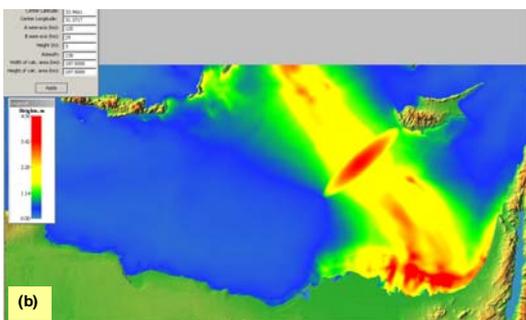
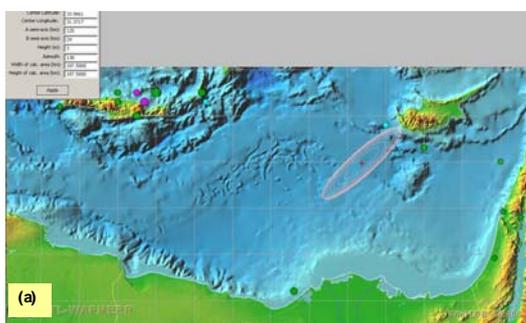


Рисунок 31. (a) – рельеф дна и эпицентры исторических цунамгенных землетрясений, а также положение гипотетического модельного источника; (b) – соответствующая картина свечения цунами.

Результаты последнего раздела представляют собой серьезный задел на заключительный этап работ в части конструирования «критических» очагов цунами и определения экстремальных проявлений волн цунами у берегов восточного Средиземноморья. Столь же важен цикл работ по выбору вероятных постановок задач для исследования оползневой механизма генерации волн цунами у берегов Израиля. Эти исследования также планируются на второй год работ. Здесь будут непосредственно использованы результаты исследований, выполненных российскими исполнителями по планам других проектов, поддерживаемых РФФИ.

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 генерации волн цунами в прибрежной зоне прошли апробацию на крупных международных и национальных научных форумах:

* IV Международная конференция по прикладной математике (г. Пловдив, Болгария, август 2007);

* Научная сессия Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН «Фундаментальные основы информационных технологий и систем» (5 июня 2007 г., г. Москва);

* 3-е Российско-Немецкое Совещание по перспективным исследованиям в вычислительных науках и высокопроизводительных вычислениях (23-27 июля 2007 г., Новосибирск, Россия);

* IX Всероссийская конференция "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф" (17–22 сентября 2007 г., Барнаул);

* IX Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». (26–29 мая 2008 г., Санкт-Петербург).

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. Были усовершенствованы существующие вычислительные алгоритмы, позволяющие осуществлять моделирование трансформации волн цунами с учетом реальной батиметрии дна и топографии берега. 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 блоке моделирования цунами для определения параметров начального возмущения поверхности океана (генерации цунами) наиболее адекватной математической моделью является решение 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. Такой подход к изучению цунами впервые был применен Г.Подъяпольским [Подъяпольский Г.С.

Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли, 1968, №1, С.7-24], был развит В.К.Гусяковым [Гусяков В.К. Взаимосвязь волн цунами с параметрами источника при подводных землетрясениях // Математические проблемы геофизики: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Вычисл. центр. 1974. Выпуск 5, Часть 1. С. 118 – 140], а затем использовался в работах [Yamashita T., Sato R. Generation of tsunami by a fault model // J. Phys. Earth. 1974. V. 22, № 4. P. 415 – 440; Ward S. Relationships of tsunami generation and an earthquake source // J. Phys. Earth. 1980. V. 28, № 5. P. 441 – 474]. 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.

Построенная на основе этих уравнений численная модель обладает набором физических, географических и математических параметров. К физико-географическим параметрам относятся начальные данные (форма начального возмущения свободной поверхности), форма границ (очертания берегов и сооружений) и типы граничных условий, батиметрия, шероховатость донной поверхности и др. Математические параметры возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов. Вычислительный модуль системы реализует алгоритм расчета распространения цунами, основанный на различных модификациях конечно-разностной схемы Мак-Кормака [Елецкий С.В. Программная система моделирования волн цунами NEREUS, опыт разработки: предназначение и реализация // Сборник материалов I (XIX) Международной конференции молодых ученых, посвященной

60-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 15-20 июня 2006г. / отв. ред. О.Н. Лихачева. Южно-Сахалинск. 2007. С. 230 – 236; Федотова З.И. О применении разностной схемы Мак-Кормака для задач длинноволновой гидродинамики // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, часть 2. Специальный выпуск. С. 53 – 63], с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы 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.

3.10. *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*

1. 8

3.10. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2006 г.*

2. 3

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

3

3.12. *Использовалось ли оборудование центров коллективного пользования*

нет

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

0

3.14. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*

450000 руб.

3.15. *Дорогостоящие вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*

Сервер виртуальных машин для проведения вычислительных экспериментов и хранения данных.

Общая стоимость 1286970.

Финансирование в объеме 55000 руб. по соответствующей статье настоящего гранта было использовано для частичной оплаты этого дорогостоящего оборудования.

Спецификация сервера:

HP Proliant DL580G5 E7340 (2.4GHz, 2X4MB) Quad Core 4P,

8GB Performance Mode Wx Intei Quad Core Xeon E7340 (2.4GHz, 2X4MB),

RAM 8Gb в составе: Модуль памяти HP 4GB FBD PC2-5300 2x2GB Kit 14шт.

Дополнительная корзина для модулей памяти HP DL580G5 Memory Expansion Boards Option

Диск HP 146GB Pluggable SAS SFF SP 10K Universal Hard Drive 4шт.

Контроллер для подключения в SAN HP FC1242SR 4Gb PCI-E DC HBA.

Лицензия ПО на 2 процессора VMware ESX Standard 2P Licence with 1-year 9x5 Support and Subscription.

Лицензия ПО на 2 процессора VMware ESX Standard 2P Licence with 1 year 9x5 Support and Subscription. and ProLiant Essentials Virtualisation Management Software Пакет сервиса 1C Env NM 1-Svr 24 x 7 Support.

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

3.17. *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. В.К.Гусяков, З.И.Федотова, Г.С.Хакимзянов, Л.Б.Чубаров, Ю.И.Шокин Некоторые подходы к локальному моделированию наката волн цунами на побережье // Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling (в печати)
10. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., and Gusyakov 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 (в печати)
11. Березин Е.Н., Бейзель С.А. Параллельная реализация алгоритма для расчета генерации длинных поверхностных волн цунами движением оползня // Вычислительные технологии, 2008 (в печати)

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
S.A. Beisel @Бейзель Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.1. *Другие авторы*
L.B. 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)*
Beisel S.A.
Chubarov L.B.
Fedotova Z.I.
Khakimzyanov G.S
- 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. *Полное название издания*
Communications in Applied Analysis
- 9.7. *Вид публикации*
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания* 11
- 9.11. *Страницы*
121-135
- 9.12. *Полное название издательства*
Dynamic Publishers
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
В статье излагаются результаты численного моделирования оползневой механизма 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Leonid B. Chubarov @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.1. *Другие авторы*
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Chubarov L.B.
- 9.4. *Название публикации*
Mathematical modelling in constructing Kamchatka regional tsunami warning systems.
- 9.5. *Язык публикации*
английский
- 9.6. *Полное название издания*
Abstracts of The Fourth International Conference on Applied Mathematics and Computing
- 9.7. *Вид публикации*
тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
13
- 9.11. *Страницы*
76-77
- 9.12. *Полное название издательства*
Technical University
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Шокин Ю.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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)*
Шокин Ю.И.
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. *Полное название издания*
Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций
- 9.7. *Вид публикации*
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
104-113
- 9.12. *Полное название издательства*
Всероссийский институт научной и технической информации
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта* 06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Shokin Yu.I. @Шокин Юрий Иванович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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
Gusyaikov V.K. @Гусьяков Вячеслав Константинович; 2; Россия; Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Shokin Yu.I.
Babailov V.V.
Beisel S.A.
Chubarov L.B.
Eletsky S.V.
Fedotova Z.I.
Gusyaikov V.K.
- 9.4. *Название публикации*
Mathematical modelling in application regional tsunami warning systems operations.
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6. *Полное название издания*
Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12. *Полное название издательства* Springer
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Гусяков В.К.; 2; Россия; Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
- 9.3.1. *Другие авторы*
Федотова З.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Хакимянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Гусяков В.К.
Федотова З.И.
Хакимянов Г.С.
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*
Некоторые подходы к локальному моделированию наката волн цунами на участок побережья.
- 9.5. *Язык публикации*
русский
- 9.6. *Полное название издания*
Вычислительные технологии
- 9.7. *Вид публикации*
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*
принято в печать
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12. *Полное название издательства*
Институт Вычислительных технологий СО РАН
- 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, наследующих 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*
21

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Иинститут вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.1. *Другие авторы*
Ю.И. Шокин; 1; Россия; Иинститут вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Чубаров Л.Б.
Шокин Ю.И.
- 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. *Полное название издания*
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.7. *Вид публикации*
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
5-10
- 9.12. *Полное название издательства*
Наука
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
С.А. Бейзель; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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)*
Бейзель С.А.
Елецкий С.В.
Федотова З.И.
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*
Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях
- 9.5. *Язык публикации*
русский
- 9.6. *Полное название издания*
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.7. *Вид публикации*
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
432-436
- 9.12. *Полное название издательства*
Наука
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
С.В. Елецкий; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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)*
Елецкий С.В.
Майоров Ю.Б.
Максимов В.В.,
Нуднер И.С.
Федотова З.И.
Хакимзянов Г.С.
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*
Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6. *Полное название издания* Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы* 428-432
- 9.12. *Полное название издательства*
Наука
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
В.В. Бабайлов; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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)*
Бабайлов В.В.
Дамбиева Д.Б.
Хакимзянов Г.С.
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*
Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами
- 9.5. *Язык публикации*
русский
- 9.6. *Полное название издания*
Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.7. *Вид публикации*
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
444-447
- 9.12. *Полное название издательства*
Наука
- 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
В.В. Бабайлов; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 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)*
Бабайлов В.В.
Бейзель С.А.
Гусев А.А.
Гусяков В.К.
Елецкий С.В.
Зыскин И.А.
Камаев Д.А.
Федотова З.И.
Чубаров Л.Б.
Шокин Ю.И.
- 9.4. *Название публикации* Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2007
- 9.10. *Том и номер издания* 13
- 9.11. *Страницы* 5-20
- 9.12. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
- 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 начального 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 ГОДА

- 9.1. *Номер проекта*
06-05-72014
- 9.2. *Первый автор*
Березин Е.Н.; 2; Россия; Кемеровский государственный университет
- 9.3.1. *Другие авторы*
Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Березин Е.Н.
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. *Полное название издания*
Вычислительные технологии
- 9.7. *Вид публикации*
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*
принято в печать
- 9.9. *Год публикации*
2007
- 9.10. *Том и номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Работа посвящена численному исследованию оползневого механизма 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 510. ЗАЯВКА НА ВТОРОЙ ГОД ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА (2008 – 2009 гг.).

10.1. *Номер проекта*

06-05-72014

10.2. *Коды классификатора*

05-513 01-201

10.3. *Ключевые слова*

волны цунами, критические очаги, экстремальные волны, оползневый механизм генерации, математическое моделирование

10.4. *Цели очередного годовичного этапа, связь с основной задачей проекта*

В соответствии с планом работ, заявленном в проекте, на втором этапе исследований (2008-2009 гг.) цели исследований фундаментальной задачей проекта, состоящей в получении новых знаний о вероятном воздействии волн цунами на Левантийское побережье и, возможно, на побережье Египта с помощью содержательных вычислительных экспериментов.

Эти соображения приводят к формулировке вполне конкретных целей второго этапа работ:

- * определению влияния специфических особенностей берегового склона и прибрежной зоны Израиля на трансформацию волн цунами в соответствующих акваториях;
- * определению и анализу экстремальных характеристик проявления цунами, порождаемых критическими очагами, расположенными к югу от Кипра;
- * изучению потенциала оползневого механизма генерации волн цунами в прибрежных зонах, характеризующихся высокой вероятностью схода оползней.

10.5. *Ожидаемые в конце второго года выполнения проекта (конец мая 2009 г.) научные результаты*

На момент завершения работ по проекту - в конце мая 2009 г. планируется получить следующие научные результаты.

- Будут определены вероятные зоны расположения "критических" цунамигенных землетрясений в исследуемом регионе на основе анализа достоверной исторической информации и результатов модельных вычислительных экспериментов;
- Будут определены 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 будут определены наиболее вероятные механизмы генерации волн цунами у побережья Израиля.
- Будут определены характерные кинематические характеристики волн цунами в Средиземном море. В частности, будут определены вероятные времена добегания таких волн от зон гипотетических источников к «защищаемым» пунктам на Средиземноморском побережье Израиля.
- Будут предложены 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.
- Будут построены предварительные схемы цунамирайонирования побережья Израиля и оценки прибрежных территорий по степени цунами опасности.
- Будут предложены постановки модельных задач и проведены предварительные вычислительные эксперименты по исследованию оползневого механизма генерации волн цунами у побережья Израиля.

10.6. *Общий объем финансирования на второй год выполнения проекта*

500000

10.7. *Краткое обоснование запрашиваемого объема финансирования*

10.8.1. *Сроки проведения во втором году выполнения проекта экспедиции по тематике проекта*

10.8.2. *Ориентировочная стоимость экспедиции (в руб.)*

10.8.3. *Регион проведения экспедиции*

10.8.4. *Название района проведения экспедиции*

10.9. *Список основных исполнителей проекта на второй год работы (2008 – 2009 гг.), заверенный их личными подписями*

Список основных исполнителей на заключительном этапе работ по проекту в 2008-2009 гг.:

Бейзель Софья Александровна

Елецкий Станислав Викторович

Федотова Зинаида Ивановна

Хакимянов Гаяз Салимович

Чубаров Леонид Борисович

Шокина Нина Юрьевна

Подпись руководителя проекта

Форма 511. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАВЕРШЕННОГО ПРОЕКТА РФФИ В ПРИКЛАДНОЙ ОБЛАСТИ

11.1. Номер проекта

06-05-72014

11.2. Приоритетное направление развития науки и техники, в котором, по мнению исполнителей проекта, можно использовать результаты завершенного проекта РФФИ

7.2

11.3. Планируемая продолжительность работы

до 3 лет

11.4. Предлагаемое авторами название работы в прикладной области

Создание компьютерной системы для оценки последствий воздействия волн цунами на прибрежные населенные пункты Израиля

11.5. Ожидаемые результаты работы в прикладной области

Основным результатом работ может стать создание и пробная эксплуатация информационно-вычислительной системы, предназначенной для оценки последствий воздействия волны цунами на израильский фрагмент побережья Средиземного моря. Система будет ориентирована как на решение конкретных прикладных задач обеспечения цунамибезопасности побережья страны, так и на использование специалистами-экспертами при фундаментальных исследованиях различных аспектов проблемы цунами. Разработанные технологии смогут обеспечить существенный прорыв в решении задач достоверного и своевременного информирования о вероятной катастрофе и ее количественных характеристиках. Они составят конкуренцию аналогичным зарубежным разработкам и смогут быть предложены для совершенствования служб предупреждения других стран бассейна Средиземного моря. В последние годы исследования, выполняемые коллективом исполнителей настоящего проекта, находятся под пристальным вниманием ряда страховых компаний.

11.6. Информация, связанная с интеллектуальной собственностью
патентование не требуется

11.7. Завершенная к настоящему времени стадия работы
результаты проекта РФФИ

Подпись руководителя проекта