

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

27 июня 2008 года

**«Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов  
Сахалинской области и Приморского края»**

**ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ  
на выполнение НИОКР для государственных нужд по  
Федеральной целевой программе**

**"Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций  
природного и техногенного характера  
в Российской Федерации до 2010 года "**

(контракт № 2н-08 от 21 мая 2008 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2008 г

Исполнители:

д.ф.-м.н.

с.н.с., к.ф.-м.н.

инженер-исследователь

инженер-исследователь

инженер-исследователь

В.К.Гусяков

З.И.Федотова

В.В.Бабайлов

С.А.Бейзель

С.В.Елецкий

1. Введение .....	4
2. Краткий обзор поставленной задачи.....	4
3. Модель очага землетрясения. ....	8
4. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской и Японской зон. ....	10
5. Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования. ....	17
Библиография .....	32

## **1. Введение**

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ, согласно календарному плану, посвящен разработке базы данных, включающей модели очагов цунамигенных землетрясений для побережья Сахалинской области и Приморского края, распределенных в соответствии с сейсмотектоническими особенностями цунамигенных зон Тихоокеанского региона.

В отчет также включено описание оригинальной технологии вычислительных экспериментов, предусматривающей возможность проведения детальных расчетов в прибрежной зоне, а также моделирование воздействия удаленных цунами.

## **2. Краткий обзор поставленной задачи**

Исходная задача состоит в создании базы данных с максимальными значениями уровней свободной поверхности воды в заданном наборе защищаемых пунктов, расположенных на побережье Сахалинской области, на некоторых фрагментах побережья Камчатки, на побережье Приморского края и прилегающих островов.

База данных должна быть создана на основе численных расчетов распространения цунами, возникших в результате потенциально опасных цунамигенных землетрясений в исследуемом регионе. В ходе выполнения работ предусматривается выполнение необходимой модификации информационных структур, интерфейсов и вычислительных алгоритмов, созданных в 2007 г. при выполнении контракта 01н-07 от 22 марта 2007 «Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона».

В настоящей работе в качестве модели очага используется практически эквивалентная модель В.К. Гусякова, разработанная им в середине 1970-х годов и успешно зарекомендовавшая себя в многочисленных прикладных и фундаментальных исследованиях. Следует отметить также, что на тестовых задачах различие в результатах этих моделей не выходит за пределы ошибок округления, определяющихся особенностями используемых вычислительных устройств.

Безусловным достоинством модели В.К. Гусякова, определившим упомянутый выше выбор, является непосредственное участие разработчика в проекте, а следовательно, и доступность кодов, гибкость настроек алгоритмов и программы, абсолютное понимание существа дела и следующая из этого надежность принятого подхода.

Все заданные Заказчиком защищаемые пункты разделены на 4 группы, определяющие принадлежность одному из типов географического расположения:

- 1 – пункты, расположенные в Приморье;
- 2 – пункты, входящие в перечень станций Приморского УГМС, участвующих в оповещении при угрозе цунами;
- 3 – пункты, расположенные на побережье о-ва Сахалин и Курильских о-вов;
- 4 – пункты, расположенные на побережье п-ва Камчатка.

В приведенной ниже таблице 1 указаны «исходные» географические координаты защищаемых пунктов, индекс, определяющий их принадлежность одному из типов географического расположения, а также расстояние от центра пункта до ближайшей точки моря. В целом у Исполнителя нет замечаний к точности предоставленных координат, однако некоторые пункты, например, Artem-2, Kavalerovo, Dalnegorsk-2 потребуют соотнесения им ближайшей прибрежной точки. Выбор таких точек будет осуществлен Исполнителем самостоятельно. Впоследствии именно результаты, рассчитанные в этих точках, будут интерпретироваться как результаты моделирования в соответствующих защищаемых пунктах.

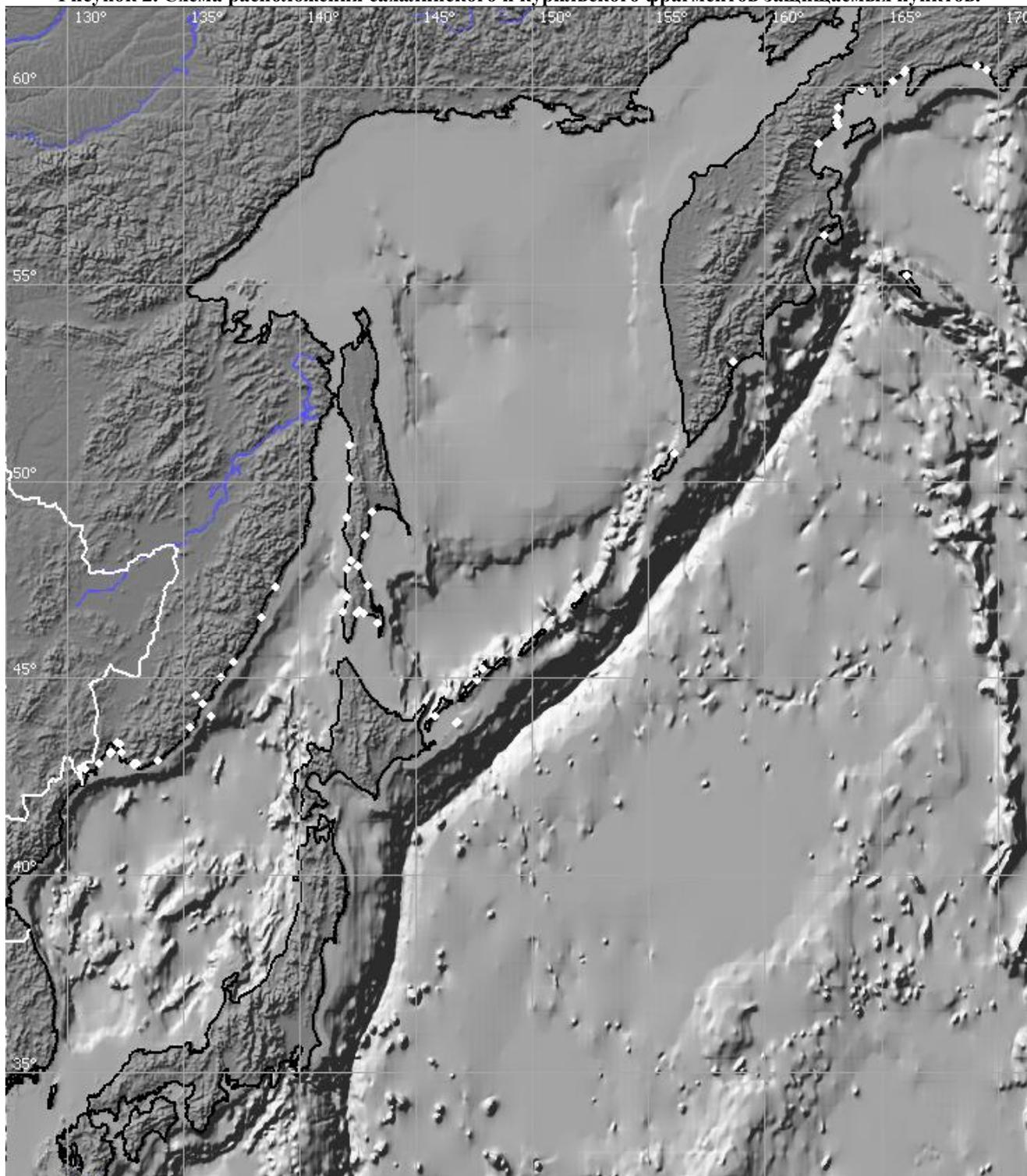
Таблица 1.

	Населенный пункт	индекс	Широта северная	Долгота восточная	Расстояние от центра пункта до ближайшей точки моря (м)
1.	Vladivostok-1 Posiet	2	42.6675	130.7998	
2.	Nakhodka-1	1	42.7897	132.8679	
3.	Nakhodka-2	2	42.8028	132.9094	
4.	Nakhodka-3	1	42.8094	132.9067	
5.	Nakhodka-4	1	42.8111	132.9866	
6.	Nakhodka-5	1	42.8304	132.9893	
7.	Slavyanka	1	42.8333	131.3792	920
8.	Preobrazhenie	2	42.9035	133.9100	850
9.	Tokarev mayak	2	43.0725	131.8431	
10.	Bolsjpi Kamen	1	43.1089	132.3316	990
11.	Vladivostok-2	1	43.1116	131.8972	600
12.	Vladivostok-3	1	43.1171	131.8764	ФГУП и р/ст ПУГМС находятся вблизи этой точки.
13.	Vladivostok-4	2	43.1187	131.8750	
14.	Artem-1	1	43.3122	132.2844	
15.	Artem-2	1	43.3569	132.1856	9860
16.	Olga	1	43.7323	135.2655	2050
17.	Krabovaya	3	43.8306	146.7321	
18.	Malokurilskoe	3	43.8765	146.8180	
19.	Kavalerovo	1	44.0077	136.1669	49170
20.	Yuzhno-Kurilsk	3	44.0314	145.8497	620
21.	Dalnegorsk-1	1	44.3472	135.8329	
22.	Pristan Rudnaya	2	44.3481	135.8264	
23.	Dalnegorsk-2	1	44.5501	135.5544	31990
24.	Burevestnik	3	44.9274	147.6311	550
25.	Terney	1	45.0180	136.6339	2800
26.	Kurilsk	3	45.2279	147.8728	
27.	Malaya Kema	2	45.3943	137.1532	
28.	Novikov	3	46.3706	143.3498	
29.	Sosunovo	2	46.5415	138.3417	
30.	Taranay	3	46.6291	142.4381	1180
31.	Korsakov	3	46.6301	142.7621	
32.	Nevelsk	3	46.6852	141.8587	150
33.	Aniva	3	46.7127	142.5500	
34.	Holmsk	3	47.0554	142.0452	
35.	Zolotoy	2	47.3134	138.9712	240
36.	Starodubskoe	3	47.3473	142.9411	1.340
37.	Tomari	3	47.7669	142.0524	
38.	Vzmorie	3	47.8509	142.5226	1020
39.	Ilinskii	3	47.9871	142.2000	730
40.	Makarov	3	48.6229	142.7889	1280
41.	Ulegorsk-1	3	49.0667	142.0333	
42.	Ulegorsk-2	3	49.0813	142.0365	2790
43.	Poronaysk	3	49.2184	143.1129	
44.	Pilvo	3	50.0433	142.1785	550
45.	Severo-Kurilsk	3	50.6779	156.1415	
46.	Aleksndrov	3	50.9043	142.1460	600
47.	Petropavl.-Kmch	4	53.0147	158.6427	
48.	Nikolskoe	4	55.1986	166.0837	
49.	Ust-Kamchatsk	4	56.2300	162.5365	
50.	Ivashka	4	58.5617	162.3093	700
51.	Kostroma	4	59.0244	163.1728	290
52.	Karaga	4	59.1078	163.1234	
53.	Ossora	4	59.2199	163.0734	670
54.	Tymlat	4	59.4881	163.1784	1510 до устья реки
55.	Iltyrskoe	4	59.9581	164.1788	
56.	Vyvenka	4	60.1704	165.4835	2550
57.	Korf	4	60.3702	166.0205	340
58.	Tilichki	4	60.4195	166.0516	480
59.	Apuka	4	60.4499	169.5680	1070
60.	Pakhachi	4	60.5567	169.1099	270

Расположение защищаемых пунктов представлено также на рисунках 1 – 3.



**Рисунок 2. Схема расположения сахалинского и курильского фрагментов защищаемых пунктов.**



**Рисунок 3. Схема расположения защищаемых пунктов (белые кружочки), перечисленных в Таблице 1.**

### 3. Модель очага землетрясения.

Для изучения процесса возбуждения 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). Такой подход к изучению цунами впервые был применен Подъяпольским [1], затем использовался в работах Гусякова [2], Yamashita, Sato [3], Ward [4]. Comer [5] показал, что в пределах длинноволнового приближения решение такой системы эквивалентно последовательному решению двух отдельных задач:

1. определению статических (остаточных) деформаций поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутреннего источника дислокационного типа (разрыва сплошности среды);
2. вычислению колебаний однородной несжимаемой жидкости в рамках теории мелкой воды при использовании деформаций дна, вычисленных при решении первой задачи, в качестве начальных условий.

Такой 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.

В принятой модели вычисление остаточных смещений дна океана производится для пространственной дислокационной модели очага землетрясения, описываемой следующим набором параметров (рис. 4):

$L$  – длина в плоскости разлома,

$W$  – ширина в плоскости разлома,

$\delta$  – угол падения плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости),

$\lambda$  – направление подвижки в плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома),

$D_0$  – величина подвижки по плоскости разлома,

$h_0$  – глубина верхнего края разрыва.

Создаваемый таким источником сейсмический момент вычисляется по формуле

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W,$$

где  $\mu$  – модуль жесткости среды. Корреляционная формула (Аки [6]) дает связь сейсмического момента с момент-магнитудой  $M_w = (\lg M_0 - 9)/1.5$ .

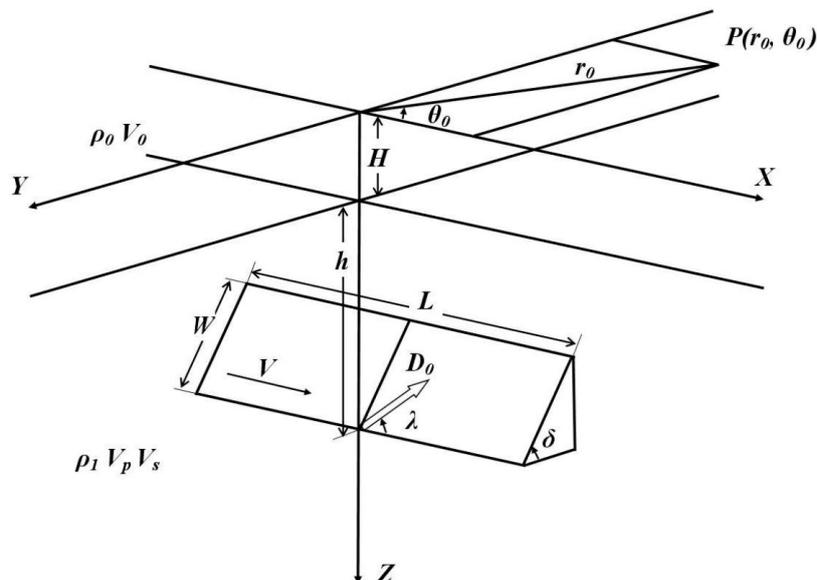


Рисунок 4. Модель пространственного дислокационного очага землетрясения, используемая в расчетах остаточных смещений.

Здесь также использованы следующие обозначения:

$H$  – толщина слоя жидкости (глубина океана);

$h$  – глубина, на которой под дном находится модельный источник, имеющий некоторые свойства реального очага землетрясения;

$\bar{U}(r, \theta, z, t)$  – вектор смещения частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле;

$\rho_0$  – плотность воды;

$V_0$  – скорость звука в воде;

$\rho_1, V_p, V_s$  – плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве, соответственно;

$V$  – скорость распространения разрыва;

$\Theta_0$  – угол, определяющий ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва.

При построении численного алгоритма расчета остаточных смещений использовались расчетные формулы, полученные в работе Гусякова [7]. Сравнение результатов с расчетами по формулам, приведенным в более поздней работе Okada [8], показало, что они совпадают с точностью до различий в реализации численных алгоритмов на разных ЭВМ.

#### 4. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской и Японской зон.

Основную угрозу цунами для побережья Курильских островов несут очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сеймотектонической зоне. Эта зона шириной порядка 150 км протягивается на 2300 км вдоль всего восточного побережья Курильских островов и Камчатки и располагается между внешним краем шельфа и осью глубоководного желоба (см. рис. 5). На севере эта зона примыкает к Алеутско-Аляскинской зоне, подходящей к ней под прямым углом в районе Командорских островов, на юге, в районе южной оконечности Хоккайдо, она плавно (при небольшом угловом несогласии) сочленяется с Японской сейсмоактивной зоной. За время исторических наблюдений (с 1737 года по настоящее время) в этой зоне произошло 89 цунамигенных землетрясений, среди которых были сильнейшие Камчатские землетрясения 1737 и 1952 годов с магнитудами  $M_w$  более 8.5, породившие разрушительные цунами с высотами более 20 метров. В центральной и южной частях Курило-Камчатской зоны землетрясений с таким большими магнитудами не наблюдалось. Сильнейшие цунамигенные землетрясения, происшедшие здесь в 1848, 1918, 1958, 1963, 1969 и 2007 годах, имели магнитуды  $M_w$  в диапазоне 8.1 – 8.4. Максимальные высоты цунами от них на ближайших участках побережья составляли 12 – 15 метров.

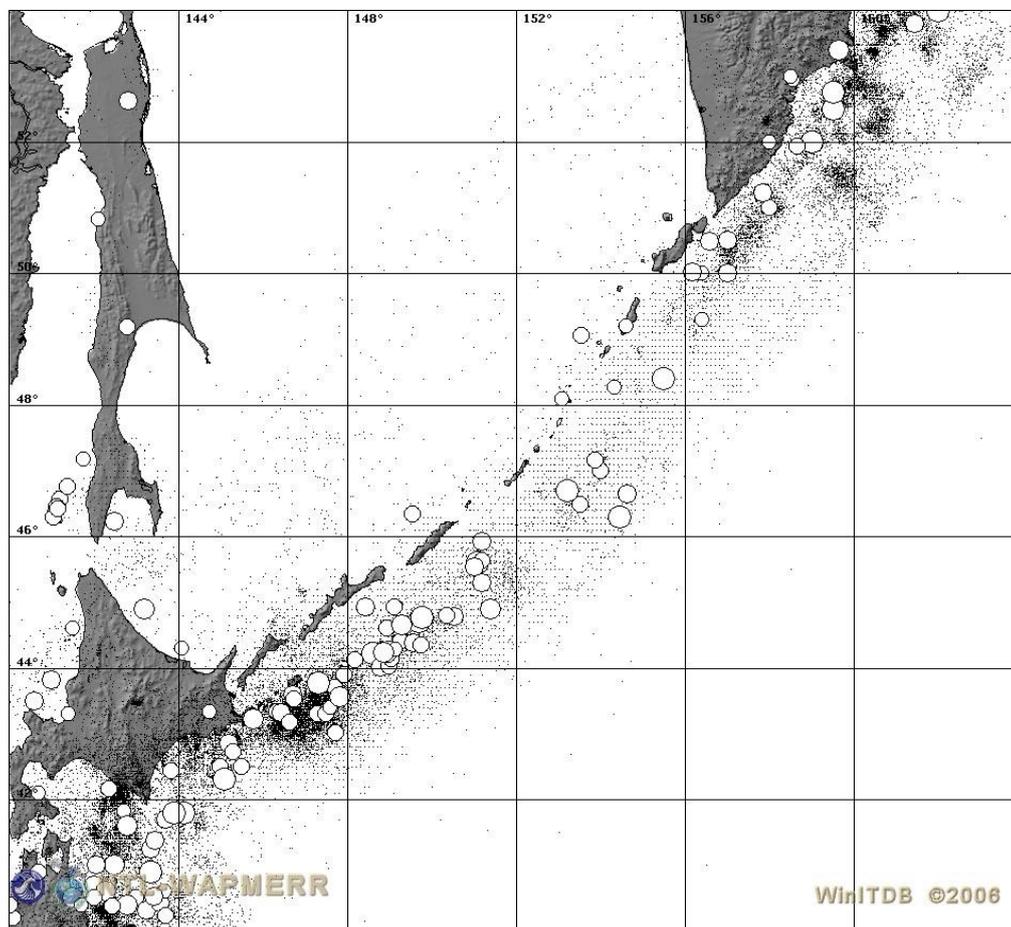


Рисунок 5. Карта сейсмичности и очаги цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской зоны. Точками показаны очаги инструментально определенных исторических землетрясений, происшедших в этом районе с 1900 года по 2007 год. Большими кружками показано положение очагов цунамигенных землетрясений, происшедших с 1737 по 2007 год. Источник данных – WinITDB, 2007 [9].

В соответствии с принятым исполнителями подходом, основная Курило-Камчатская сейсмогенная зона аппроксимировалась системой модельных очагов (рис. 6) **1a – 18d**, механизмы которых выбирались на основе генерализации механизмов исторических цунамигенных землетрясений этого региона.

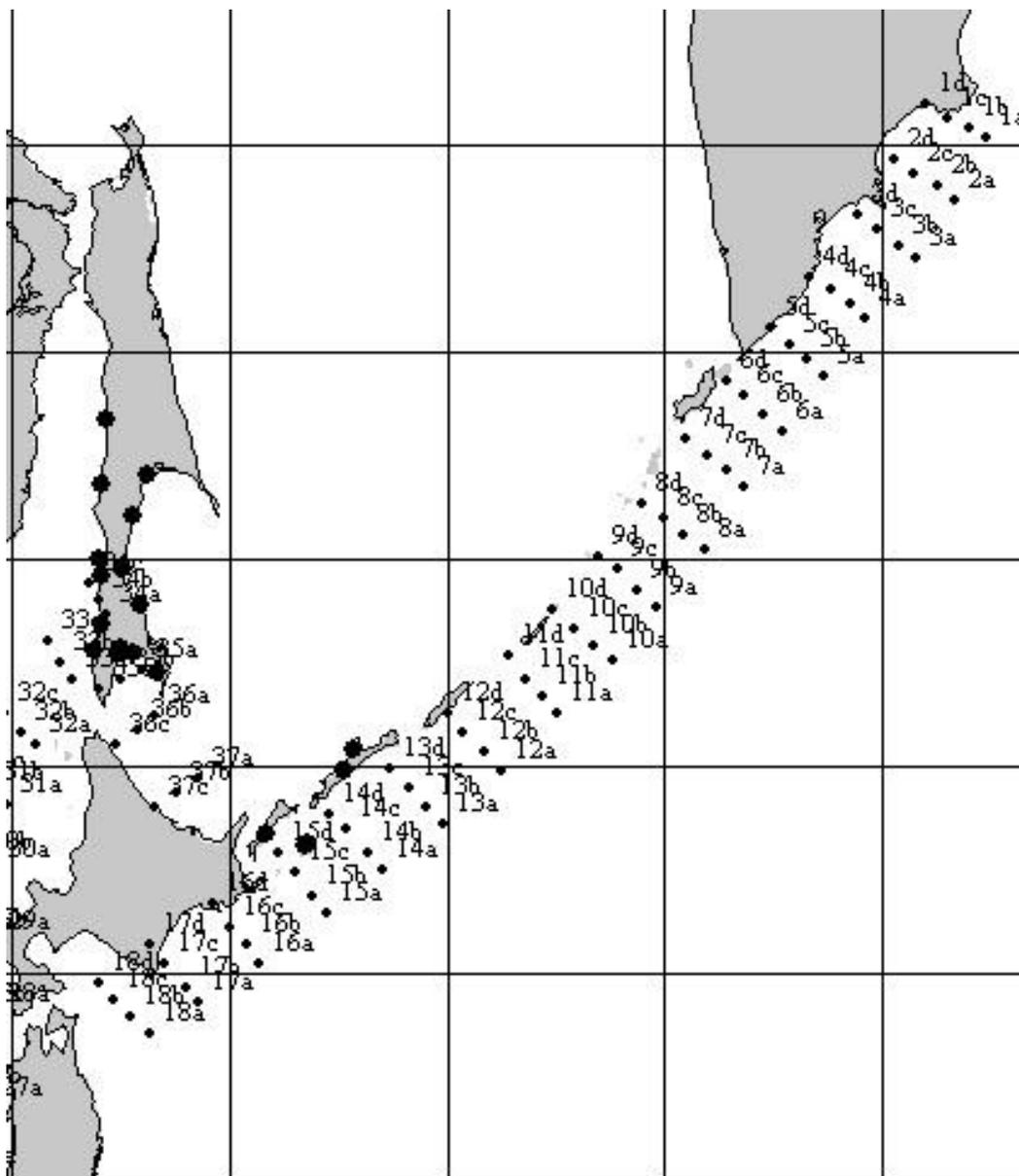
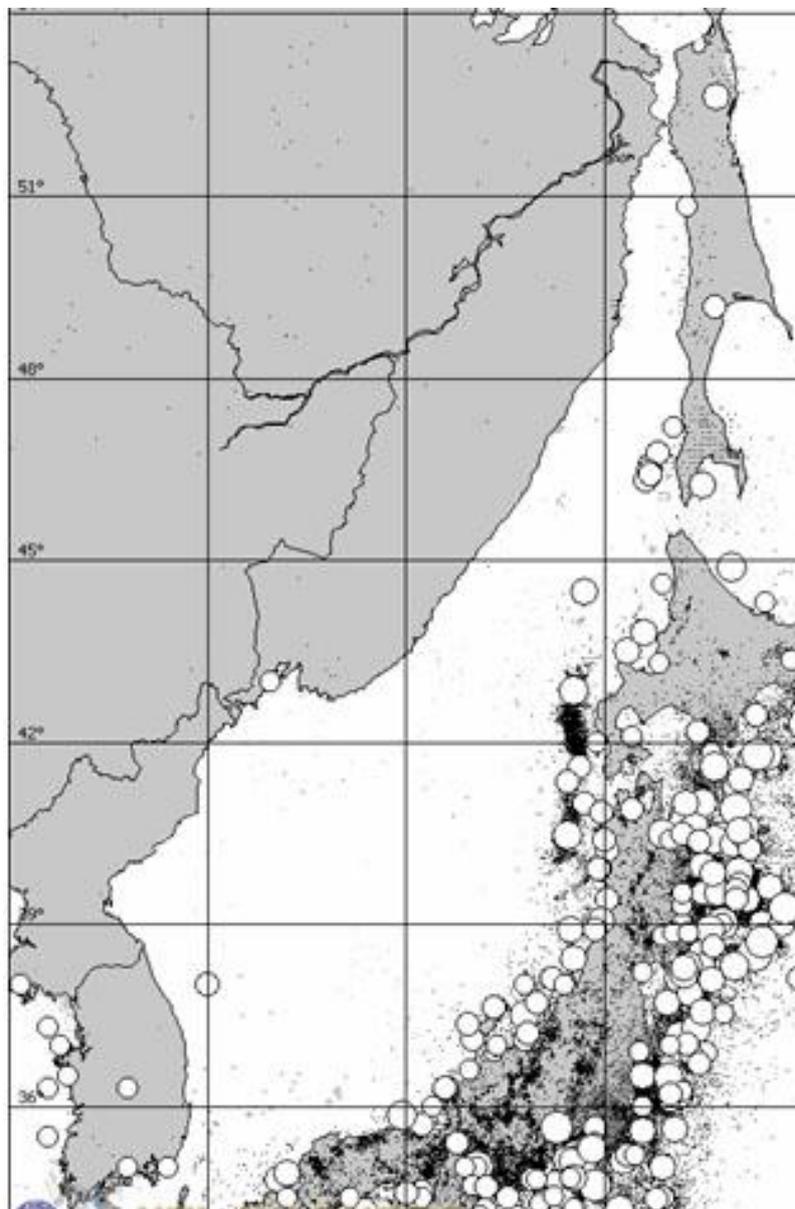


Рисунок 6. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=7.8$  в Курило-Камчатской зоне.

За основу было принято распределение модельных очагов землетрясений с магнитудой  $M_w$ , равной 7.8. Изучение статистики исторических цунами, собранных в базе данных WinITDB [9], показывает, что именно такая магнитуда является пороговой для возбуждения цунами, опасных для восточного побережья Курил и Камчатки. Размеры плоскости разрыва для очагов данной магнитуды были приняты равными  $L = 108$  км,  $W = 38$  км при величине подвижки  $D_0 = 2.74$  м. В качестве основного механизма очагов был принят пологий надвиг по главной литосферной границе раздела этой зоны, т.е. границе между поддвигаемой океанической корой и надвигающимся на нее островодужным выступом континентальной литосферы. Соответственно, углы падения плоскости разлома были приняты равными  $\delta = 15^\circ$ , направление подвижки  $\lambda = 90^\circ$ , что соответствует пологому надвику. Четыре полосы таких модельных очагов, с 18 очагами в каждой полосе, равномерно располагаются в зоне субдукции тихоокеанской океанической плиты под азиатскую континентальную плиту. Глубина верхнего края разрыва каждой следующей полосы закономерно увеличивается (в соответствии с углом падения плоскости разрыва) по мере удаления от оси глубоководного желоба.

Основная угроза цунами для побережья Приморья и Сахалина исходит от мелкофокусных землетрясений, происходящих в восточной части Японского моря, южной части Татарского пролива и, частично, от землетрясений в южной части Охотского моря, происходящих вблизи северного побережья Хоккайдо (рис. 7).



**Рисунок 7. Карта сейсмичности и очаги цунамигенных землетрясений Японской и Сахалинской зон. Точками показаны очаги инструментально определенных исторических землетрясений, происшедших в этом районе с 1900 года по 2007 год. Большими кружками показано положение очагов цунамигенных землетрясений, происшедших с 701 по 2007 год. Источник данных - WinITDB, 2007 [9].**

Очаги в восточной части Японского моря аппроксимировались системой взбросовых подвижек ( $\lambda = 90^\circ$ ) по крутопадающим (в обоих возможных направлениях) плоскостям разрывов ( $\delta = \pm 70^\circ$ ), происходящих вдоль зоны контакта поддвигающихся Тихоокеанской и Филиппинской плит с надвигающейся Азиатской плитой (рис. 8). Размеры плоскостей разрыва для этих землетрясений были приняты такими же, как и для основной системы очагов, располагающихся вдоль глубоководного желоба, т.е.  $L = 108$  км,  $W = 38$  км,  $D_0 = 2.74$  м.

Дополнительно к перечисленным выше очагам были рассмотрены модели более сильных и предельно возможных для южной части Курило-Камчатской зоны землетрясений с магнитудами  $M_w = 8.4$ . Размеры плоскостей разрывов для этих моделей были приняты равными  $L = 215$  км,  $W = 75$  км и  $L = 430$  км,  $W = 150$  км, соответственно. Их механизмы были приняты аналогичными механизмам очагов с магнитудой 7.8, т.е. пологие надвиги, происходящие по основной литосферной границе раздела. В каждом блоке поперек простирания сейсмоактивной зоны располагаются по два таких очага, вдоль простирания на всем протяжении зоны располагается девять блоков. Землетрясений с аналогичными магнитудами в Японской и Сахалинской зонах за время исторических наблюдений не происходило.

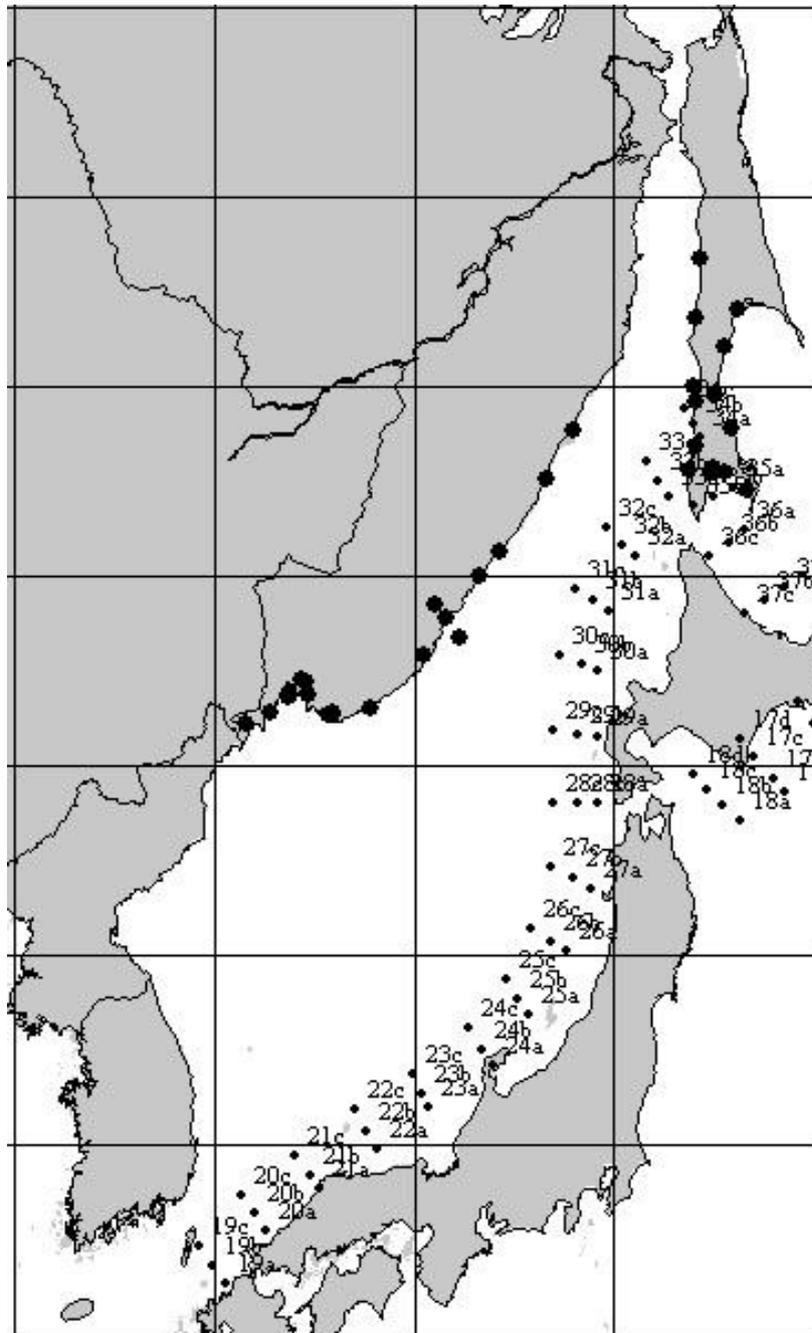


Рисунок 8. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=7.8$  в Японской и Сахалинской зонах.

Параметры очагов модельных землетрясений с магнитудой 7.8 приведены в таблице 2, а расположение их гипоцентров – на рисунке 9.

Таблица 2.

	$\varphi$	$\psi$	$\Delta x$	$\Delta y$	$L$	$W$	$\delta$	$\lambda$	$\Theta$	$D_0$	$h$
<b>1a</b>	54.10	162.40	1850	1850	108	38	15	90	33	3.42	5
<b>1b</b>	54.25	162.00	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	15
<b>1c</b>	54.40	161.50	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	25
<b>1d</b>	54.60	161.00	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	35
<b>2a</b>	53.22	161.64	1850	1850	108	38	15	90	30	3.42	5
<b>2b</b>	53.40	161.25	1850	1850	108	38	15	90	30	2.74	15
<b>2c</b>	53.60	160.70	1850	1850	108	38	15	90	30	2.74	25
<b>2d</b>	53.80	160.25	1850	1850	108	38	15	90	30	2.74	35

<b>3a</b>	52.35	160.75	1850	1850	108	38	15	90	33	3.42	5
<b>3b</b>	52.55	160.40	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	15
<b>3c</b>	52.80	159.90	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	25
<b>3d</b>	53.00	159.45	1850	1850	108	38	15	90	33	2.74	35
<b>4a</b>	51.50	159.60	1850	1850	108	38	15	90	35	3.42	5
<b>4b</b>	51.70	159.25	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	15
<b>4c</b>	51.90	158.80	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	25
<b>4d</b>	52.10	158.30	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	35
<b>5a</b>	50.66	158.66	1850	1850	108	38	15	90	37	3.42	5
<b>5b</b>	50.90	158.25	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	15
<b>5c</b>	51.10	157.90	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	25
<b>5d</b>	51.36	157.45	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	35
<b>6a</b>	49.86	157.71	1850	1850	108	38	15	90	37	3.42	5
<b>6b</b>	50.10	157.28	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	15
<b>6c</b>	50.37	156.80	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	25
<b>6d</b>	50.60	156.45	1850	1850	108	38	15	90	37	2.74	35
<b>7a</b>	49.05	156.80	1850	1850	108	38	15	90	35	3.42	5
<b>7b</b>	49.30	156.40	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	15
<b>7c</b>	49.50	156.00	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	25
<b>7d</b>	49.76	155.50	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	35
<b>8a</b>	48.15	155.90	1850	1850	108	38	15	90	35	3.42	5
<b>8b</b>	48.35	155.45	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	15
<b>8c</b>	48.60	155.00	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	25
<b>8d</b>	48.80	154.50	1850	1850	108	38	15	90	35	2.74	35
<b>9a</b>	47.30	154.80	1850	1850	108	38	15	90	41	3.42	5
<b>9b</b>	47.55	154.38	1850	1850	108	38	15	90	41	2.74	15
<b>9c</b>	47.85	153.90	1850	1850	108	38	15	90	41	2.74	25
<b>9d</b>	48.05	153.45	1850	1850	108	38	15	90	41	2.74	35
<b>10a</b>	46.53	153.80	1850	1850	108	38	15	90	42	3.42	5
<b>10b</b>	46.75	153.35	1850	1850	108	38	15	90	42	2.74	15
<b>10c</b>	47.00	152.90	1850	1850	108	38	15	90	42	2.74	25
<b>10d</b>	47.25	152.40	1850	1850	108	38	15	90	42	2.74	35
<b>11a</b>	45.75	152.50	1850	1850	108	38	15	90	46	3.42	5
<b>11b</b>	46.00	152.20	1850	1850	108	38	15	90	46	2.74	15
<b>11c</b>	46.25	151.80	1850	1850	108	38	15	90	46	2.74	25
<b>11d</b>	46.60	151.40	1850	1850	108	38	15	90	46	2.74	35
<b>12a</b>	44.94	151.26	1850	1850	108	38	15	90	48	3.42	5
<b>12b</b>	45.20	150.85	1850	1850	108	38	15	90	48	2.74	15
<b>12c</b>	45.50	150.35	1850	1850	108	38	15	90	48	2.74	25
<b>12d</b>	45.76	150.00	1850	1850	108	38	15	90	48	2.74	35
<b>13a</b>	44.15	149.90	1850	1850	108	38	15	90	52	3.42	5
<b>13b</b>	44.40	149.50	1850	1850	108	38	15	90	52	2.74	15
<b>13c</b>	44.70	149.10	1850	1850	108	38	15	90	52	2.74	25
<b>13d</b>	44.95	148.70	1850	1850	108	38	15	90	52	2.74	35
<b>14a</b>	43.50	148.50	1850	1850	108	38	15	90	56	3.42	5
<b>14b</b>	43.75	148.20	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	15
<b>14c</b>	44.09	147.69	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	25
<b>14d</b>	44.30	147.30	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	35
<b>15a</b>	42.85	147.25	1850	1850	108	38	15	90	56	3.42	5
<b>15b</b>	43.10	146.90	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	15
<b>15c</b>	43.45	146.50	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	25
<b>15d</b>	43.75	146.10	1850	1850	108	38	15	90	56	2.74	35
<b>16a</b>	42.12	145.68	1850	1850	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>16b</b>	42.40	145.40	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>16c</b>	42.67	145.00	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	25
<b>16d</b>	43.00	144.60	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>17a</b>	41.58	144.29	1850	1850	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>17b</b>	41.80	144.00	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>17c</b>	42.14	143.50	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	25

<b>17d</b>	42.40	143.15	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>18a</b>	41.12	143.15	1850	1850	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>18b</b>	41.36	142.71	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>18c</b>	41.60	142.30	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	25
<b>18d</b>	41.85	142.00	1850	1850	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>19a</b>	33.80	130.30	1850	1850	108	38	70	90	44	2.74	5
<b>19b</b>	34.05	129.93	1850	1850	108	38	90	90	44	2.74	5
<b>19c</b>	34.37	129.63	1850	1850	108	38	110	90	44	2.74	5
<b>20a</b>	34.62	131.27	1850	1850	108	38	70	90	52	2.74	5
<b>20b</b>	34.90	131.00	1850	1850	108	38	90	90	52	2.74	5
<b>20c</b>	35.19	130.68	1850	1850	108	38	110	90	52	2.74	5
<b>21a</b>	35.30	132.65	1850	1850	108	38	70	90	59	2.74	5
<b>21b</b>	35.50	132.40	1850	1850	108	38	90	90	59	2.74	5
<b>21c</b>	35.80	132.04	1850	1850	108	38	110	90	59	2.74	5
<b>22a</b>	35.93	134.05	1850	1850	108	38	70	90	61	2.74	5
<b>22b</b>	36.20	133.80	1850	1850	108	38	90	90	61	2.74	5
<b>22c</b>	36.53	133.52	1850	1850	108	38	110	90	61	2.74	5
<b>23a</b>	36.50	135.40	1850	1850	108	38	70	90	61	2.74	5
<b>23b</b>	36.81	135.18	1850	1850	108	38	90	90	61	2.74	5
<b>23c</b>	37.10	134.95	1850	1850	108	38	110	90	61	2.74	5
<b>24a</b>	37.25	136.95	1850	1850	108	38	70	90	53	2.74	5
<b>24b</b>	37.50	136.70	1850	1850	108	38	90	90	53	2.74	5
<b>24c</b>	37.86	136.38	1850	1850	108	38	110	90	53	2.74	5
<b>25a</b>	38.07	137.99	1850	1850	108	38	70	90	40	2.74	5
<b>25b</b>	38.30	137.60	1850	1850	108	38	90	90	40	2.74	5
<b>25c</b>	38.55	137.17	1850	1850	108	38	110	90	40	2.74	5
<b>26a</b>	38.98	138.77	1850	1850	108	38	70	90	30	2.74	5
<b>26b</b>	39.20	138.40	1850	1850	108	38	90	90	30	2.74	5
<b>26c</b>	39.40	137.90	1850	1850	108	38	110	90	30	2.74	5
<b>27a</b>	40.16	139.58	1850	1850	108	38	70	90	16	2.74	5
<b>27b</b>	40.27	139.01	1850	1850	108	38	90	90	16	2.74	5
<b>27c</b>	40.39	138.42	1850	1850	108	38	110	90	16	2.74	5
<b>28a</b>	41.14	139.59	1850	1850	108	38	70	90	0	2.74	5
<b>28b</b>	41.33	139.05	1850	1850	108	38	90	90	0	2.74	5
<b>28c</b>	41.45	138.35	1850	1850	108	38	110	90	0	2.74	5
<b>29a</b>	42.45	139.58	1850	1850	108	38	70	90	2	2.74	5
<b>29b</b>	42.50	139.10	1850	1850	108	38	90	90	2	2.74	5
<b>29c</b>	42.55	138.50	1850	1850	108	38	110	90	2	2.74	5
<b>30a</b>	43.50	139.73	1850	1850	108	38	70	90	9	2.74	5
<b>30b</b>	43.60	139.20	1850	1850	108	38	90	90	9	2.74	5
<b>30c</b>	43.70	138.53	1850	1850	108	38	110	90	9	2.74	5
<b>31a</b>	44.48	140.05	1850	1850	108	38	70	90	19	2.74	5
<b>31b</b>	44.60	139.50	1850	1850	108	38	90	90	19	2.74	5
<b>31c</b>	44.70	138.90	1850	1850	108	38	110	90	19	2.74	5
<b>32a</b>	45.27	140.61	1850	1850	108	38	70	90	28	2.74	5
<b>32b</b>	45.50	140.20	1850	1850	108	38	90	90	28	2.74	5
<b>32c</b>	45.78	139.58	1850	1850	108	38	110	90	28	2.74	5
<b>33a</b>	46.25	141.37	1850	1850	108	38	70	90	31	2.74	5
<b>33b</b>	46.50	141.10	1850	1850	108	38	90	90	31	2.74	5
<b>33c</b>	46.81	140.80	1850	1850	108	38	110	90	31	2.74	5
<b>34a</b>	47.10	142.20	1850	1850	108	38	70	90	34	2.74	5
<b>34b</b>	47.40	142.00	1850	1850	108	38	90	90	34	2.74	5
<b>34c</b>	47.71	141.72	1850	1850	108	38	110	90	34	2.74	5
<b>35a</b>	46.40	143.00	1850	1850	108	38	70	90	160	2.74	5
<b>35b</b>	46.25	142.50	1850	1850	108	38	90	90	160	2.74	5
<b>35c</b>	46.10	142.00	1850	1850	108	38	110	90	160	2.74	5
<b>36a</b>	45.75	143.30	1850	1850	108	38	70	90	151	2.74	5
<b>36b</b>	45.52	142.88	1850	1850	108	38	90	90	151	2.74	5
<b>36c</b>	45.30	142.40	1850	1850	108	38	110	90	151	2.74	5

<b>37a</b>	44.82	144.30	1850	1850	108	38	70	90	146	2.74	5
<b>37b</b>	44.60	143.80	1850	1850	108	38	90	90	146	2.74	5
<b>37c</b>	44.40	143.30	1850	1850	108	38	110	90	146	2.74	5

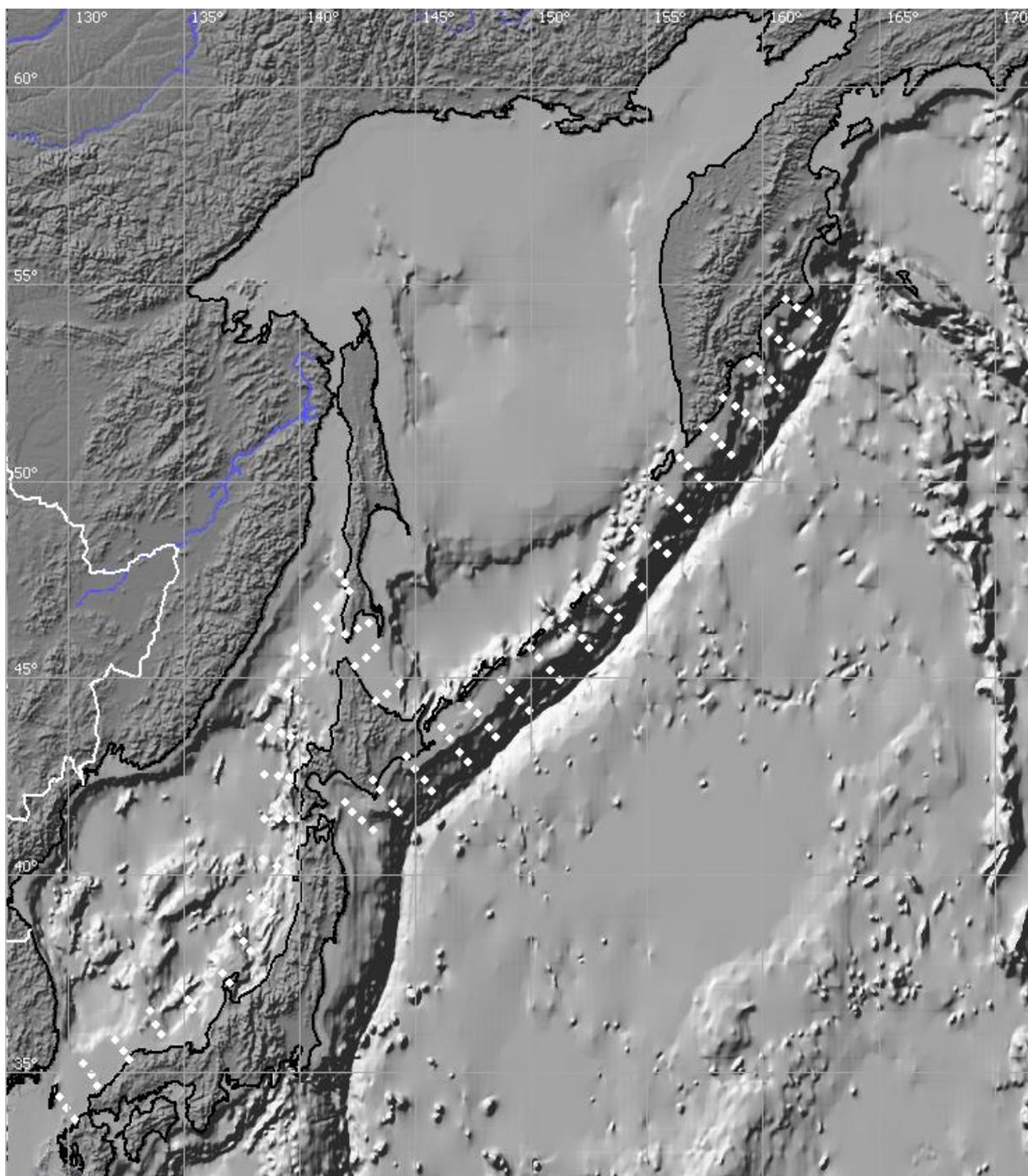


Рисунок 9. Схема расположения гипоцентров очагов модельных землетрясений с  $M_w=7.8$  (белые кружочки), параметры которых указаны в Таблице 2.

## 5. Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования.

Исследования особенностей проявления волн цунами у берегов Камчатки, проведенные исполнителями в 2007 г., потребовали проведения ресурсоемких серийных вычислительных экспериментов. Близкие по характеру работы предусмотрены и техническим заданием настоящего контракта для некоторых участков побережья Камчатки, зоны Приморья, Сахалина и Курильских островов. При этом использовались и будут использоваться численные алгоритмы, основанные на различных модификациях схемы Мак-Кормака, аппроксимирующей линейные и нелинейные модели мелкой воды с учетом донного трения, сферичности Земли и т.п. Исследования расчетных материалов и их сопоставление с известными историческими данными показали, что исходная минутная равномерная сетка не всегда обеспечивает требуемую точность. Так, рассчитанные на грубой сетке в акваториях, содержащих протяженные мелководные зоны и резкие перепады глубин, значения амплитуд волн, порожденных источниками, расположенными на большой глубине, оказываются сильно заниженными в прибрежных мареографах.

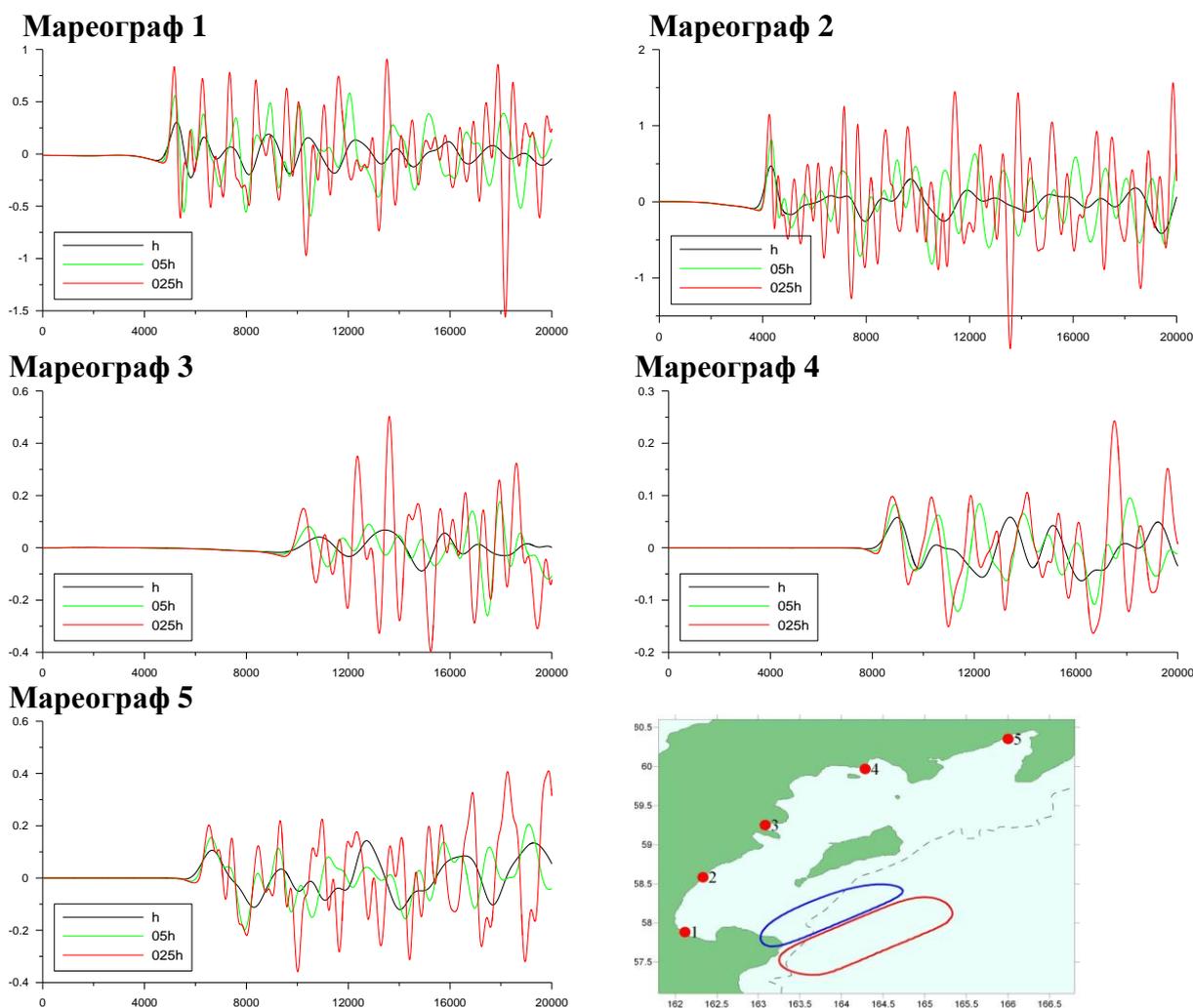
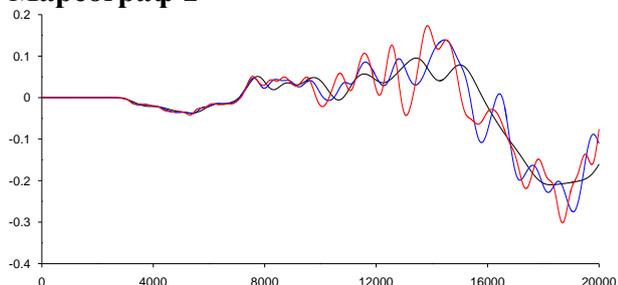


Рисунок 10. Мареограммы, рассчитанные для «глубоководного» источника 25с на различных сетках: 1-но минутной (черные линии), 30-ти секундной (зеленые), 15-ти секундой (красные). По горизонтальной оси отложено время (сек), по вертикальной – смещение уровня свободной поверхности (метры). Внизу справа – схема расчетной области «Карагинский залив», указаны: расположение мареографов (красные кружочки) и контуры «глубоководного» начального возвышения (25с), в котором область понижения уровня (синий контур) направлена в сторону берега. Пунктиром обозначена изобата 200 м. По осям отложены географические координаты в градусах.

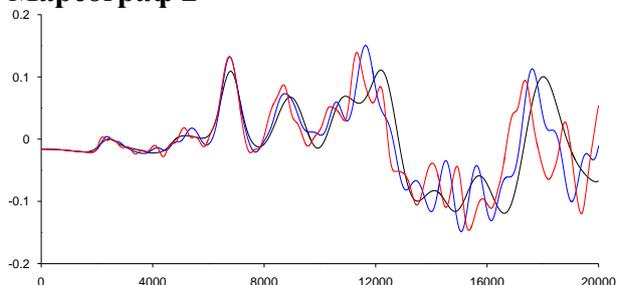
Суть проблемы может быть продемонстрирована на примере задачи, связанной с реальным регионом – частью побережья Камчатки, омываемой Карагинским заливом, рельеф дна которо-

го характеризуется обширным прибрежным мелководьем. Начальное возвышение свободной поверхности было рассчитано от двух сейсмических источников магнитуды 7.8, один из которых (25с, по терминологии контракта 01н-07) находился в глубоководной зоне акватории, другой (24с) – на мелководье. Численный эксперимент был выполнен на трех сетках (самая грубая – минутная, каждая последующая получена путем уменьшения шага сетки вдвое). Изменения уровня свободной поверхности регистрировались на виртуальных мареографах, установленных вдоль берега.

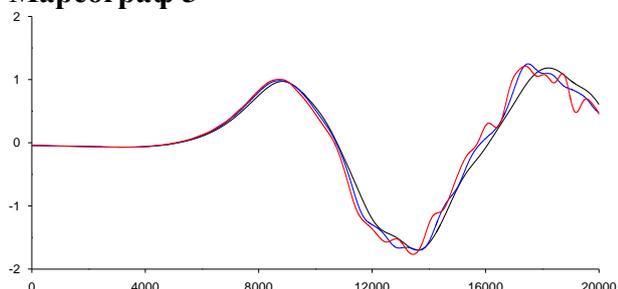
**Мареограф 1**



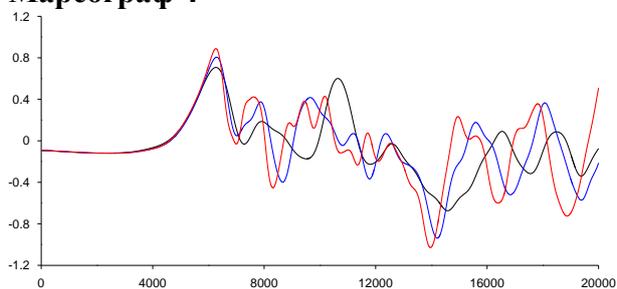
**Мареограф 2**



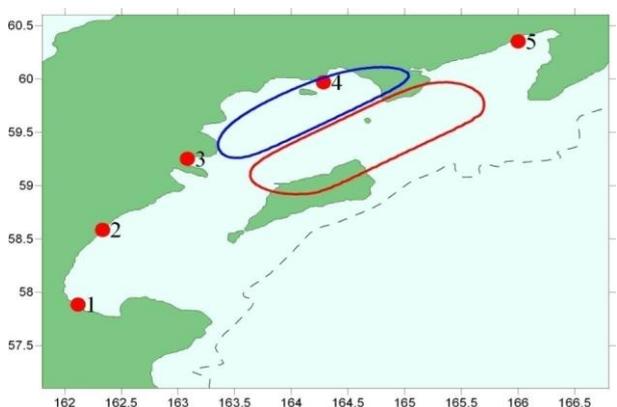
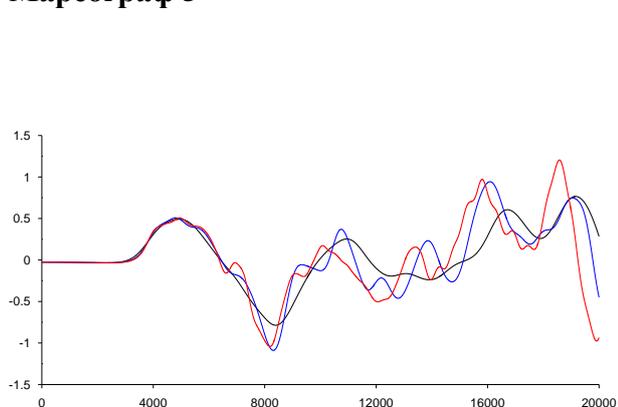
**Мареограф 3**



**Мареограф 4**



**Мареограф 5**



**Рисунок 11.** Мареограммы, рассчитанные для «мелководного» источника 24с на различных сетках: 1-но минутной (черные линии), 30-ти секундной (синие), 15-ти секундой (красные). По горизонтальной оси отложено время (сек), по вертикальной – смещение уровня свободной поверхности (метры). Внизу справа – схема расчетной области «Карагинский залив», указаны: расположение мареографов (красные кружочки) и контуры «мелководного» начального возвышения (24с), в котором область понижения уровня (синий контур) направлена в сторону берега. Пунктиром обозначена изобата 200 м. По осям отложены географические координаты в градусах.

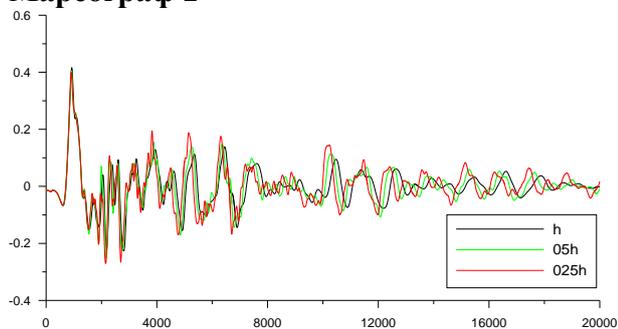
Было обнаружено, что если источник находится на большой глубине, то результаты расчета на грубой сетке трансформации в прибрежной зоне волны, порожденной этим источником, оказываются очень неточными. Соответствующие мареограммы изображены на рисунке 10, где черными линиями изображены результаты, полученные на 1-но минутной сетке ( $h$ ), зелеными – на 30-ти секундной ( $0.5h$ ), красными – на 15-ти секундой ( $0.25h$ ).

Для источников, полностью расположенных в мелководной зоне, или, что то же, для волн, распространяющихся в акваториях с относительно однородным рельефом дна, ситуация карди-

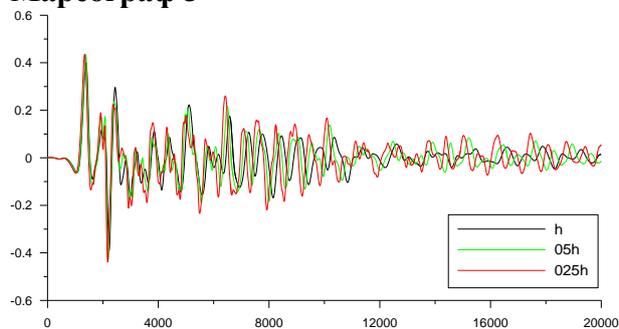
нально изменяется. Этот тезис иллюстрируется результатами расчета для модельного источника **24с**, полностью расположенного на мелководье. Так, мареограммы, рассчитанные в тех же пунктах на различных сетках (рис. 11), находятся в удовлетворительном согласии и не показывают существенной зависимости от шага сетки. Заметим, что максимальные значения в этом случае отмечаются на 3-м и 5-м мареографах, к которым направлена главная ось начального возвышения.

С целью проверки предположения о связи между неоднородностью дна в исследуемой акватории и необходимостью повышения разрешающей способности расчетной сетки были выполнены расчеты в области с дном постоянной глубины при одновременном сохранении контура границ «вода–суша», присущих расчетной области «Карагинский залив». Соответствующие вычислительные эксперименты выполнялись для «глубоководного» источника **25с** с глубинами 10 и 2000 метров. Использование различных значений должно было подтвердить или опровергнуть гипотезу о важности именно неоднородности распределения глубин, а не их абсолютного значения. Результаты этих экспериментов (рис. 12) показали, что в акваториях с постоянной глубиной, независимо от ее значения, различий при расчетах на сетках с разной разрешающей способностью не наблюдается.

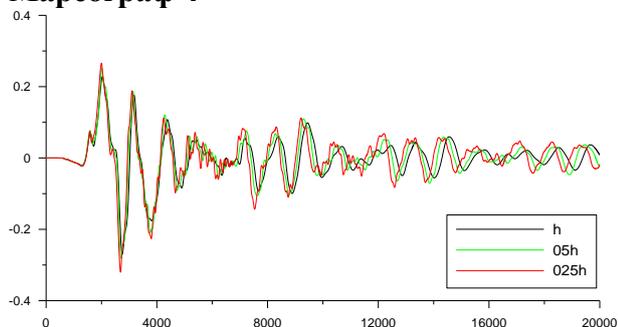
**Мареограф 1**



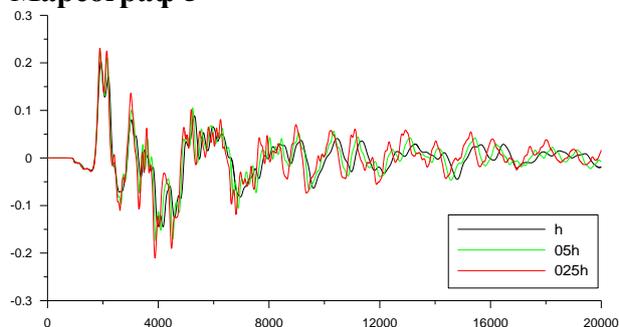
**Мареограф 3**



**Мареограф 4**



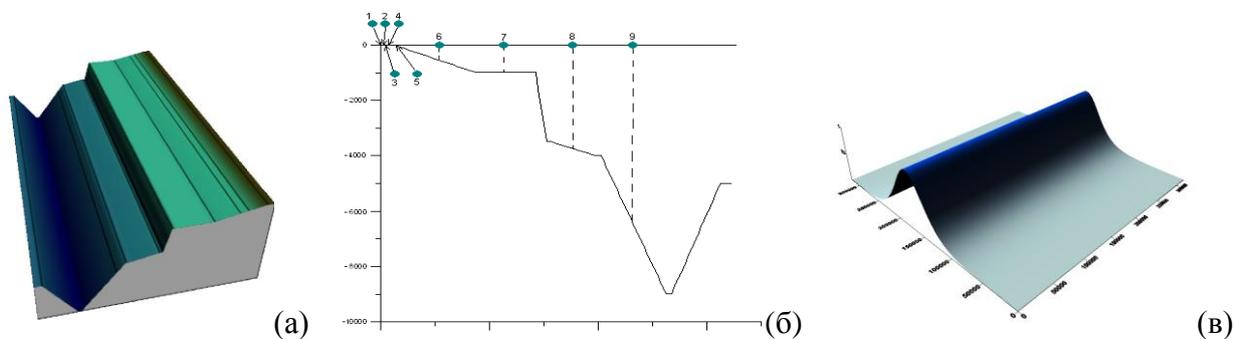
**Мареограф 5**



**Рисунок 12. Мареограммы, рассчитанные для «глубоководного» источника 25с в области с постоянной глубиной (2000 м) на различных сетках: 1-но минутной (черные линии), 30-ти секундной (зеленые), 15-ти секундой (красные). По горизонтальной оси отложено время (сек), по вертикальной – смещение уровня свободной поверхности (метры).**

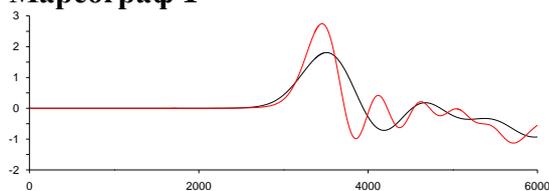
Анализ обсуждаемого здесь эффекта завершается на материалах вычислительных экспериментов, выполненных для простой квазиодномерной задачи о распространении плоской одиночной волны в модельной акватории с кусочно-линейным рельефом дна, неизменным в направлении фронта волны (см. рис 13). Такая модельная расчетная область применялась исполнителями ранее [10] для выявления особенностей трансформации волн над неоднородным дном. Распространяющаяся в такой акватории волна не претерпевает воздействия геометрически сложных границ, однако характеристики ее трансформации определяются неоднородностью рельефа дна, который имитирует особенности рельефа дна в окрестности Курило-Камчатского глубоководного желоба. В соответствии со схемой расстановки виртуальных мареографов первый из них располагался в 1-м узле грубой сетки (у «стенки» –  $y_{M1} = 0$ ), далее, 2-й и 3-й мареографы во 2-ом и 3-ем узлах грубой сетки ( $y_{M2} = 1250$  и  $y_{M3} = 2500$ , соответственно),

4-й – в 5-ом узле грубой сетки на середине ступеньки с глубиной 10 м ( $y_{M4} = 5000$ ), 5-й – в 9-ом узле грубой сетки у конца этой ступеньки ( $y_{M5} = 10000$ ), а 6-й – в середине пологого откоса, ведущего с глубины 10 м до 1000 м ( $y_{M6} = 47500$ ), 7-й – на середине площадки с постоянной глубиной 1000 м ( $y_{M7} = 112500$ ), 8-й – на середине склона, глубина которого изменялась 3500 до 4000 м ( $y_{M8} = 175000$ ), 9-й мареограф также располагался на середине склона, ведущего с 4000 м на максимальную глубину в 9000 м ( $y_{M9} = 230000$ ). на глубину. Размеры области по обоим направлениям одинаковы и равны 320 км.

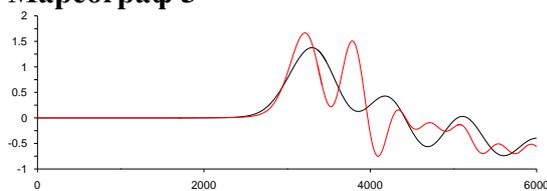


**Рисунок 13. Постановка задачи для модельной акватории: (а) – рельеф дна, (б) – схема расстановки виртуальных мареографов; по вертикальной оси отложены значения глубины акватории; (в) – положение волны в начальный момент.**

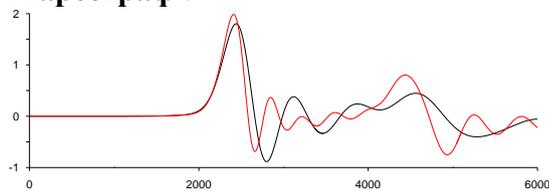
**Мареограф 1**



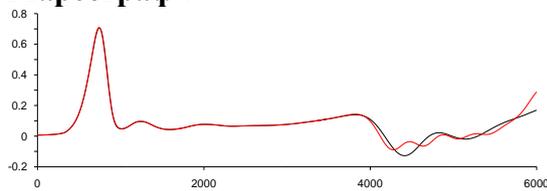
**Мареограф 3**



**Мареограф 5**



**Мареограф 7**



**Рисунок 14. Мареограммы, рассчитанные для первой модельной задачи: черная линия – расчет на грубой сетке, красные – на мелкой.**

Форма начального возмущения задавалась хорошо известной формулой  $\eta = a \cdot \cosh^{-2}(Y)$ ,  $Y = \sqrt{\frac{3a}{4(H+a)}} \frac{(y-y_0)}{H}$ ,  $y_0 = 230000$  м.,  $a = 1$  м.,  $u|_{t=0} = 0$ . На линии берега ( $y=0$ ) и на боковых стенках ставились условия полного отражения; граница  $y = 320000$  являлась свободной. В момент времени  $t=0$  волна распадалась на две, одна из которых уходила в сторону увеличения  $y$  – координаты, а вторая шла в сторону мелководья. Расчеты проводились на двух сетках, первая из которых (грубая) определялась 257-ю разбиениями по каждому направлению, а вторая (мелкая) – 513-ю разбиениями.

Как показывают результаты (рис. 14) вблизи берега мареограммы, рассчитанные на различных сетках различаются как по амплитудам, так и по форме (по частотным характеристикам). При этом использование грубой сетки приводит к снижению амплитуд и упрощению формы волны. С удалением от берега или, что то же, с увеличением глубины, различия уменьшаются так, что в 7 мареографе они сохраняются только в хвостовой части волны. Таким образом, результаты вычислительных экспериментов, выполненных как для модельных, так и для

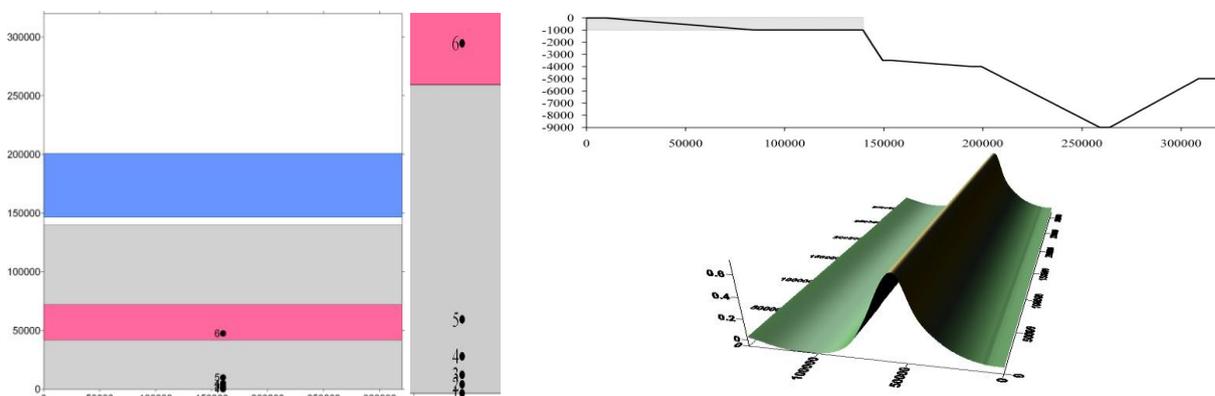
реальных акваторий, указывают на необходимость использования сеток с высокой разрешающей способностью, обеспечивающих достаточную точность расчета волновых характеристик в прибрежных зонах.

Обеспечение необходимой точности расчета в таких ситуациях может быть достигнуто различными способами. За пределами обсуждения этой работы остаются применение неравномерных сеток и/или алгоритмов повышенного порядка аппроксимации, так как практическая реализация этих методик для реальных задач неминуемо приводит к серьезным технологическим проблемам. Поиски приемлемого решения естественным образом приводят к идее использования детальной сетки. Равномерное измельчение сетки во всей расчетной области значительно повышает ресурсоемкость расчета и зачастую является излишним. Альтернативой здесь может быть использование локального сгущения сетки в окрестности защищаемых пунктов. На этом пути можно предложить несколько технологических приемов организации расчета.

Один из них будем далее называть «перехват», а другой – «заморозка». Оба метода предназначены для выполнения расчета в области  $\omega$ , содержащей пункты, требующие повышенной точности результатов, с использованием мелкой сетки с шагом  $h_1$ , обеспечивающей такую точность, и результатов, полученных в большой области  $\Omega \supset \omega$  на грубой сетке с шагом  $h$ . При этом расчет на грубой сетке используется для введения волны в малую область либо через ее границу («перехват»), либо в качестве начальных данных («заморозка»).

Алгоритм первого метода («перехват») выглядит следующим образом:

1. выделение в исходной области  $\Omega$  малой подобласти  $\omega$ , представляющей особый исследовательский интерес и содержащей совокупность защищаемых пунктов или часть этой совокупности;
2. расчет в области  $\Omega$  на грубой сетке с шагом  $h$  с записью мареограмм по периметру  $\partial\omega$  области  $\omega$ ;
3. пересчет (интерполяция) значений мареограмм по периметру  $\partial\omega$  с шагом  $h_1$ ;
4. расчет волнового режима в области  $\omega$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге алгоритма значений на  $\partial\omega$  в качестве краевых условий.



5. Рисунок 15. Схема первой тестовой задачи: слева – начальное положение одиночной волны (контур зашит синим цветом), возвышение свободной поверхности в момент «заморозки» (розовый цвет) и расположение мареографов, серым цветом выделена область «заморозки»; справа – схема рельефа дна и положение волны в момент «заморозки».

Алгоритм второго метода («заморозка») также требует пересчета (интерполяции) вычисленных на грубой сетке волновых полей на мелкую. Последовательность операций здесь достаточно проста:

1. выбор подобласти  $\omega$  и момента времени  $t_z$  на основе анализа результатов предварительных расчетов;
2. расчет в области  $\Omega$  на грубой сетке с шагом  $h$  до момента времени  $t_z$  с сохранением всех рассчитанных волновых полей (высоты волн, скорости) в узлах сетки, принадлежащих части области  $\Omega$ , выделенной в качестве подобласти  $\omega$ ;
3. пересчет (интерполяция) значений сохраненных волновых полей в области  $\omega$  на мелкую сетку с шагом  $h_1$ ;

4. расчет в области  $\omega$  на мелкой сетке с шагом  $h_1$  до финального времени  $t_f$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге волновых полей в качестве начальных данных на момент времени  $t_z$ .

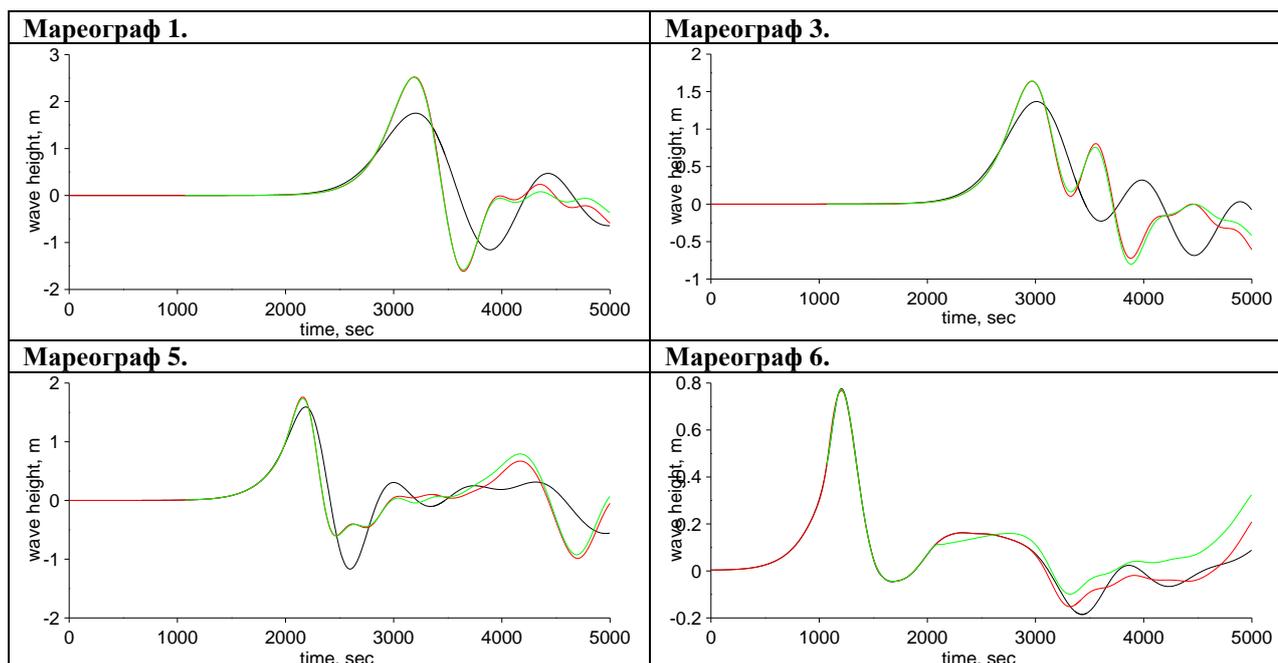


Рисунок 16. Мареограммы, рассчитанные в ходе решения первой модельной задачи. Черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках соответственно во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой».

Иллюстрация возможностей указанных методик будет начата с задач о трансформации волн в уже упомянутой выше модельной акватории. Первая задача, на которой тестировалась технология «заморозки», – это задача о распространении одиночной волны, параметры которой совпадали с указанными выше. Гребень волны в начальный момент находился над точкой с координатой 175000 м по направлению  $OY$  (рис. 15).

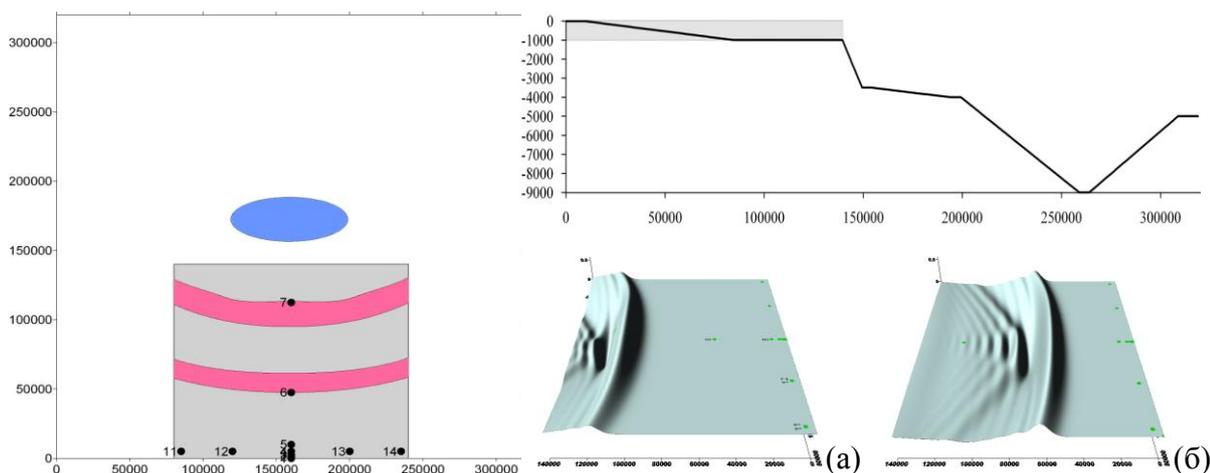
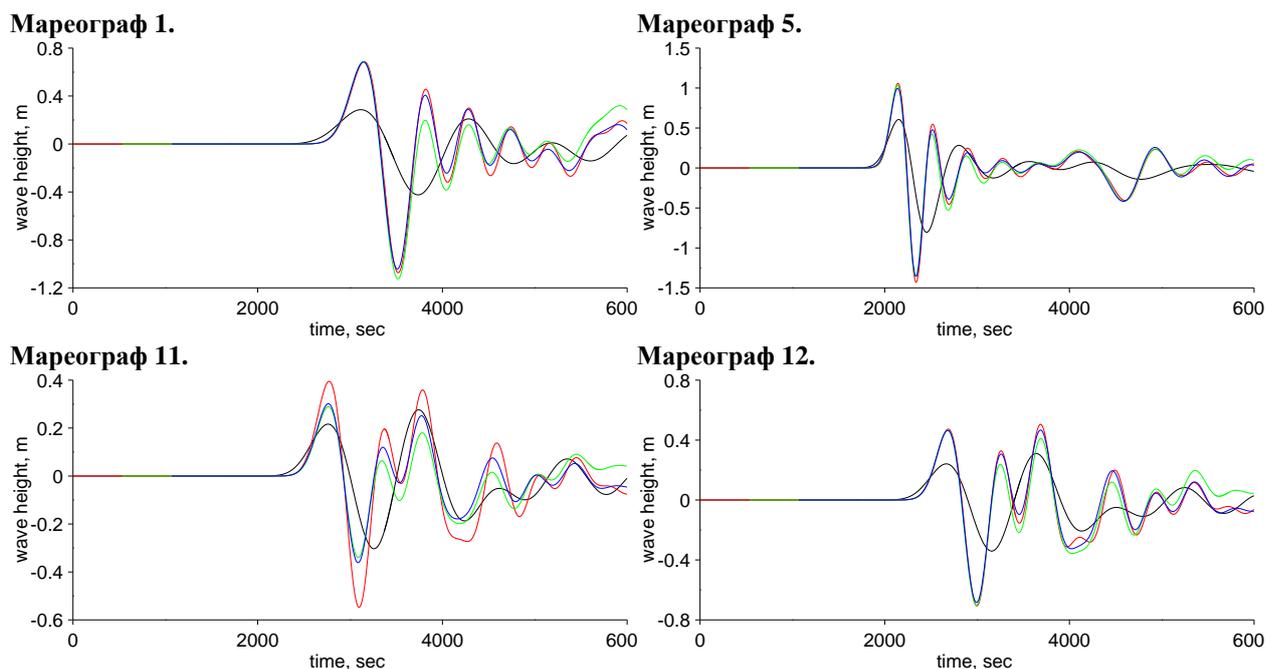


Рисунок 17. Схема первого варианта второй тестовой задачи, начальное возвышение в центре расчетной области: контуры начального возвышения (синяя заливка), малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 535$  сек., нижний –  $t_z \approx 1070$  сек.; справа вверху – схематическое изображение рельефа дна с выделением области «заморозки», справа внизу – волновые поля в моменты заморозки  $t_z \approx 535$  сек. (а) и  $t_z \approx 1070$  сек.; зелеными кружочками отмечены положения мареографов. Все линейные размеры указаны в метрах.

В ходе решения этой задачи сначала проводился расчет на грубой сетке, его результаты замораживались в момент времени  $t_z \approx 1070$  сек. «Замороженные» поля свободной поверхности

и скорости вырезались по направлению  $OY$  от 0 до координаты 140000 м, что соответствует удаленному от берега краю площадки с постоянной глубиной 1000 м, и применялись в качестве начальных данных для расчета на мелкой сетке.



**Рисунок 18.** Мареограммы, рассчитанные в ходе решения первого варианта второй модельной задачи. Черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 535$  сек., синим –  $t_z \approx 1070$  сек.

Эталонными считались мареограммы, рассчитанные во всей области на мелкой сетке. Результаты сравнения (рис. 16) показали, что во всех мареографных точках расчет с использованием технологии «заморозки» практически совпадает с эталонным, незначительное расхождение наблюдается только в «хвостах» мареограмм.

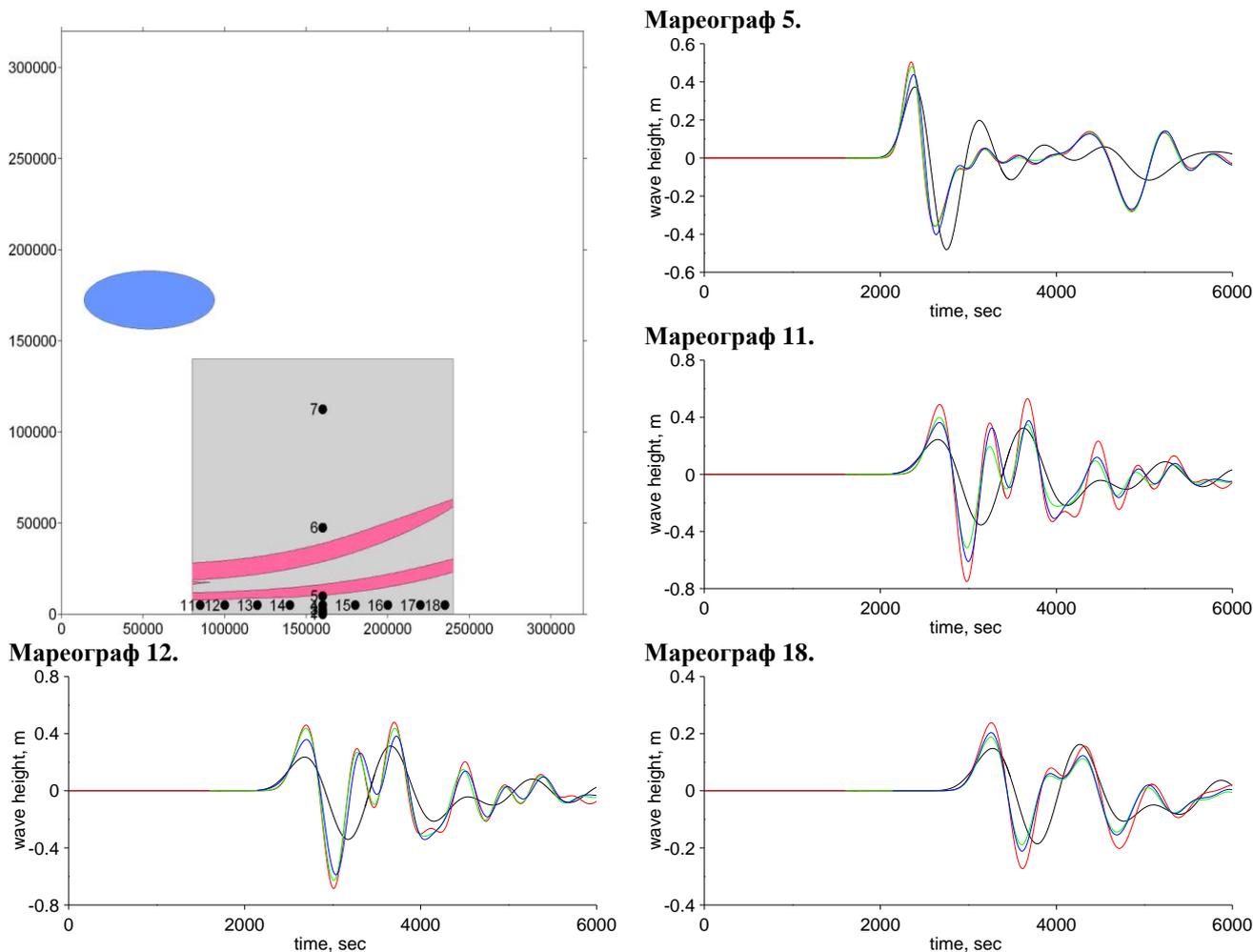
Постановка *второй* модельной задачи преследовала цель исследования зависимости результатов, получаемых с использованием метода «заморозки», от времени фиксации результатов моделирования на грубой сетке, используемых впоследствии в качестве начальных данных для расчета на мелкой сетке, а также влияния положения и ориентации локализованного источника начального возмущения относительно защищаемых пунктов на точность получаемых результатов. При этом вычислительные эксперименты проводились в той же модельной квазиодномерной акватории, а в качестве начальных возвышений были использованы верхние половины эллипсоидов с различным начальным положением и ориентацией относительно береговой линии.

Высота таких возмущений была равна 1 м, а малая и большая оси – 40000 м и 100000 м, соответственно. «Заморозка» расчетных полей выполнялась в различные моменты времени. Схема задачи в случае, когда начальное возвышение было расположено в центре области (*первый* вариант) и его большая ось была направлена параллельно береговой линии, изображена на рис. 17.

Рассчитанные для этого варианта мареограммы представлены на рис. 18. В первой и пятой мареографных точках (расположенных по центру области) синие кривые, соответствующие более поздней «заморозке», практически совпадают с «эталонной» красной мареограммой. Зеленая кривая (ранняя «заморозка») ведет себя в «хвостах» этих записей несколько хуже, что особенно заметно в точке 1. Это различие, по-видимому, происходит из-за того, что к моменту «заморозки» в малую область  $\omega$  еще не вошла некоторая существенная часть возмущения.

При рассмотрении мареограмм, рассчитанных в точках, находящихся ближе к краям малой области  $\omega$  (12-ый и, особенно, 11-ый мареографы) можно заметить постепенное расхождение результатов, которое можно связать с тем, что при расчете во всей области  $\Omega$  на волновую

картину в приграничных точках влияют также волны из подобласти  $\Omega \setminus \omega$ , которые при расчете только в  $\omega$  не учитываются. Отмеченный эффект, непосредственно связанный с конечностью размеров начального возмущения, приводит к выводу о нежелательности размещения границ малой области в непосредственной близости защищаемых пунктов.

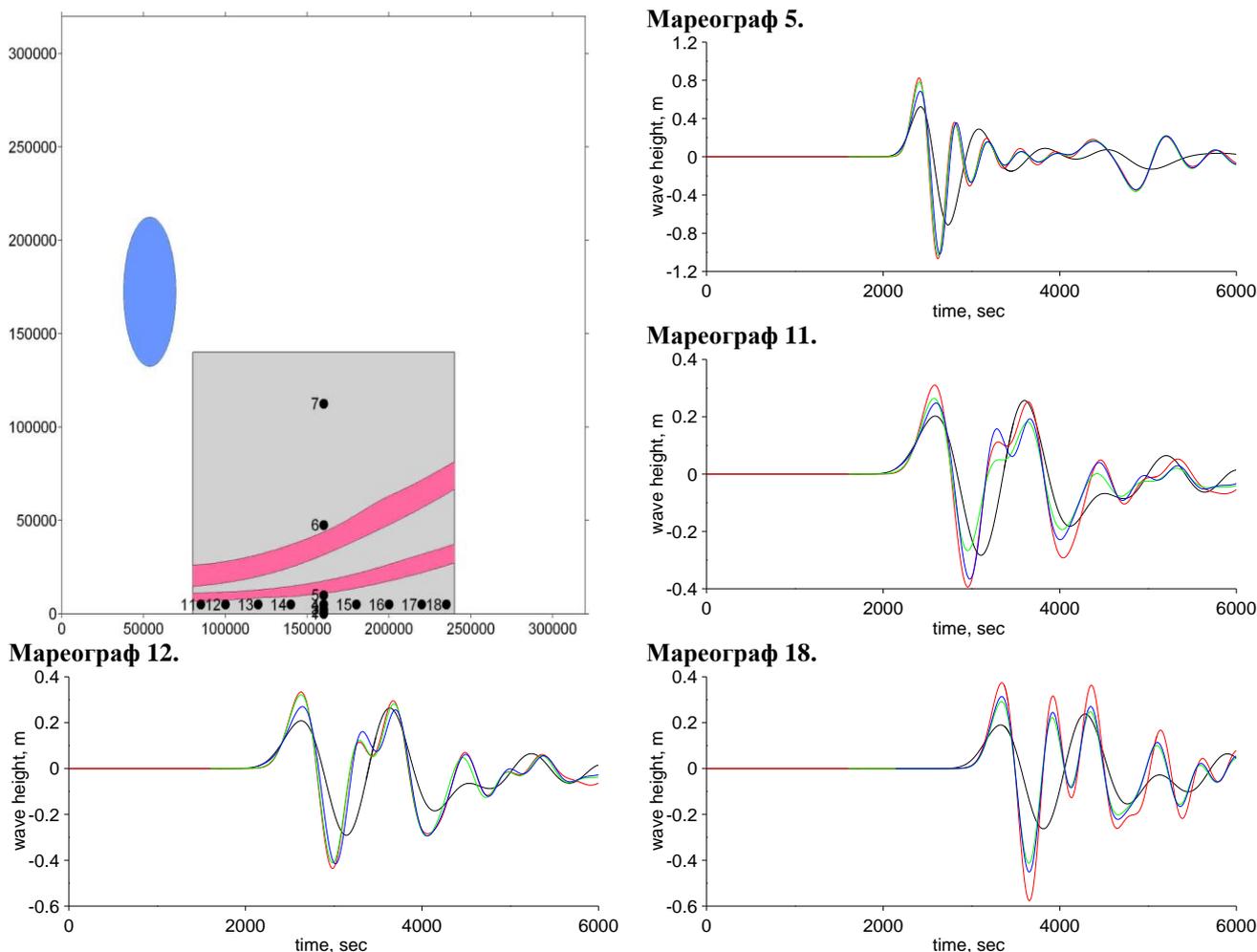


**Рисунок 19.** Схема второго варианта второй тестовой задачи (слева сверху), начальное возвышение размещено вблизи боковой границы расчетной области: контуры начального возвышения (синяя заливка), малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

*Второй* вариант обсуждаемой задачи отличался от первого только положением начального возмущения, отнесенного к боковой границе расчетной области (рис. 19). Здесь «заморозка» производилась в моменты  $t_z \approx 1600$  и  $t_z \approx 2140$  секунд (на 600-м и 800-м шагах по времени расчета на грубой сетке, соответственно). Сравнительный анализ рассчитанных мареограмм показывает, что и при смещенном источнике начального возмущения наилучшее совпадение с эталонным решением получено в центральных прибрежных точках (мареографы 1 – 5) с той лишь разницей, что в этом случае «поздняя заморозка» (синяя кривая) оказалась менее точной, чем ранняя (зеленая), что может быть связано с тем, что к моменту «заморозки» решение претерпевает существенные искажения при расчете на грубой сетке. На мареографах, расположенных ближе к боковым границам малой области  $\omega$  (ближние к источнику мареографы 11 – 14 и наиболее удаленные от него 15 – 18), также наблюдается постепенное расхождение «замороженных» и эталонных результатов.

При развороте источника на 90 градусов (*третий* вариант) картина в целом сохраняется (рис. 20). Таким образом, выводы, сделанные при анализе результатов первого варианта второй модельной задачи, оказываются независимыми ни от положения, ни от ориентации простейшего локализованного источника. Они состоят в рекомендации выбирать границы малой области  $\omega$  на достаточном удалении от защищаемых пунктов.

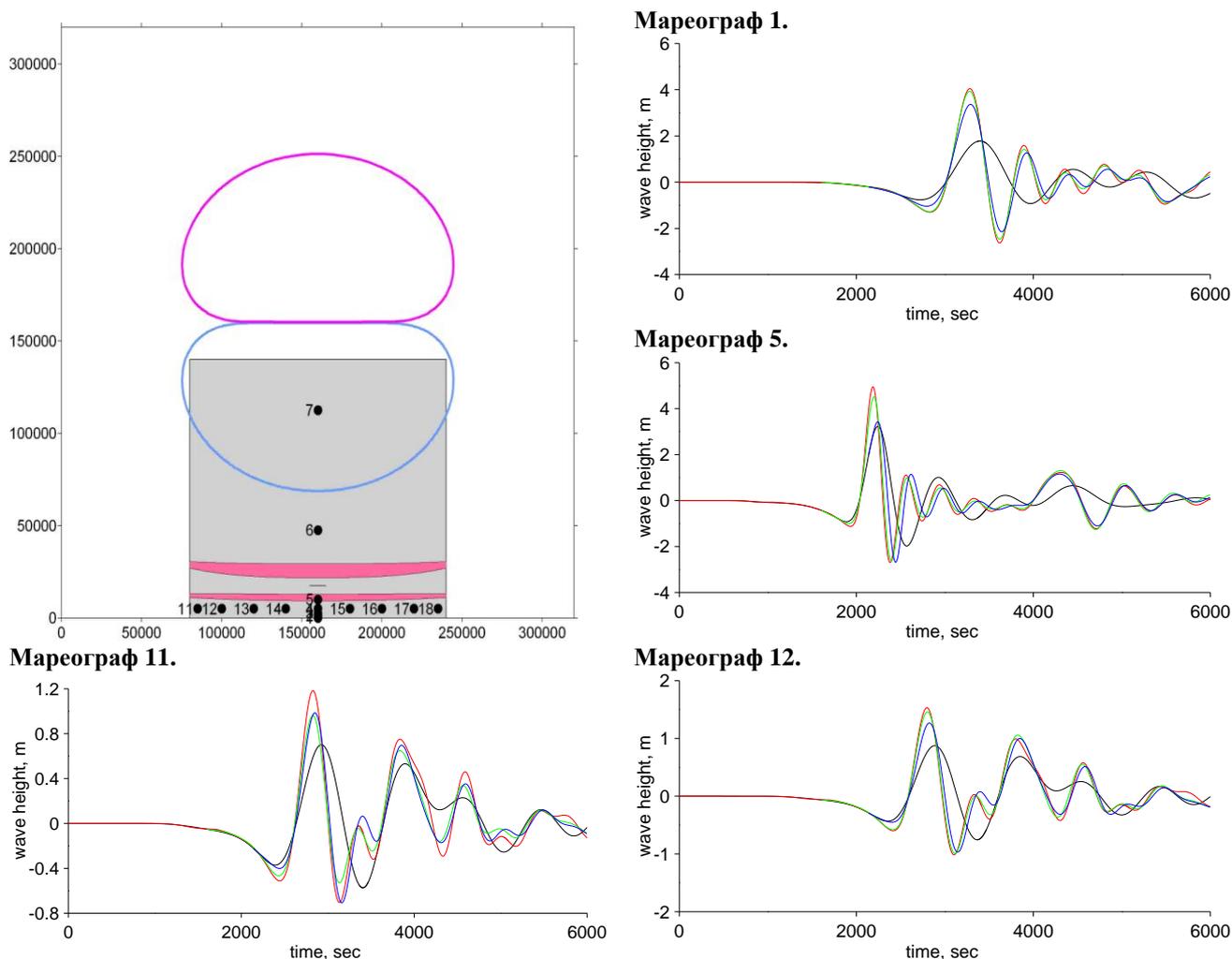
В *первом* варианте *третьей* модельной задачи источник был направлен своей отрицательной частью возмущения к берегу (рис. 21). Здесь, как и для второй задачи, в случае слишком поздней «заморозки» ( $t_z \approx 2140$  секунд, синяя кривая на графиках) в центральных прибрежных точках (мареографы 1 – 5) наблюдалось искажение результатов. Своевременная, оптимальная, «заморозка» при  $t_z \approx 1600$  сек. обеспечивает очень хорошую близость соответствующего результата эталонному. В приграничных, 11-ом и 12-ом боковых мареографах присутствуют отмеченные ранее расхождения.



**Рисунок 20.** Схема третьего варианта второй тестовой задачи (слева сверху), начальное возвышение размещено вблизи боковой границы расчетной области: контуры начального возвышения (синяя заливка), малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

При решении *второго* варианта *третьей* модельной задачи источник начального возмущения сохранил все свои параметры за исключением  $\Theta$  – угла, определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва, который был изменен на 90 градусов (рис. 22). Такая ориентация источника привела к весьма специфическому характеру распространения волновой энергии, основная часть которой оказалась направлена в стороны

боковых границ расчетной области. При этом к центральному фрагменту береговой линии подходили волны очень малой амплитуды – зафиксированные 1-ым – 5-ым мареографами амплитуды не превышали полутора миллиметров.

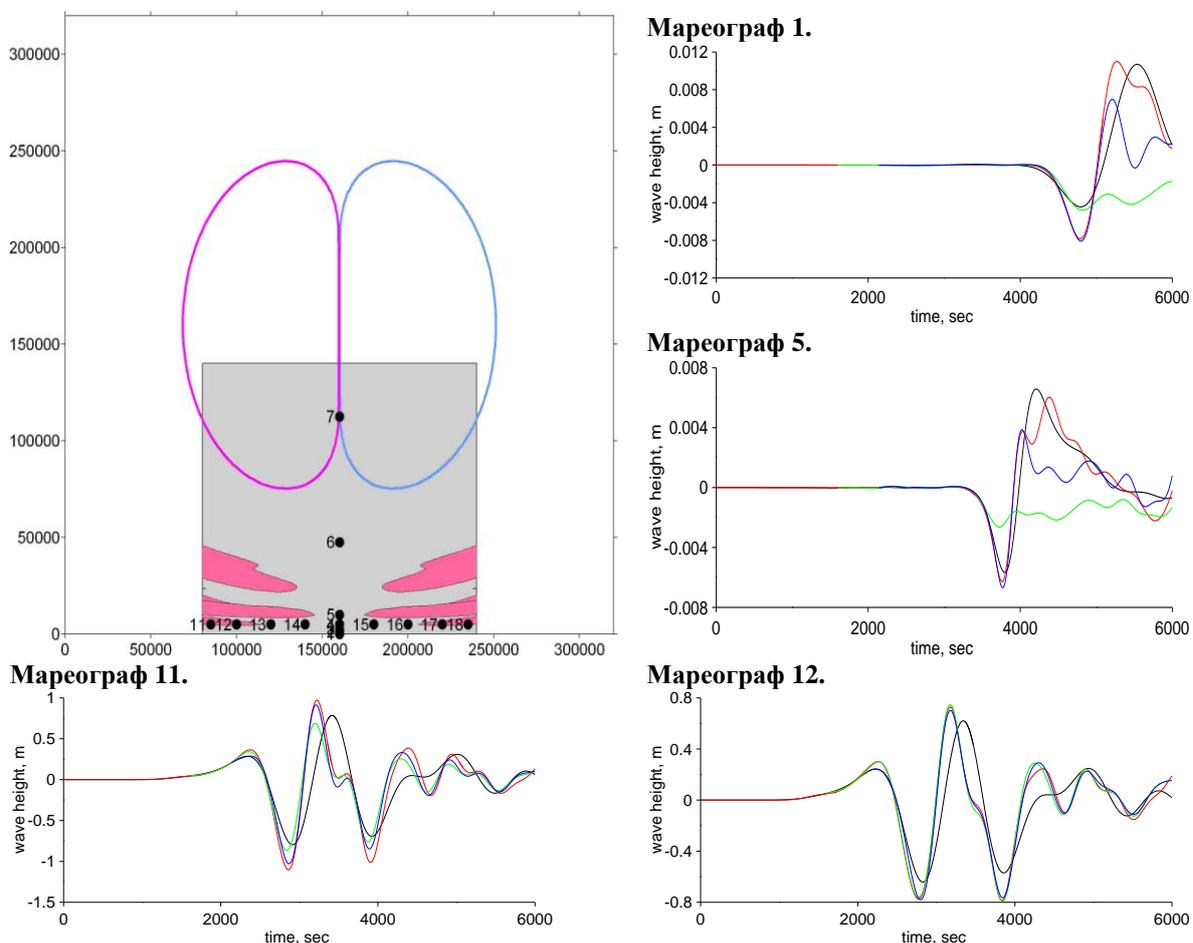


**Рисунок 21.** Схема первого варианта третьей тестовой задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

**Таблица 3.**

$x$ -координата гипоцентра (м)	160000	160000	160000
$y$ -координата гипоцентра (м)	175000	175000	175000
$L$ – длина в плоскости разлома (м)	100000	100000	100000
$W$ – ширина в плоскости разлома (м)	50000	50000	50000
$D_0$ – величина подвижки по плоскости разлома (м)	5	5	5
$\delta$ – угол падения плоскости разлома (градусы, отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости)	90	90	30
$\lambda$ – направление подвижки в плоскости разлома (градусы, отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома)	90	90	30
$\Theta$ – угол, определяющий ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва (градусы)	0	90	30
$h_0$ – глубина верхнего края разрыва (м)	5000	5000	5000

Однако, несмотря на такие крайне неблагоприятные условия, количественное и качественное соответствие результатов, полученных с помощью метода «заморозки», эталонным следует признать более чем удовлетворительным, свидетельством чему являются мареограммы, рассчитанные в приграничных, «неблагополучных» мареографных точках, где амплитуды волн оказались вполне ощутимыми – около 1 м. Наилучшее качество было получено в условиях «поздней заморозки» при  $t_z \approx 2140$  сек.



**Рисунок 22.** Схема второго варианта третьей тестовой задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

В *третьем* варианте задачи были изменены не только значение угла  $\Theta$ , определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва, которое было изменено на 30 градусов (рис. 22). Несколько изменен был и механизм сейсмического источника – значения угла  $\delta$ , задающего угол падения плоскости разлома, и угла  $\lambda$ , определяющего направление подвижки в плоскости разлома, были изменены с 90 градусов на 30. Здесь как в центральном фрагменте береговой линии (мареографы 1 – 5), так и вблизи границ малой расчетной области (мареографы 11, 12) амплитуды волн имеют вполне ощутимые значения порядка 1 метра. Наилучшего результата удастся добиться при «ранней заморозке», так как достаточно сложный по своей конфигурации источник порождает волновое поле, содержащее весьма тонкие структуры, которые существенно искажаются при расчете на грубой сетке. Поэтому «ранняя заморозка», фиксирующая волновые поля на ранних стадиях грубого расчета, оказывается предпочтительней, уменьшая влияние грубой сетки.

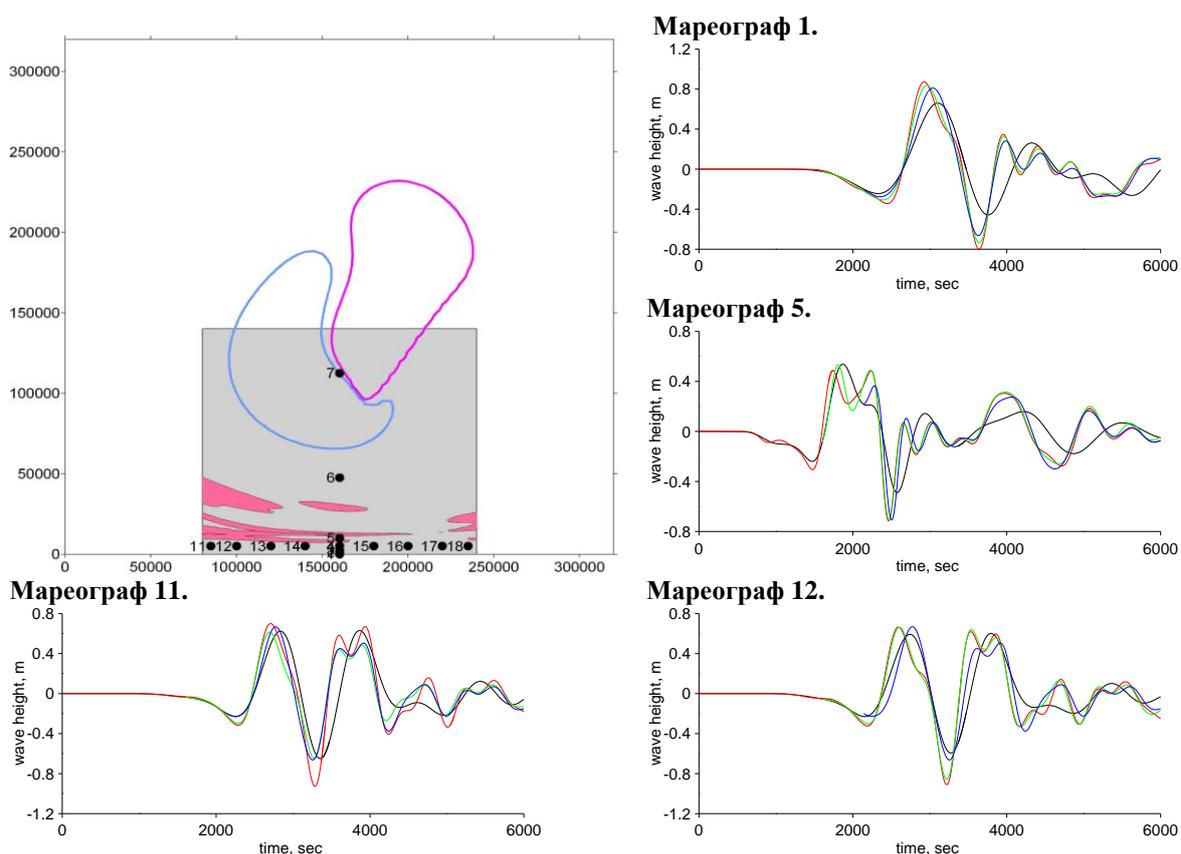
Полезным представляется сопоставление результатов решения третьей модельной задачи, рассчитанных с использованием трех различных источников (рис. 24), убедительно демон-

стрирующее достаточно высокую точность результатов, получаемых с помощью экономичного по ресурсам метода «заморозки» вне зависимости от расположения, ориентации и формы начального возмущения.

Сравнение экономичных технологий «перехвата» и «заморозки», предназначенных для повышения эффективности моделирования трансформации волн цунами в реальных акваториях с необходимой точностью, проводилось в модельной акватории с использованием начального возмущения в виде верхней половины эллипсоида (четвертая модельная задача). Начальная амплитуда такого возмущения равнялась 5 метрам, а оси – 60000 м и 70000 м.

Вычислительные эксперименты проводились в географической системе координат так, что «грубый» расчет выполнялся на сетке с шагом 2 минуты по направлению, параллельному береговой линии, и 1 минута по ортогональному направлению, в котором происходит изменение значений глубин модельной акватории. В малой области использовались шаги в четыре раза меньшие. Такой выбор соответствует характерному метрическому соотношению равных друг другу шагов сетки на широтах расположения Курило-Камчатского глубоководного желоба, моделью которого и является используемая в модельных расчетах акватория.

Малая область  $\omega$  была выбрана здесь несколько меньшей (рис 25), а «заморозка» проводилась в момент времени  $t_z \approx 1630$  секунд. На графиках, как и ранее, черным и красным цветом отрисованы мареограммы, рассчитанные во всей области на все время расчета с использованием грубой и мелкой сеток, соответственно. Зеленым цветом отрисованы результаты расчета с использованием метода «перехвата», синим – «заморозки».

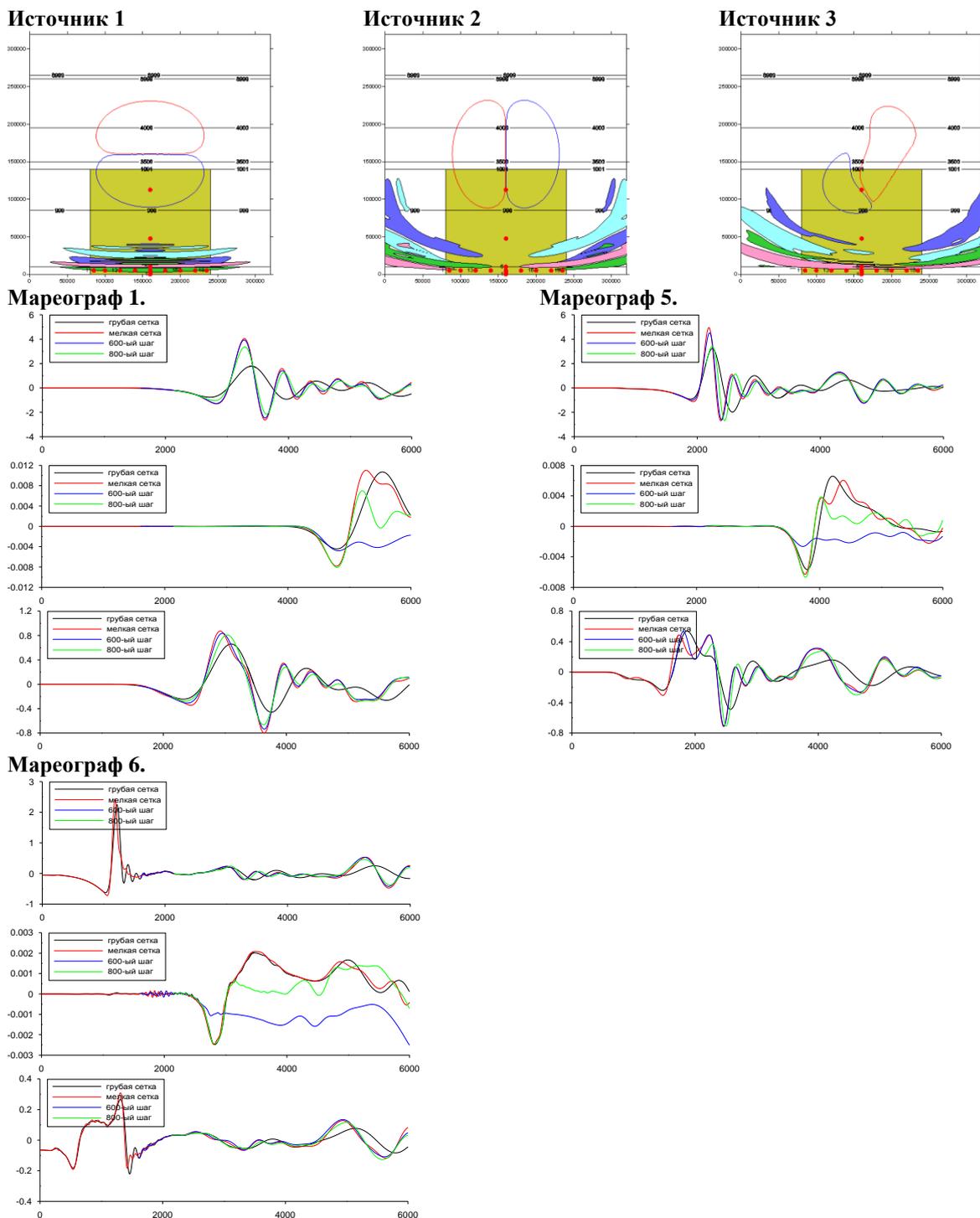


**Рисунок 23.** Схема третьего варианта третьей тестовой задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

Анализ графиков показывает, что оба метода обладают практически одинаковыми возможностями. В мареографных точках, расположенных в центральной прибрежной зоне, соот-

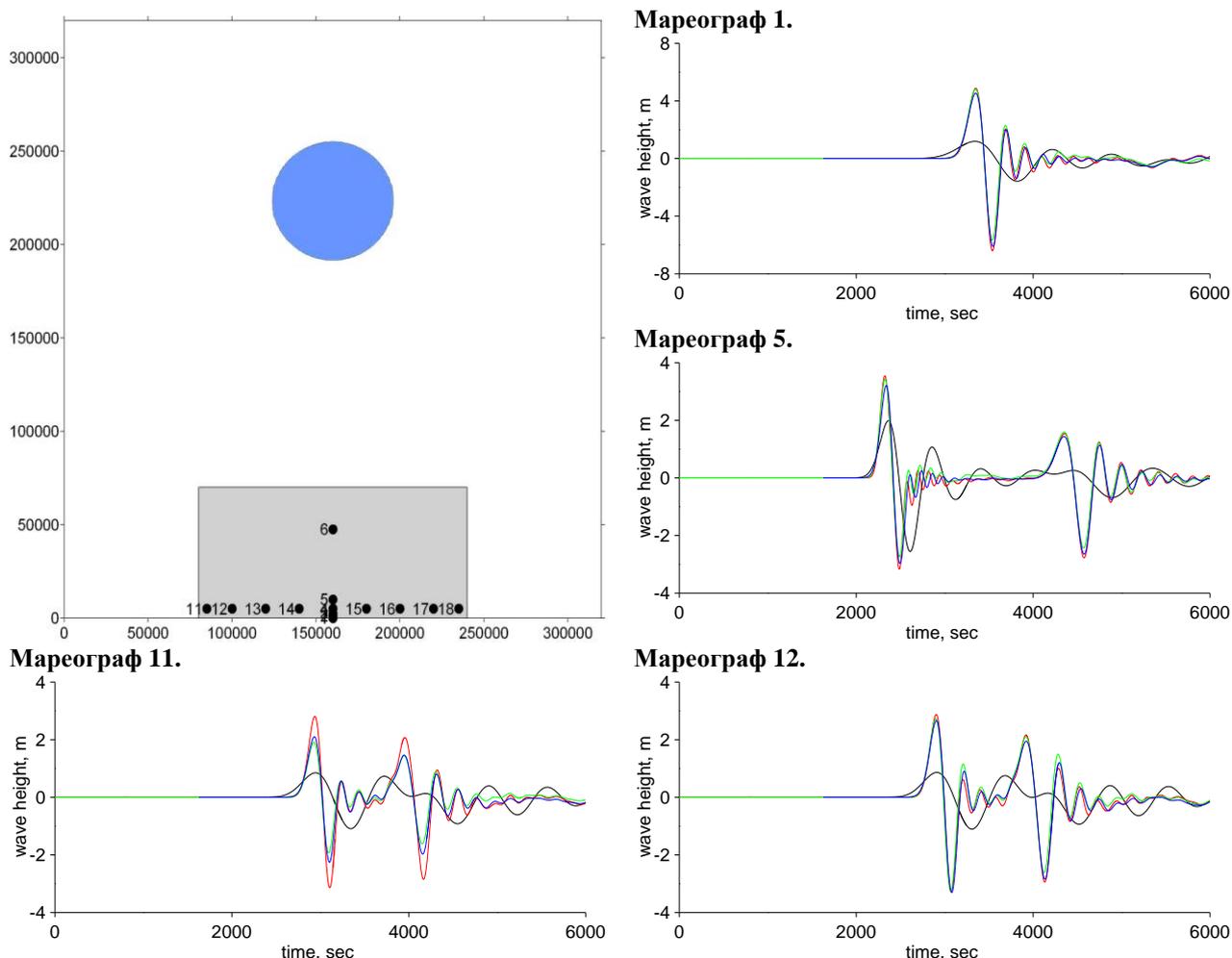
ветствующие результаты почти совпадают с эталоном, причем головная волна повышения несколько лучше воспроизводится методом «перехвата», а волна понижения и последующий «хвост» мареограмм – методом «заморозки». По мере приближения к боковым границам малой области наблюдается некоторое снижение точности, при несколько лучших результатах у метода «заморозки», как на положительных, так и на отрицательных амплитудах.

Заключительный фрагмент настоящего отчета иллюстрирует возможности применения одного из этих методов – метода «заморозки» – к решению практически актуальной задачи о распространении волн в Карагинском заливе. Здесь качества методики проверяются в условиях реальной акватории.



**Рисунок 24.** Сопоставление результатов решения третьей модельной задачи, рассчитанных с использованием трех различных источников. Схемы вариантов третьей тестовой задачи (сверху), мареограммы упорядочены по номеру источника сверху вниз.

В некоторых ситуациях распределение волн в момент  $t_z$  не позволяет выбрать малую область так, чтобы она содержала всю существенную часть возмущения. Тогда возможен расчет на мелкой сетке во всей области  $\Omega$  (без выделения  $\omega$ ) с использованием переинтерполированных данных. В этом случае применение «заморозки» оправдывается тем, что часть расчета проводится на грубой сетке, счет на которой идет намного быстрее, чем на мелкой. В проведенных вычислительных экспериментах при измельчении сетки в два раза время расчета увеличивается в 8 раз, при измельчении в 4 раза продолжительность расчета возрастает в 64 раза и т.д. Таким образом, при расчете без выделения малой области экономичность повышается за счет того, что на мелкой сетке выполняется только завершающая часть расчета.



**Рисунок 25.** Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки» и «перехвата». Вверху слева изображена схема модельной задачи: контур начального возмущения (залит синим цветом), малая расчетная область (залита серым), точки расположения мареографов (черные кружочки). На графиках черными линиями изображены мареограммы, рассчитанные в большой области на грубой сетке, красными – на мелкой, зелеными – результаты расчетов с использованием метода «перехвата», синими – метода «заморозки».

Реализация такого приема была выполнена для моделирования распространения волны цунами в области «Карагинский залив», простирающейся от 161.8 до 166.8 градусов Восточной долготы и от 57.1 до 60.6 градусов Северной широты. Начальное возмущение рассчитывалось с использованием модели «глубоководного» источника 25с. Как было показано выше, точность расчета в прибрежных мареографах волн, порожденных этим источником, сильно зависит от детальности используемой сетки.

Для оценки адекватности выбора момента «заморозки» волновых полей были проведены два вычислительных эксперимента, в первом из которых «заморозка» происходила в момент времени:  $t_z = 570$  секунд, а во втором – в момент  $t_z = 760$  секунд, что соответствовало 150 и 200 шагам в расчете на грубой 1-но минутной сетке (рис. 26).

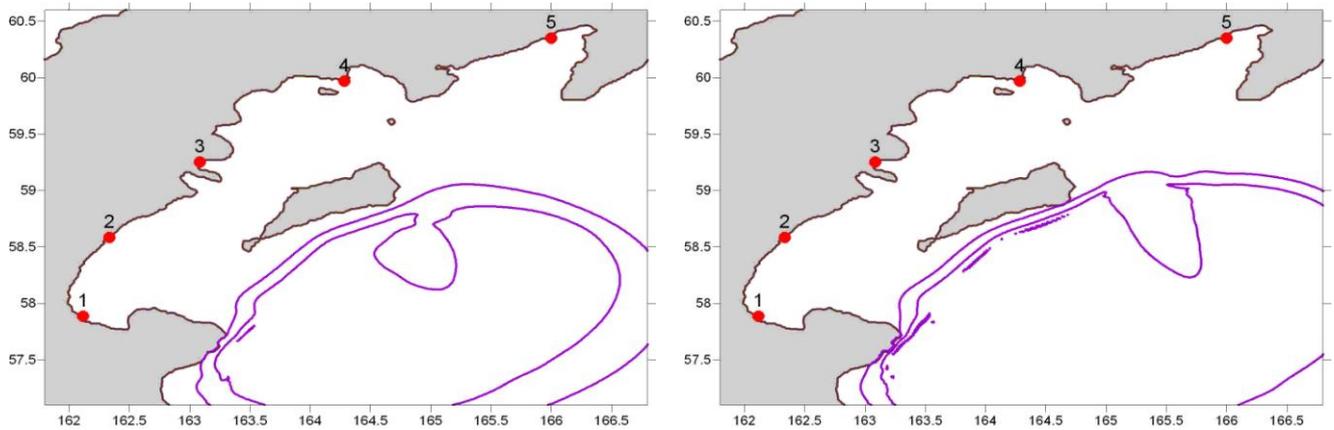


Рисунок 26. Иллюстрация применения метода «заморозки» на задаче о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Контурные волновых полей, рассчитанные на грубой 1-но минутной сетке: слева – «заморозка» в момент времени  $t_z = 570$  сек., справа – на момент  $t_z = 760$  секунд. Красными кружочками отмечены расположения прибрежных мареографов.

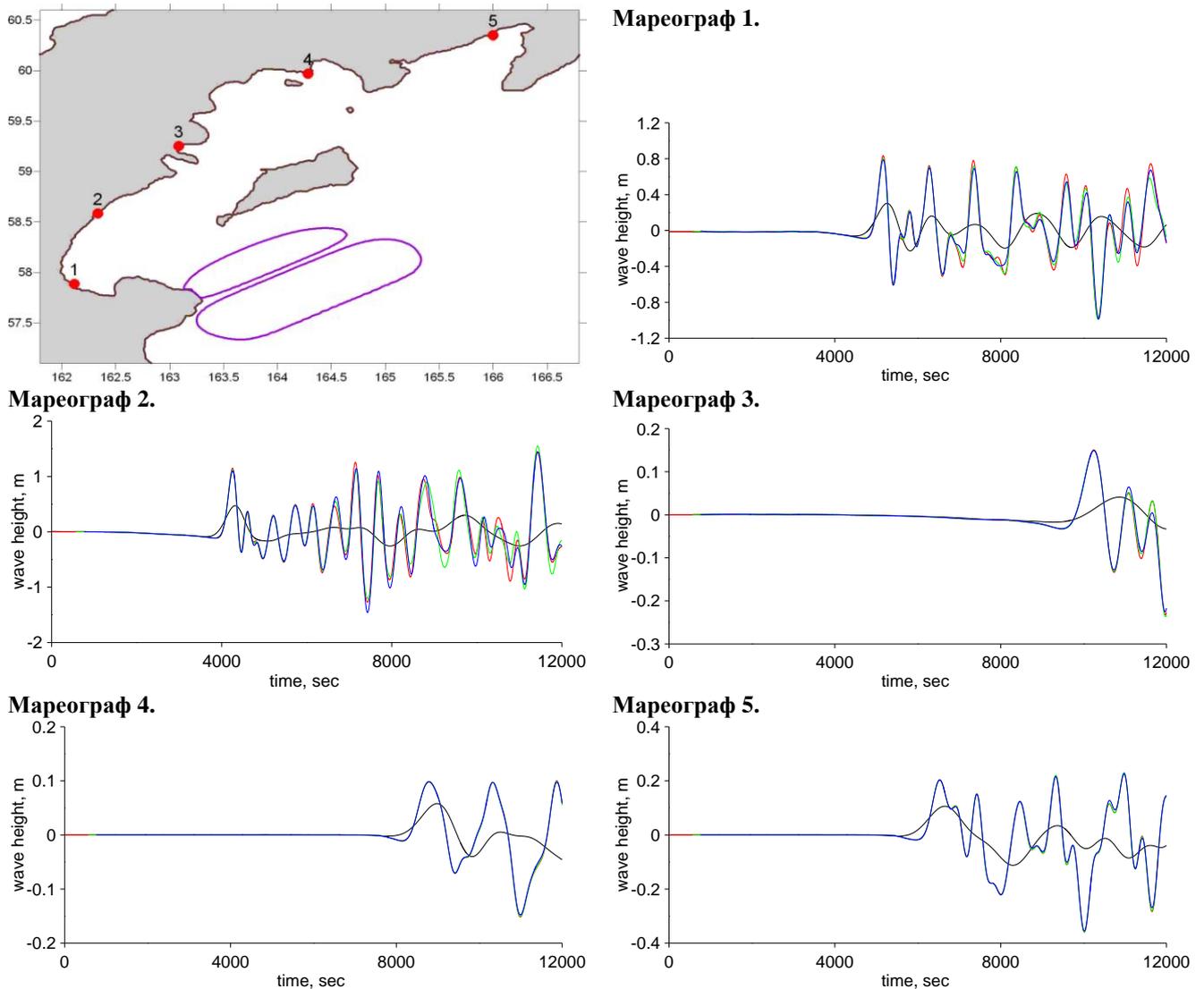


Рисунок 27. Задача о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки», с эталонным решением. На графиках черными линиями изображены мареограммы, рассчитанные без «заморозки» на грубой сетке, красными – на мелкой, зелеными – результаты расчетов с использованием метода «заморозки» на момент времени  $t_z = 570$  сек., синими – на момент  $t_z = 760$  секунд.

Так как размеры содержательных фрагментов волновых полей оказались сравнимы с размерами расчетной области и экономия вычислительных ресурсов за счет ее уменьшения не представлялась возможной, исполнителями было принято решение в данном случае малую область  $\omega$  не выделять, а продолжать расчет на мелкой 15-ти секундной сетке во всей исходной области. Таким образом, потеря точности могла происходить здесь только из-за выполнения начального этапа расчета с использованием грубой сетки.

Как показывают графики (рис. 27), результаты расчетов с «заморозкой» в обоих случаях очень близки к эталонным во всех мареографных точках. Все видимые расхождения синей и зеленой кривых с красной могут быть объяснены некоторым слабым искажением результатов вследствие применения грубой сетки. Так как эти различия оказались пренебрежимо малы, можно полагать, что метод достаточно устойчив к выбору момента «заморозки».

Изложенные в этом разделе результаты решения модельных задач дают основания утверждать, что исполнителями созданы и тщательно проверены специальные вычислительные методики, позволяющие обеспечить необходимую точность моделирования трансформации волн цунами на трассах от области генерации к защищаемым участкам побережья при вполне приемлемых требованиях к размерам вычислительных ресурсов.

Методику «заморозки» целесообразно использовать в тех случаях, когда область содержит одновременно глубоководную зону, в которой достаточно использования грубой сетки, и мелководную, в которой расчеты необходимо вести на мелкой сетке. Результаты испытаний на модельных задачах показали, что для обеспечения необходимой точности необходимо правильно выбрать момент «заморозки»  $t_z$  и адекватно выделить малую область  $\omega$ . При соблюдении этих условий удастся практически избежать снижения качества моделирования, которое порождается проведением части расчета на грубой сетке и отсечением некоторых фрагментов волновых полей при переходе в малую область. В то же время, продолжительность расчета существенно уменьшается.

## Библиография

1. Подъяпольский Г.С. Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли, 1968, №1, С.7-24
2. 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.
3. Yamashita T., Sato R. Generation of tsunami by a fault model // J. Phys. Earth. 1974. V. 22, № 4. P. 415 – 440.
4. Ward S. Relationships of tsunami generation and an earthquake source // J. Phys. Earth. 1980. V. 28, № 5. P. 441 – 474.
5. Comer R.P. Tsunami generation: a comparison of traditional and normal mode approaches // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1984. V. 77, № 4. P. 415 – 440.
6. Aki K. Earthquake mechanism // Tectonophysics, 1972, V.13, № 1 - 4, P. 423-446.
7. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978, С.23-51
8. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space // Bull. Seis. Soc. Am. 1985. V. 75. P. 1135 – 1154.
9. ITDB/WLD – Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007. – 2007 (CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk)
10. Шокин Ю.И., Бейзель С. А., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Об использовании методов численного моделирования для решения прикладных задач проблемы цунами. Тр. Междунар. конф. “Вычисл. и информационные технологии в науке, технике и образовании”. Т. I. Павлодар: ТОО НПФ “ЭКО”. 2006. С. 36-51.
11. 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.

12. 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.