

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

21 мая 2007 года

**«Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов  
Курило-Камчатского региона»**

**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 № 1н-07 от 22 марта 2007 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2007 г.

Исполнители:

ст.н.с., к.ф.-м.н.

программист

аспирант

программист

З.И.Федотова

В.В.Смирнов

В.В.Бабайлов

С.А.Бейзель

1. Введение .....	3
2. Краткий обзор поставленной задачи .....	4
3. Концепция предлагаемого решения .....	12
4. Предлагаемое решение .....	12
База данных элементарных моделей очагов. ....	13
Модуль генерации начального возмущения. ....	13
База данных источников. ....	14
База данных истории землетрясений. ....	16
Вычислительный модуль. ....	16
Батиметрия. ....	16
Модуль визуализации. ....	16
Управляющий модуль. ....	16
База данных результатов расчетов. ....	17
База данных защищаемых пунктов. ....	17
Пользовательский интерфейс системы. ....	18
Информационная система по источникам возникновения цунами TsunamiGIS®	18
Функциональные возможности картографического интерфейса .....	19
5. Этапы разработки системы .....	20
6. О выборе математических моделей. ....	28
7. О результатах предварительных вычислительных экспериментов. ....	34

## **1. Введение**

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ, согласно календарному плану, посвящен формулировке и краткому обоснованию основных принципов, на которых базируется разработка структуры алгоритмического обеспечения для Расчета высот волн цунами для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона. В отчете дан анализ основных требований к разрабатываемой системе, на основе которых предполагается составить план дальнейшей разработки системы.

## **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 Камчатского полуострова и прилегающих островах.

База данных должна быть создана на основе численных расчетов распространения цунами, возникших в результате потенциально опасных цунамигенных землетрясений в Камчатском регионе. В рамках решения задачи подразумевается создание программного обеспечения для быстрого и удобного доступа к построенной базе данных; использование надежных и адаптированных к особенностям поставленной задачи вычислительных алгоритмов для расчета распространения цунами и моделирования процессов генерации волн цунами в области землетрясения

При разработке проекта системы был учтен опыт успешно функционирующей вот уже почти 10 лет аналогичной по своему назначению системы Японского Метеорологического Агентства (далее – ЯМА).

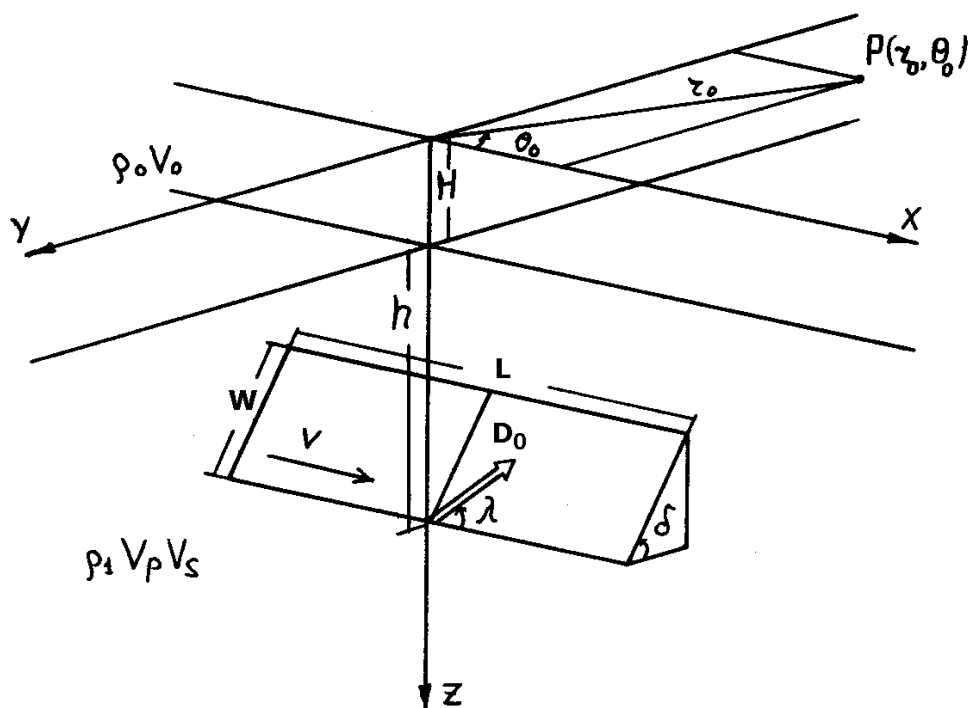
Со второй половины 90-х годов ЯМА начала широкомасштабные работы по внедрения количественных методов прогнозирования ожидаемых высот цунами. Эта новая система прогнозов была введена в опытную эксплуатацию в апреле 1999 года. Прогнозирование осуществляется на основании специально созданной базы данных, включающей около 1000 элементов (элементарных моделей очагов), распределенных в соответствии с сеймотектоническими особенностями акватории в узлах достаточно густой сетки вокруг японских островов (Handbook, 2001).

Для получения этой базы использовался достаточно стандартный метод расчета распространения цунами на реальном рельефе дна от пространственной дислокационной модели очага землетрясения. Такая модель характеризуется семью параметрами:

- Длиной разрыва  $L$  (км),
- Шириной разрыва  $W$  (км),
- Глубиной верхнего края разрыва  $d$  (км),

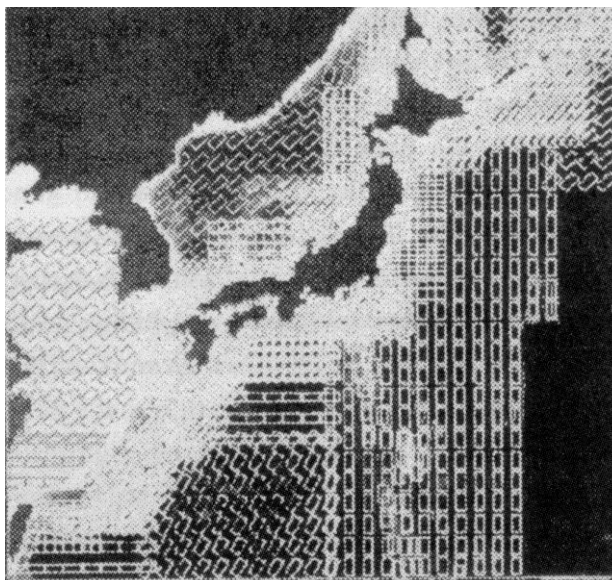
- Азимутом простирания разрыва  $\psi$ ,
- Углом падения разрыва  $\delta$ ,
- Направлением подвижки в плоскости разрыва  $\lambda$ ,
- Величиной подвижки  $D$ (м).

Значения параметров  $L$ ,  $W$  и  $D$  выводятся из корреляционных соотношений с магнитудой землетрясения, инструментально определенная глубина гипоцентра считается соответствующей середине разлома, углы  $\delta$  и  $\lambda$  считаются фиксированными и равными  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , соответственно, угол  $\psi$  принимается равным углу простирания глубоководной впадины или ориентации береговой линии в районе очага землетрясения.



Вычисленные по формулам М.Окады (Okada, 1985) смещения дна в эпицентральной области землетрясения используются в качестве начальных данных для задачи распространения цунами, которая решается разностным методом в рамках линейной модели мелкой воды. Ожидаемые высоты цунами от каждого элементарного очага вычисляются для набора точек (Forecasting Grid Points), находящихся на достаточно глубокой воде, с тем, чтобы обеспечить применимость линейной модели, затем полученные амплитуды пересчитываются на прибрежные точки с использованием широко известной формулы Грина. При этом непосредственно в момент обработки данных о происходящем землетрясении никакие численные расчеты не производятся, а выполняется просто выборка значений высот волн в заданных точках из предварительно созданной базы данных (Tsunami Forecast Database), содержащей до 300,000 значений предварительно вычисленных высот от элементарных очагов, распределенных по

определенному закону в акватории, окружающей японские острова. На основании многочисленных тестовых расчетов ЯМА пришла к выводу, что такой подход позволяет осуществить более точное прогнозирование ожидаемых высот волн на конкретных участках побережья, по сравнению с использовавшимся ранее эмпирическим методом, основанным на корреляции высот цунами с амплитудами сейсмических волн на определенном расстоянии от очага землетрясения.



**Рисунок 1. Распределение модельных очагов землетрясений вокруг Японских островов.**

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.

В приведенной ниже таблице 1 перечислены указанные Заказчиком *защищаемые пункты*, их «исходные» географические координаты, их целочисленные координаты в терминах номеров узлов выбранного Исполнителем фрагмента 1-минутной сетки, соответствующие им физические координаты, отклонение этих значений от «исходных» и значения глубин. Анализ таблицы показывает, что выбранная детальность расчета позволила достаточно точно аппроксимировать локализацию защищаемых пунктов за исключением пункта «Петропавловский маяк», координаты которого требуют уточнения

Таблица 1.

	name	Phi-0	Psi-0	i	j	phi	psi	d-phi	d-psi	D-ij-calc
1.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	171	194	155.836	50.220	-0.036	-0.02	7.628
2.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	192	221	156.19	50.67	0.01	0.01	5.449
3.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	206	219	156.420	50.637	0	-0.007	5.716
4.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	220	233	156.653	50.871	0.017	-0.001	5.439
5.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	283	273	157.7	51.54	0	0.09	5.649
6.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	305	288	158.07	51.79	0	0.04	16.855
7.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	305	288	158.07	51.79	0.01	-0.02	16.855
8.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	320	308	158.32	52.12	-0.02	0.01	6.628
9.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	327	337	158.44	52.61	-0.01	-0.01	13.122
10.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	331	327	158.50	52.44	0	-0.01	16.174
11.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	335	321	158.57	52.34	0	-0.01	12.495
12.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	335	347	158.57	52.77	0	0	3.519
13.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	336	362	158.59	53.02	-0.01	0	3.975
14.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	343	353	158.70	52.87	0	0.03	4.924
15.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	343	362	158.72	53.02	0	0	-78.577
16.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	353	360	158.87	53.0	0	0	5.974
17.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	376	369	159.25	53.14	0	-0.12	6.252
18.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	395	375	159.57	53.24	-0.02	0.01	0.659
19.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	412	410	159.86	53.82	-0.01	0.01	2.033
20.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	413	401	159.87	53.67	0	0	1.801
21.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	416	419	159.92	53.97	-0.04	0	3.626
22.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	418	381	159.96	53.34	-0.01	-0.01	18.331
23.	GMS Semjachik	159.98	54.1	421	427	160.0	54.1	-0.02	0	4.345
24.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	421	428	160.0	54.12	-0.02	0	2.714
25.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	491	455	161.17	54.58	0.03	0.04	3.198
26.	Mys Kozlova	161.7	54.5	523	450	161.71	54.49	-0.01	0.01	24.693
27.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	524	504	161.72	55.39	0.01	0.01	1.102
28.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	533	485	161.87	55.076	0	-0.006	0.950
29.	Selo Hajjulja	162	58.15	541	669	162.0	58.146	0	0.004	0.675
30.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	550	466	162.157	54.76	-0.027	-0.01	17.171
31.	Selo Uka	162.14	57.92	548	654	162.12	57.9	0.02	0.02	3.991
32.	Mys Kamenistyj	162.15	54.83	550	470	162.157	54.83	-0.007	0	6.441
33.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	558	693	162.29	58.55	-0.02	-0.01	0.116
34.	Selo Pankara	162.34	58.6	561	696	162.34	58.6	0	0	1.036
35.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	569	553	162.47	56.21	0	0.06	3.044
36.	Selo Dranka	162.58	58.76	577	706	162.61	58.76	-0.03	0	2.839
37.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	590	712	162.82	58.86	-0.08	0	2.877
38.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	589	622	162.81	57.36	-0.03	0.01	3.342
39.	Ossora	163.08	59.3	606	735	163.09	59.25	-0.01	0.05	4.833
40.	Poselok Ossora	163.09	59.3	606	735	163.09	59.25	0	0.05	4.833
41.	Selo Tylmat	163.2	59.48	613	750	163.21	59.49	-0.01	-0.01	0.515
42.	Selo Kostroma	163.21	59.17	613	730	163.21	59.16	0	0.01	1.003
43.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	614	750	163.23	59.497	-0.01	-0.007	3.812
44.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	615	636	163.24	57.6	-0.01	0	22.814
45.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	622	557	163.36	56.28	-0.03	-0.01	24.942
46.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	628	770	163.46	59.83	-0.01	0.02	8.246
47.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	627	770	163.44	59.83	0.07	-0.05	4.371
48.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	641	704	163.68	58.73	-0.13	0.13	7.810
49.	Selo Anapka	163.75	59.94	647	777	163.78	59.95	-0.03	-0.01	2.753
50.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	652	719	163.86	58.98	0.01	-0.01	2.528
51.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	677	778	164.28	59.96	0	0.01	3.055
52.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	687	786	164.44	60.1	0.01	-0.03	3.259
53.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	700	780	164.66	59.998	0	-0.098	5.106
54.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	713	767	164.877	59.78	0.003	-0.05	8.054
55.	Selo Geka	165.25	60.08	735	785	165.24	60.08	0.01	0	1.396
56.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	751	791	165.51	60.18	0	-0.05	2.675
57.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	765	795	165.74	60.25	0.01	0.03	3.908
58.	Nikol'skoe	165.98	55.2	779	491	165.98	55.18	0	0.02	5.327
59.	Korf	166	60.37	781	802	166.01	60.36	-0.01	0.01	1.187
60.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	781	802	166.01	60.36	0.09	-0.05	1.187
61.	Selo Telichiki	166.11	60.44	787	805	166.11	60.41	0	0.03	3.508
62.	Selo Kultushino	166.26	60.47	796	807	166.26	60.45	0	0.02	5.365
63.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	846	798	167.095	60.298	-0.005	0.032	6.197

64.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	875	468	167.58	54.8	0	-0.02	10.194
65.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	973	813	169.21	60.54	0.01	0	1.511
66.	Apuka	169.62	60.39	997	806	169.61	60.43	0.01	-0.04	3.572
67.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	1186	853	172.77	61.22	-0.01	0.02	8.688

Расположение защищаемых пунктов представлено также на рисунке 2.

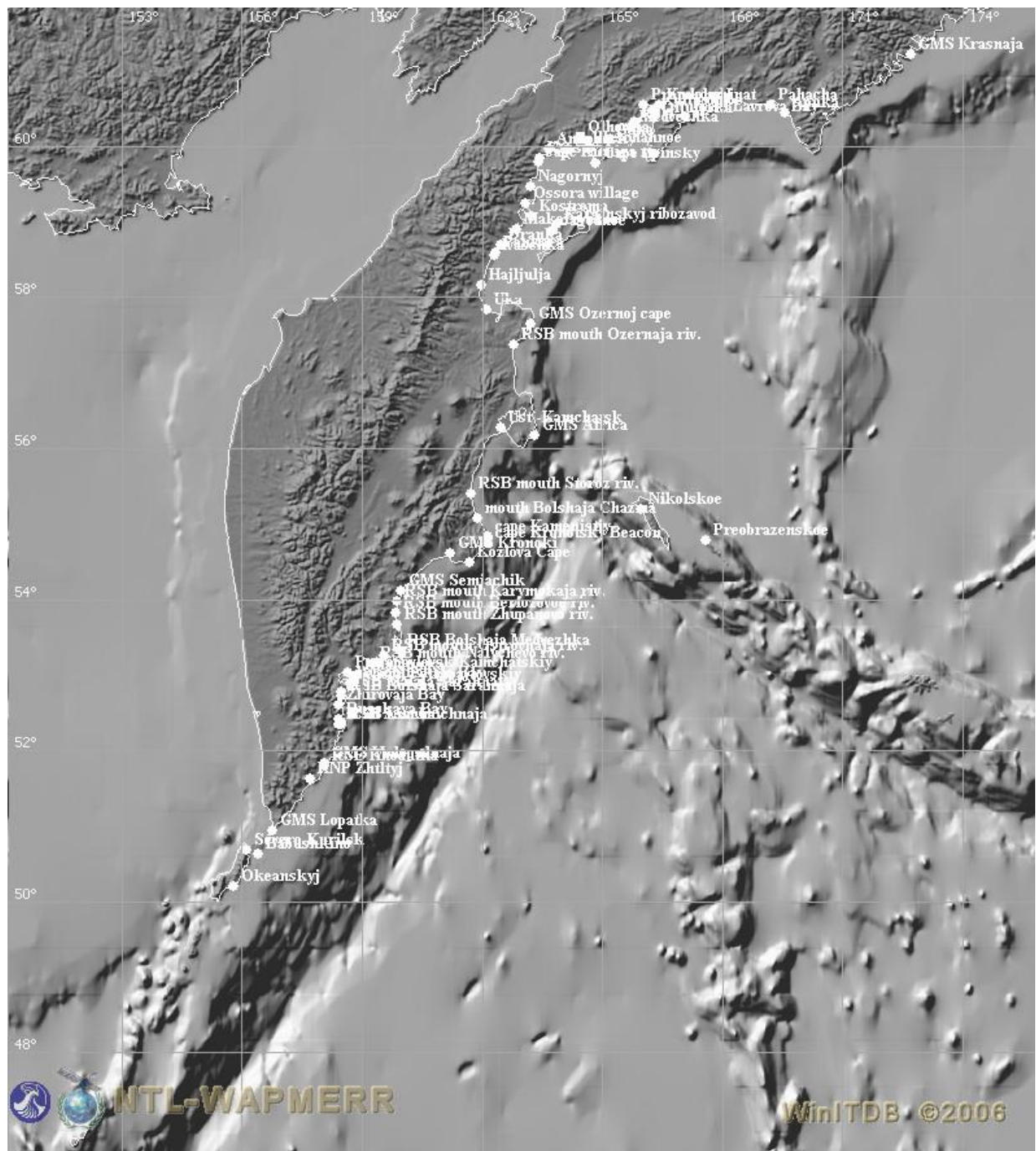
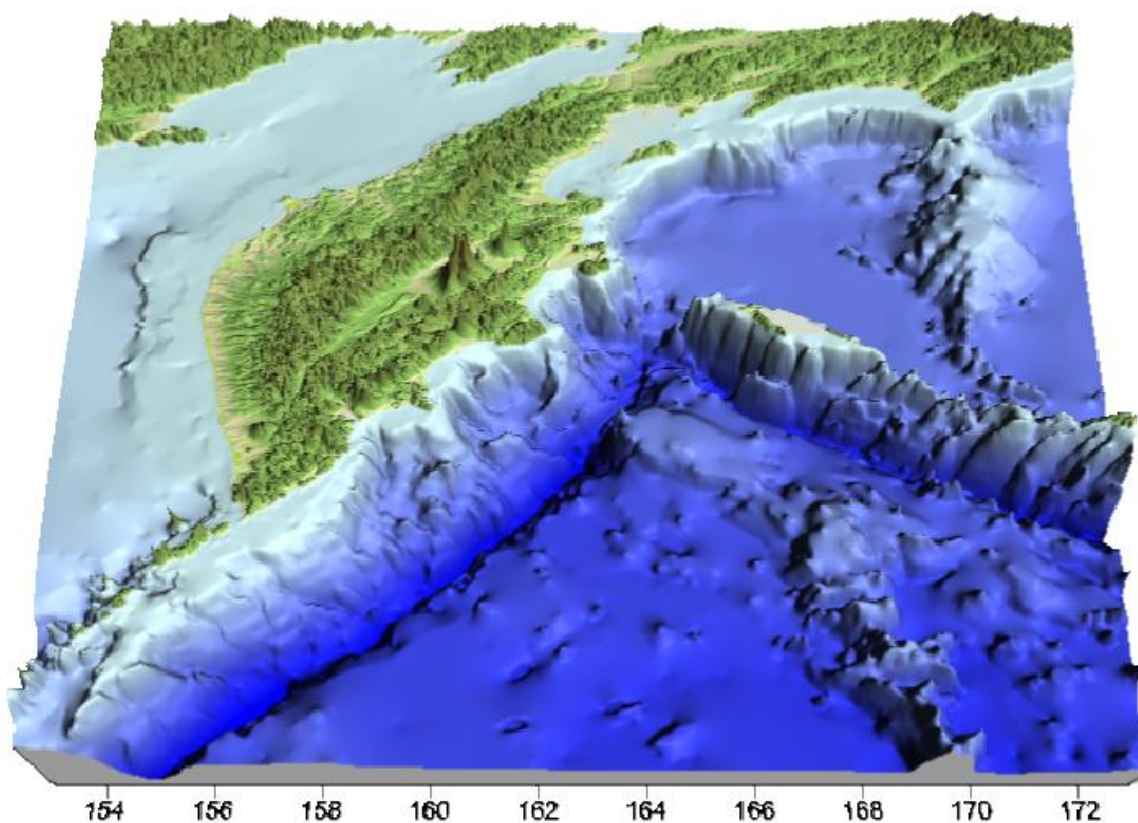


Рисунок 2. Карта расположения защищаемых пунктов на побережье Камчатки.

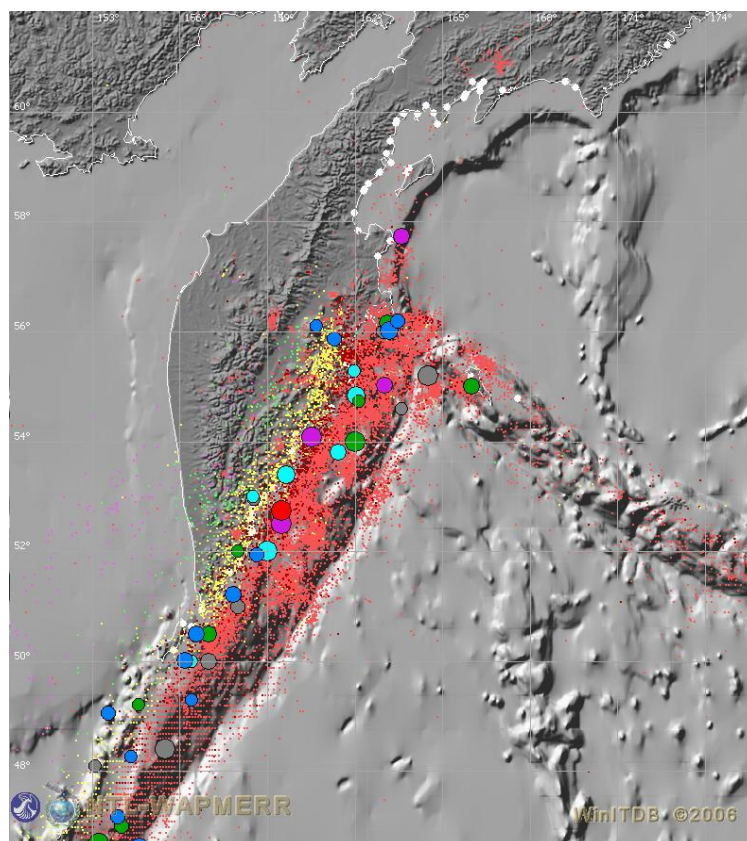
Следует указать, что по результатам предварительного анализа исторических данных о цунами в акватории полуострова Камчатка в качестве базовой акватории для выполнения работ был выбран район, простирающийся по долготе от 153 до 173 градусов Восточной долготы и по широте от 47 до 62 градусов Северной широты: Изображение рельефа дна и суши исследуемого фрагмента представлено на рисунке 3.





**Рисунок 3. Рельеф дна и суши исследуемой акватории**

Исторический анализ и определение размещения событий, связанных с проявлениями сейсмической и цунамической активности выполнялись с использованием информационной системы WinITDB и представлены на рисунке 4:



**Рисунок 4. Карта сейсмичности и очагов исторических цунами**

На основе предварительного анализа была выделена зона вероятного расположения критических очагов цунами (рисунок 5).

Принимая за основу методику, близкую японской, разработчики приступили к серьезной работе по адаптации этой методики к специфическим условиям Камчатки т особенностям локальной сейсмо-тектонической обстановки.

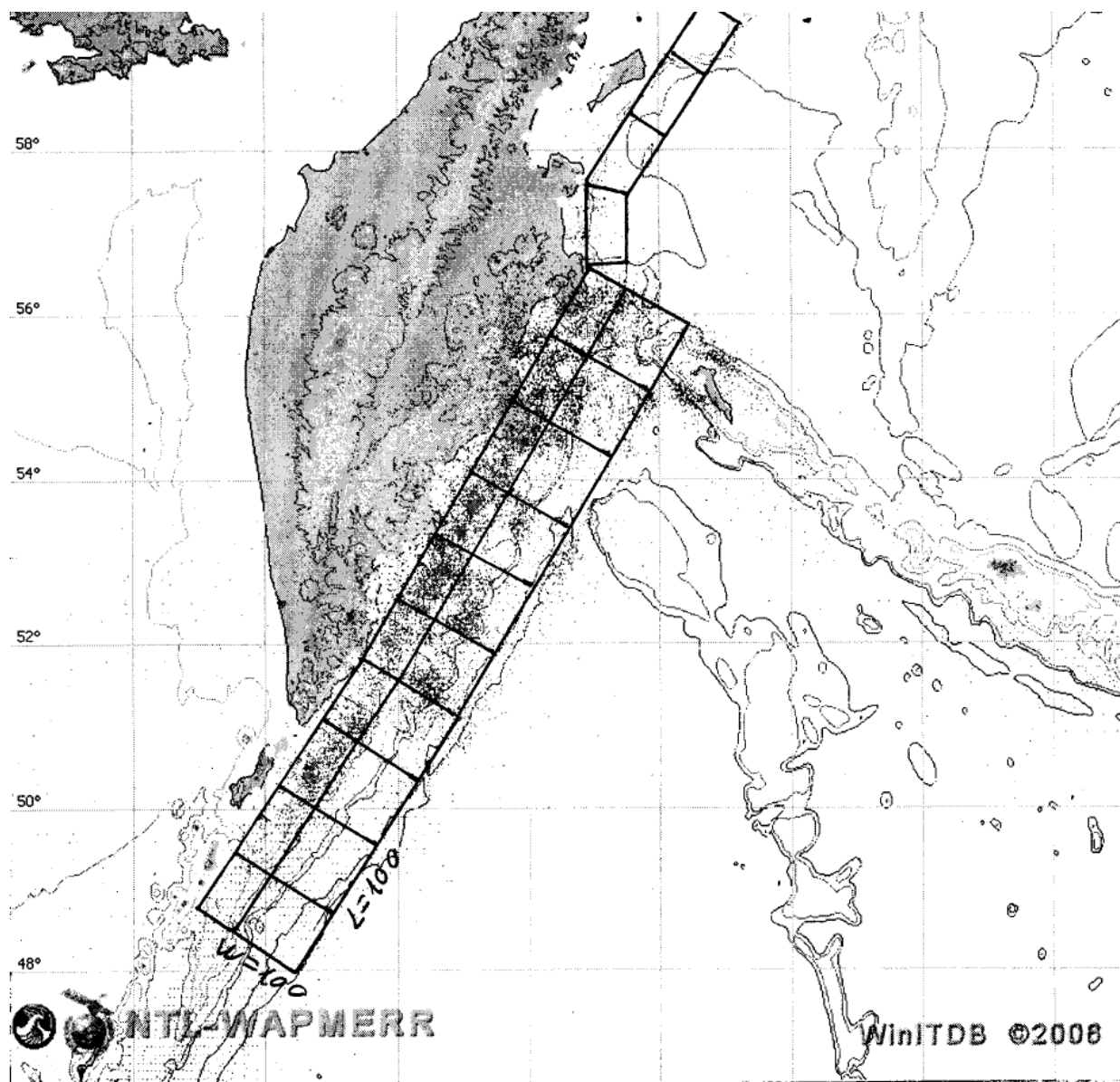


Рисунок 5. Возможный начальный вариант размещения очагов.

Широкую внешнюю полосу можно составить из элементарных очагов  $L=100$  и  $W=100$  км с углом наклона  $\delta=30^\circ$  и углом подвижки  $\lambda=90^\circ$  (т.е. пологий поддвиг под континент). Если взять модуль упругости  $\mu=5 \cdot 10^{20} \frac{H}{m^2}$ , то при подвижке  $D_0=1$  м получим сейсмический момент  $M_0=5 \cdot 10^{20} Hm$ , что по корреляционному соотношению К.Аки соответствует землетрясению с  $M_s=7.8$ . Следует заметить, что для такого

землетрясения подвижка в очаге в 1 метр слишком мала, так что для достижения правдоподобного результата предполагается определенная модификация параметров.

Что касается узкой внутренней полосы, то согласно клавишной поделе Лобковского здесь возможны очаги типа reverse dip-slip, для них предполагаемые значения параметров изменяются и  $\delta \approx 110-120^\circ$  при  $\lambda = 90^\circ$ . Параметр W (вертикальную протяженность) при этом придется сократить до 40-50 км.

Проведенные консультации с камчатскими сейсмологами показали целесообразность рассмотрения базового набора очагов цунамигенных землетрясений, состоящего из трех групп – с магнитудами, соответственно, 7.8, 8.2, 9.4 (см. рис. )

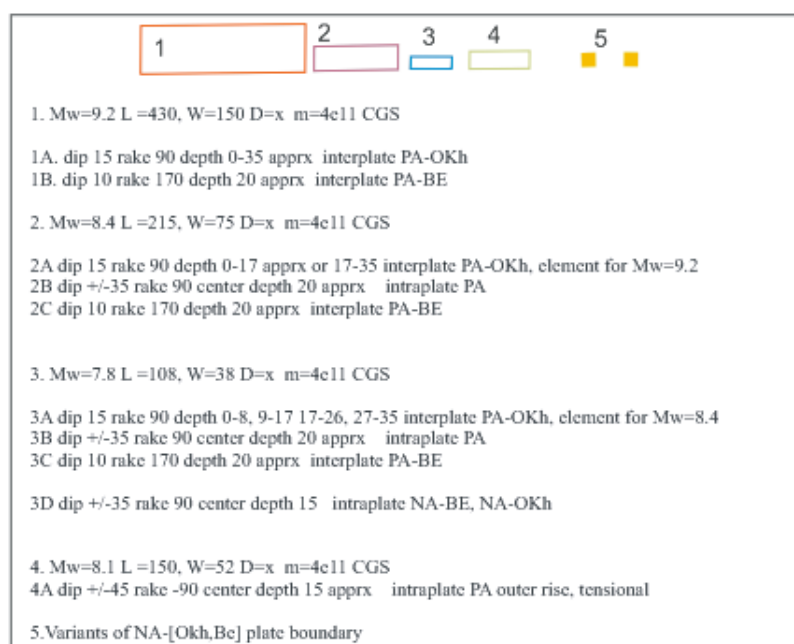
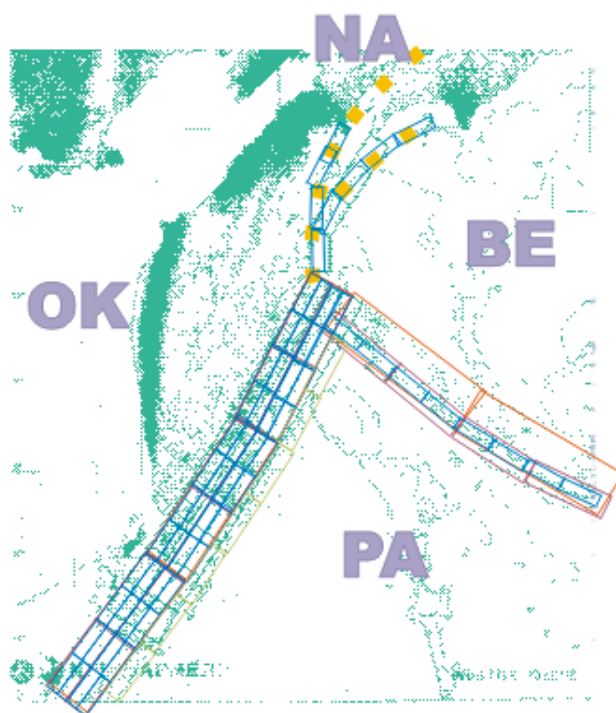


Рисунок 6.



### **3. Концепция предлагаемого решения**

Для решения поставленной задачи необходимо подобрать математическую модель и вычислительный алгоритм для получения точных результатов расчета распространения цунами. Для этого необходимо произвести серию расчетов на основе множества вариантов на реальной батиметрии и проанализировать полученные результаты. Также требуется разработать программное обеспечение для генерации начального возмущения свободной поверхности воды в открытом океане в районе землетрясения. Для правильного использования этого программного обеспечения нужно провести анализ истории землетрясений в заданном регионе и провести районирование океана на зоны потенциально опасных очагов землетрясений на основе этой истории и батиметрии региона. Полученные зоны будут использованы для проведения серийных расчетов с целью определения максимальных значений амплитуд волн приходящих на побережье. Для серийных расчетов необходимо определить привязку защищаемых пунктов к вычислительной сетке и, самое главное, разработать программное обеспечение для управления вычислительным модулем, модулем генерации начального возмущения и другими модулями.

Решение поставленной задачи включает в себя разработку стандартов взаимодействия между модулями системы, обмена информации между ними и структур хранения данных (результатов расчетов, параметров источников землетрясений, параметров расчета). Также немаловажно отметить, что система должна быть адаптирована к усвоению результатов вычислительного моделирования, эффективность которого в значительной степени определяется положенной в основу *математической моделью* и ее численной реализацией, а также выбранными для этого программными средствами.

Математические модели, на которых основана разрабатываемая система, представляются иерархией уравнений волновой гидродинамики с 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 граничные условия, батиметрия и возможный закон ее изменения (оползни, наносы, трещины, подвижки), рельеф суши, шероховатость, ветровое трение, коэффициенты турбулентного перемешивания и др. “Математические” параметры носят виртуальный характер и возникают в ходе построения математических моделей и вычислительных алгоритмов.

### **4. Предлагаемое решение**

Общая схема разрабатываемой системы изображена на рисунке 7:

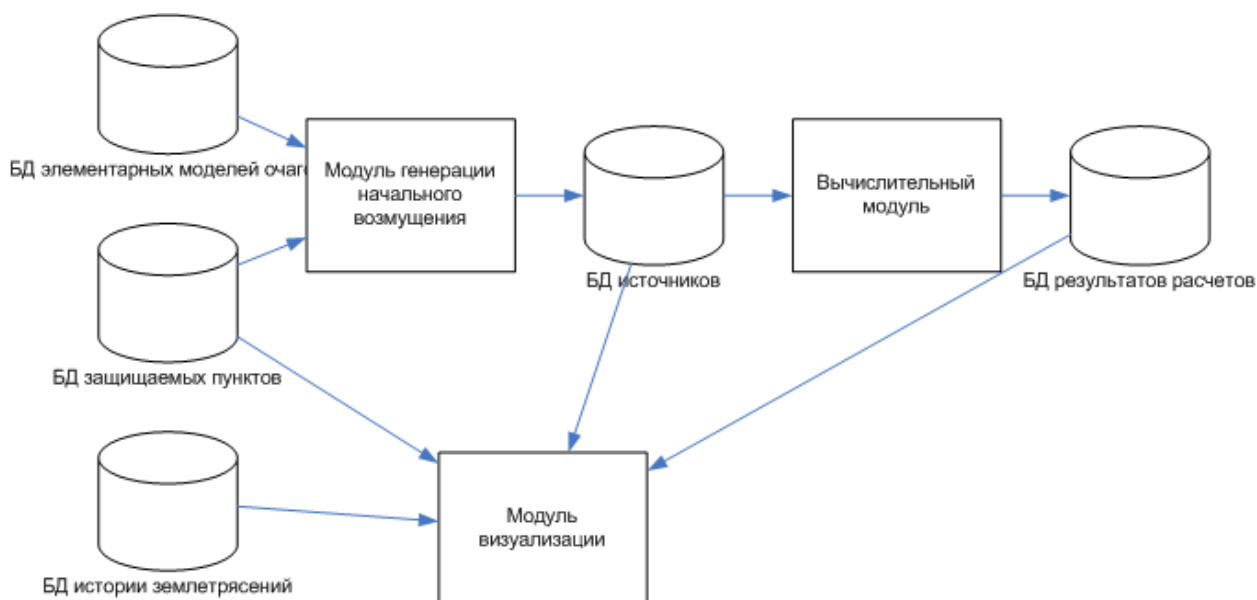


Рисунок 7. Схема обмена данными между модулями системы.

Разрабатываемая система должна включать в себя следующие компоненты.

#### ***База данных элементарных моделей очагов.***

Эта база данных предназначена для хранения данных об источниках землетрясений, полученных в результате районирования региона. Она также включает в себя данные о типах источников в рассматриваемом регионе.

#### ***Модуль генерации начального возмущения.***

Этот модуль предназначен для формирования базы данных источников на основе расчета смещений поверхности океана, возникающих в результате подводных цунамигенных землетрясений.

В качестве модели очагов землетрясений принимается модель, созданная В.К.Гусяковым и в последствии развитая в работах М.Окады (Okada, 1985). Эта модель характеризуется параметрами:

- Длиной разрыва  $L$  (км)
- Шириной разрыва  $W$  (км)
- Глубиной верхнего края разрыва  $d$  (км)
- Азимутном простирания разрыва  $TE$  (градусы)
- Углом падения разрыва  $DE$  (градусы)
- Направлением подвижки в плоскости разрыва  $LA$  (градусы)
- Величиной подвижки  $D$  (м)

Разрабатываемая система предназначена для обеспечения вычислений начальных смещений океана по заданным параметрам, вводимых пользователем или заданных по умолчанию.

Исходя из анализа сеймотектонической обстановки, в первой версии системы приняты (*по умолчанию*) следующие значения этих параметров:

- Значения параметров  $L$ ,  $W$  и  $D$  выводятся из корреляционных соотношений с магнитудой землетрясения  $M$ :

$$\text{Log } L = 0.5 M - 1.9,$$

$$\text{Log } W = 0.5 M - 2.2,$$

$$\text{Log } D = 0.5 M - 3.2.$$

- Инструментально определенная глубина гипоцентра считается соответствующей середине разлома.
- Углы  $DE$  и  $LA$  считаются фиксированными и равными  $45^\circ$  и  $90^\circ$  (возможно, будут подкорректированы на этапе анализа), соответственно.
- Угол  $TE$  принимается равным углу касательной к изобате батиметрии дна, проходящей через гипоцентр очага. Этот угол может быть подкорректирован пользователем непосредственно перед вычислением смещений свободной поверхности океана.

Результатом работы системы является поле смещений на сетке покрывающем участок сферы земного шара с 1-минутным шагом. Это поле смещений затем предоставляется системе верхнего уровня, осуществляющей расчет трансформации цунами.

#### ***База данных источников.***

Эта база данных предназначена для хранения возмущений свободной поверхности воды, полученных на основе расчетов по модулю генерации начального возмущения данных из базы данных элементарных источников.

На данный момент система состоит из:

- Блока ввода и корректировки параметров очага
- Блока визуализации
- Блока расчета смещений (вычислительный блок)
- Блока интерполяции

Остановимся подробнее на двух последних блоках:

Оба блока реализованы в виде единой статической библиотеки, написанной на языке Fortran 90

## 1. Блок расчета смещений (вычислительный блок).

Этот блок реализует расчет смещений свободной поверхности в декартовой системе координат на локальном участке региона в окрестности заданного эпицентра землетрясения. Блок основан на выше упомянутом алгоритме В.К.Гусякова. Входными данными вычислительного блока является ini-файл с параметрами:

DE - по умолчанию равен  $45^\circ$ ,

LA - по умолчанию равен  $90^\circ$ ,

TE,

M - магнитуда землетрясения,

FI - широта в градусах эпицентра землетрясения

PSI - долгота в градусах эпицентра землетрясения

На выходе блок дает массив смещений свободной поверхности океана на декартовой сетке с шагом, соразмерным эквиваленту одной минуты в километрах. Формат этого массива соответствует стандартному формату GRD-файла (формат DSAA).

## 2. Блок интерполяции.

Этот блок предназначен для интерполяции смещений, полученных с помощью вычислительного блока, на сетке в сферических координатах. В качестве входных данных используется сферические координаты эпицентра землетрясения, массив смещений, полученных вычислительным блоком и некоторые промежуточные параметры, характеризующие локальную окрестность эпицентра и вычислительную сетку в декартовых координатах.

Интерполяция выполняется следующим образом. Сначала сферические координаты минутной сетки в окрестности эпицентра пересчитываются в локальные декартовы координаты. Затем для каждой такой точки определяются 4 ближайшие точки вычислительной сетки, используемой в вычислительном модуле. И далее по формулам билинейной интерполяции определяются значения смещений в узлах минутной сетки в окрестности эпицентра. Вне окрестности эпицентра смещения полагаются равными нулю. Окрестность эпицентра определяется прямоугольником в локальных декартовых координатах (и, соответственно трапецией в сферических координатах) таким образом, чтобы абсолютные значения смещений на границах этого прямоугольника не превышали 5% от максимального абсолютного значения внутри окрестности.

На выходе блок интерполяции предоставляет массив смещений свободной поверхности на сферической сетке с минутным шагом во всем регионе.

### ***База данных истории землетрясений.***

Эта база данных включает в себя наиболее полную историю и информацию о происходивших землетрясениях в рассматриваемом регионе. Эта база данных используется при районировании региона, а также носит информационный характер для конечного пользователя.

### ***Вычислительный модуль.***

Этот модуль включает в себя вычислительный алгоритм распространения цунами. Этот алгоритм реализует разностный метод Мак-Кормака в рамках модели мелкой воды. Тип модели (линейная или нелинейная) будет определен позже на основе анализа предварительных расчетов. Ожидаемые высоты цунами от каждого элементарного очага вычисляются для набора точек, находящихся на достаточно глубокой воде, с тем, чтобы обеспечить применимость модели, затем полученные амплитуды пересчитываются на прибрежные точки с использованием широко известной формулы Грина.

### ***Батиметрия.***

Батиметрия поверхности дна является фиксированной для данной задачи и будет храниться в соответствующей базе данных и использоваться вычислительным модулем и модулем визуализации. Как уже было упомянуто выше, в качестве базовой используются численные значения глубин и высот, заданные на равномерной «одноминутной» сетке, покрывающей прямоугольный фрагмент от 153 до 173 градусов В.Д. и от 47 до 62 градусов С.Ш. В дальнейшем, при необходимости, в прибрежных районах может быть использована более детальная сетка, предоставленная Заказчиком. Такая сетка, в частности, может оказаться полезной при окончательном пересчете высот волн вблизи уреза по соответствующим значениям на 5-ти метровой (или близкой к ней) изобате. В качестве эмпирических соотношений для такого рода пересчета могут быть использованы формулы Грина, хорошо зарекомендовавшие себя в технологии ЯМА.

### ***Модуль визуализации.***

Этот модуль включает в себя средства и алгоритмы для графического представления батиметрии, результатов расчета, истории землетрясений, расположения источников.

### ***Управляющий модуль.***

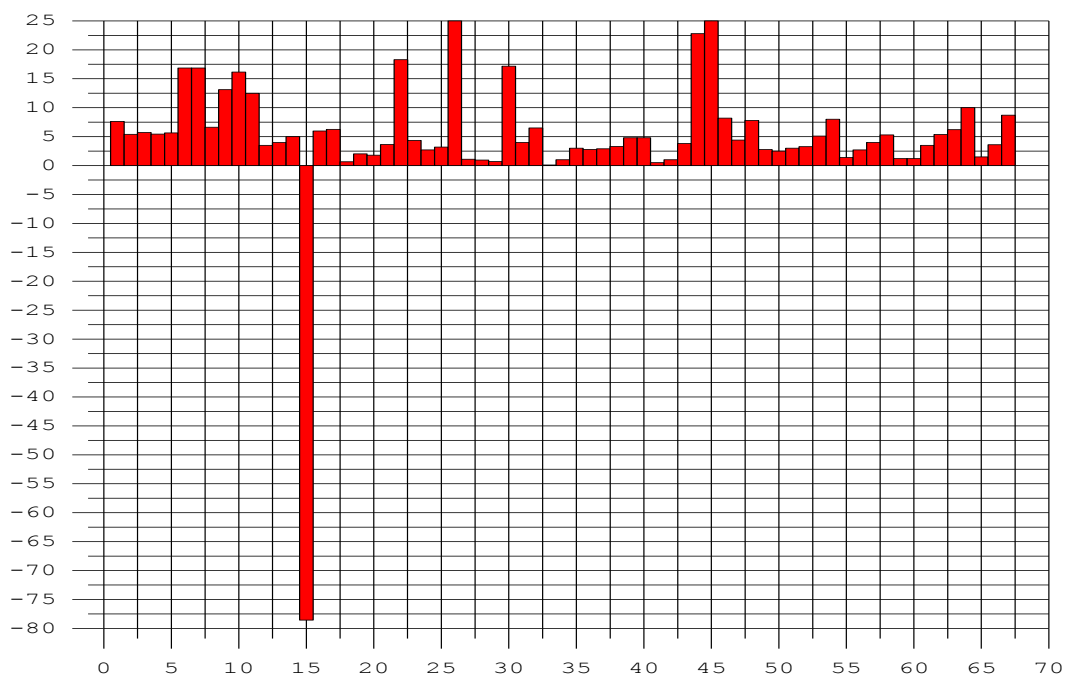
Управляющий модуль полностью обеспечивает управление модулями, взаимодействие и обмен информации между ними, внесение и запрос информации из баз



данных. Также управляющий модуль отслеживает нештатные ситуации, возникающие в процессе вычислений, и вносит (автоматически или через пользовательский интерфейс) необходимые изменения параметров вычислительного алгоритма. Этот модуль обеспечивает накопление результатов для последующей обработки и интерпретации, оперативно сообщает о важной оперативной информации, о динамике моделируемого явления или о ходе вычислений. Также он выполняет функции по обработке результатов моделирования, вычислению необходимых функционалов решения, обеспечивает качественную визуализацию.

### ***База данных результатов расчетов.***

Эта база данных предназначена для хранения результатов расчетов распространения цунами. Включает в себя процедуры получения максимальных значений высот волн в защищаемых пунктах. Предполагается, что эта база будет пополняться по мере выполнения серийных расчетов.



**Рисунок 8. Распределение глубин в узлах сетки, сопоставляемых защищаемым пунктам.**

### ***База данных защищаемых пунктов.***

Эта база данных содержит координаты защищаемых пунктов и их соответствия расчетной сетке. Координаты определяются Заказчиком (см. таблицу 1). На рисунке 8 изображено распределение глубин в узлах сетки, наиболее близких к защищаемым пунктам. Следует заметить, что в качестве базовой принята изобата, проходящая по глубинам порядка 5 метров. Как показывает рисунок, в некоторых случаях ближайшими к защищаемым пунктам являются узлы сетки с большими глубинами. Отрицательная глубина (т.е. – «суша» встречается только в пункте «Петропавловский маяк»).

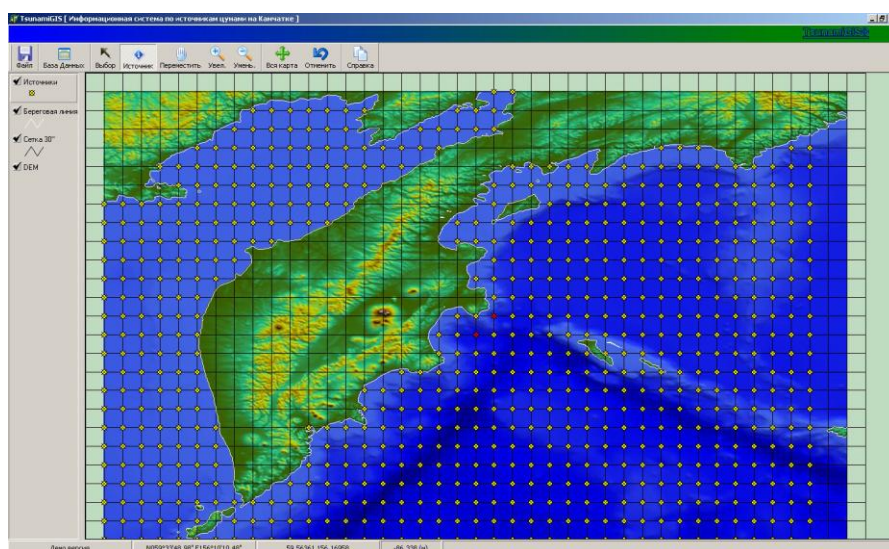
### ***Пользовательский интерфейс системы.***

Пользовательский интерфейс системы должен реализовывать следующие функции:

- Доступ к данным БД результатов расчетов.
- Доступ к данным БД элементарных моделей очагов (возможно, изменение этих данных).
- Доступ к данным БД истории землетрясений (только чтение).
- Доступ к данным БД защищаемых пунктов (только чтение).
- Обеспечение расчета источника (возможно, в том и композитного) в произвольной точке расчетной области, распространения цунами до береговой линии и получение максимальной высоты волн в любом из защищаемых пунктов.
- Визуализацию батиметрии, истории землетрясений, конечных результатов расчета и, возможно, некоторую визуализацию в процессе расчета.
- Организация серийных расчетов.
- Обеспечение (полуавтоматического) районирования региона.
- Пополнение баз данных.

### ***Информационная система по источникам возникновения цунами TsunamiGIS®***

Информационная система по источникам возникновения цунами является графической оболочкой над системой расчета первоначальных возмущений системой хранения и визуализации результатов проводимых расчетов. Общий вид интерфейса программы представлен на рисунке 9.



**Рисунок 9. Общий вид интерфейса программы**

Интерфейс реализован в среде Borland Delphi с использованием ряда библиотек визуализации картографической и трехмерной информации разработанных в ИВТ С РАН.

## Функциональные возможности картографического интерфейса

Функциональные возможности картографического интерфейса предоставляют пользователю:

- Возможность использования в качестве исходных материалов карт в стандартных картографических форматах,
- Возможность отображения многослойной картографической подложки,
- Функции панорамирования, масштабирования изображения,
- Инструменты просмотра информации по источнику,
- Инструмент выбора источника и проведения расчета по внешней модели начального возмущения.

В основном экране интерфейса пользователю доступна карта исследуемого региона с нанесенной сеткой источников. Имеется возможность масштабирования карты, а также интерактивное получения координат курсора и значения глубины. Пользователь имеет возможность отключения или включения слоев карты по-своему усмотрению.

Инструмент **Выбор** позволяет выбрать источник и через сплывающее меню вызвать диалог просмотра базы данных сопряженных с данным источником расчетов.

Инструмент **Источник** позволяет выбрать источник для проведения расчетов. После выбора источника появляется диалоговое окно (рисунок 10) с доступной вкладкой для ввода параметров расчета.

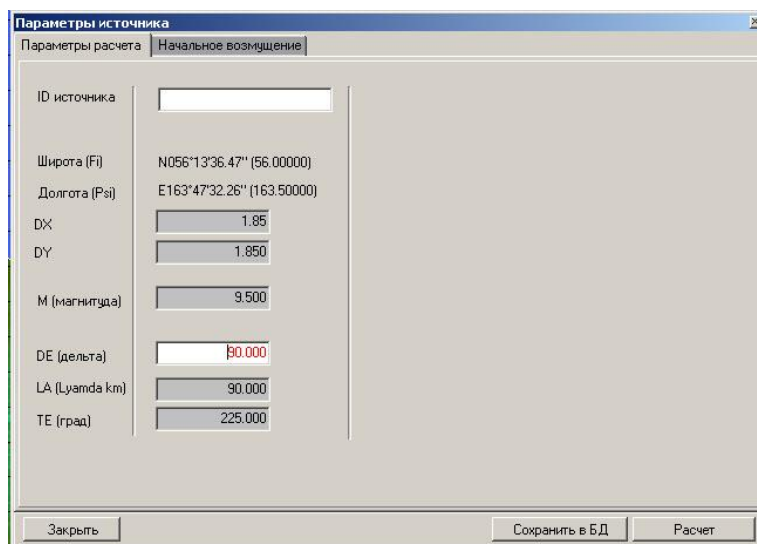
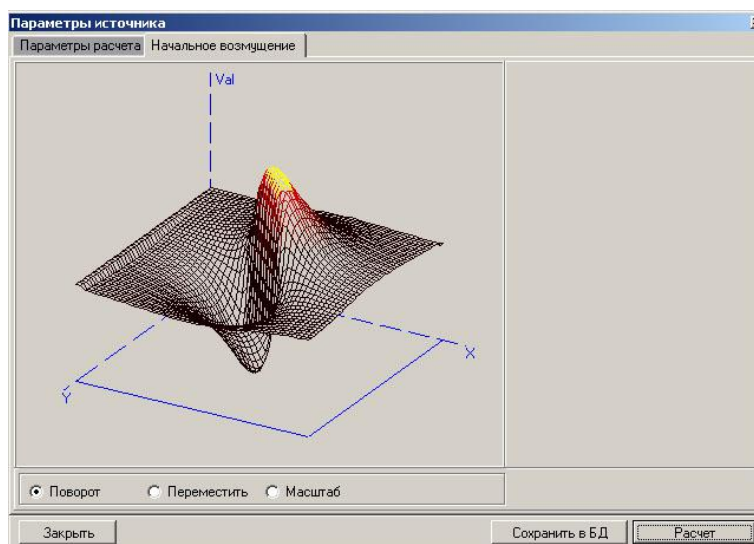


Рисунок 10. Диалоговое окно выбора источника цунамигенного землетрясения

После ввода параметров источника нажатием кнопки **Расчет** производится запуск внешней процедуры расчета матрицы начального возмущения.

После завершения расчета открывается вкладка результатов расчета. Результат представляется в виде 3х мерной поверхности (рисунок 11).



**Рисунок 11. Вкладка результатов расчета**

Имеется возможность масштабирования, поворота и перемещения графика в окне вывода.

Для корректировки расчета или проведения другого необходимо перейти на вкладку Параметры расчета и введя новые значения параметров произвести новый расчет.

После выполнения расчета открывается доступ к функции сохранения результатов в базе данных (кнопка Сохранить в БД). Сохраненные результаты расчетов далее доступны через инструмент ВЫБОР интерфейса.

Программный интерфейс является масштабируемой системой с возможностью быстрой переадаптации на другой исследуемый регион.

## **5. Этапы разработки системы**

Процесс разработки системы включает в себя этапы:

### *1) Постановка задачи.*

Заказчиком и руководителем проекта выполняется постановка задачи.

### *2) Анализ требований.*

Разработчиками проекта выполняется анализ и формирование требований к системе и согласование их с заказчиком.

### *3) Проектирование.*

Включает в себя проектирование системы в целом, выбор технологий, определение порядка разработки блоков системы, начало проектирования пользовательского интерфейса.

### *4) Реализация.*

Включает в себя последовательную реализацию блоков системы. Причем

реализация одного блока также может быть разбита на этапы, аналогичные процессу разработки системы.

5) *Тестирование.*

Проверка как созданных блоков, так и системы в целом.

Важно отметить, что процесс разработки является итерационным, на каждой итерации возможен возврат к любому этапу. Постановка задачи должна включать четкое описание характера решаемой задачи, определение степени детальности расчета, указание перечня требуемых функционалов, формы представления и объема результатов, в том числе и предназначенных для передачи в хранилища данных. Как правило, при этом требуется предварительное формирование набора защищаемых пунктов и объектов, географическая (картографическая) привязка соответствующих входных данных, составление цифровых карт (массивов), удовлетворяющих согласованным стандартам, и т.п.

Эти задачи должны решаться посредством выполнения некоторой технологической цепочки, на первом этапе которой выполняются пробные расчеты с использованием различных математических моделей различного уровня сложности (для выявления важности вкладов нелинейности, дисперсии, диссипации и т.п.). При этом рассматриваются разные варианты вычислительных алгоритмов (для достижения нужной точности) и апробируются доступные программные системы, так как особенности реализации алгоритмов порой оказывают серьезное влияние на характер результатов.

Только после сопоставления и тщательного анализа полученной информации, в том числе и с имеющимися натурными и историческими материалами, может быть выбрана модель (собственно уравнения, алгоритм и код), с помощью которой на последующих этапах будут получены результаты, предназначенные для практического использования. Характер решаемой задачи определяется особенностями и размерами охватываемой акватории, определяющими пространственно-временные масштабы задачи.

Для численного моделирования поведения волны цунами у побережья применяются модели, требующие более детальную батиметрию, чем для расчетов распространения по глубокому океану, знание параметров шероховатости, а также повышение порядка гидродинамической аппроксимации из-за накопления эффектов дисперсии и нелинейности.

Таким образом, можно указать следующие характеристики задач, влияющие на выбор математических моделей:

1. Механизм генерации.
2. Местонахождение источника.

3. Сопутствующие явления.
4. Специфика акватории (пространственные масштабы, степень неоднородности дна, включение островных систем)
5. Этап развития явления (пространственно-временные масштабы, вхождение в прибрежную зону)

Для обеспечения необходимой точности расчетов каждому защищаемому пункту были сопоставлены по 4 соседа, непосредственно прилегающих к пункту «справа» и «слева» вдоль соответствующей изобаты. Распределение глубин в этих точках изображено на рисунке 12. Вместе с «защищаемыми» пунктами эти точки определяют совокупность позиций размещения расчетных мареографов в последующих серийных расчетах. Характеристики этих точек приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

	name	Phi-0	Psi-0	phi	psi	i	j	D-ij
1.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	155.8357	50.22024	171	194	7.628
2.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	155.8023	50.18687	169	192	7.134
3.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	155.819	50.20356	170	193	9.606
4.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	155.8524	50.22024	172	194	11.670
5.	Okeanskij (o. Paramushir)	155.8	50.2	155.8691	50.22024	173	194	13.859
6.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	156.186	50.67075	192	221	5.449
7.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	156.1693	50.67075	191	221	10.587
8.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	156.1693	50.65406	191	220	14.586
9.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	156.186	50.65406	192	220	15.044
10.	g. Severo-Kuril'sk	156.2	50.68	156.2027	50.65406	193	220	15.677
11.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	156.4195	50.63737	206	219	5.716
12.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	156.3862	50.62069	204	218	5.324
13.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	156.4028	50.62069	205	218	12.204
14.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	156.4362	50.65406	207	220	12.773
15.	Babushkino (o. Shumshu)	156.42	50.63	156.4529	50.67075	208	221	17.411
16.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	156.653	50.87097	220	233	5.439
17.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	156.653	50.90434	220	235	13.422
18.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	156.653	50.88765	220	234	6.306
19.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	156.6697	50.85428	221	232	11.481
20.	GMS m. Lopatka	156.67	50.87	156.6864	50.85428	222	232	15.188
21.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.7039	51.53838	283	273	5.649
22.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.6706	51.53838	281	273	2.998
23.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.6872	51.53838	282	273	3.084
24.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.7206	51.53838	284	273	8.142
25.	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.7373	51.53838	285	273	10.191
26.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.0709	51.78865	305	288	16.855
27.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.0375	51.77197	303	287	12.245
28.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.0542	51.77197	304	287	19.262
29.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.0876	51.77197	306	287	42.006
30.	GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.1043	51.80534	307	289	15.189
31.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0709	51.78865	305	288	16.855
32.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0209	51.75528	302	286	9.693
33.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0209	51.77197	302	287	6.659
34.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0375	51.75528	303	286	17.058
35.	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0709	51.77197	305	287	27.862
36.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3211	52.12236	320	308	6.628
37.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3378	52.08899	321	306	31.659
38.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3211	52.10567	320	307	16.729
39.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3378	52.12236	321	308	14.086
40.	RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3545	52.12236	322	308	9.251
41.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4379	52.60623	327	337	13.122
42.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4879	52.57286	330	335	17.558
43.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4712	52.58954	329	336	19.041
44.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4712	52.60623	329	337	19.062
45.	RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4879	52.60623	330	337	18.097
46.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5046	52.43938	331	327	16.174
47.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5213	52.43938	332	327	18.684
48.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5379	52.43938	333	327	24.253
49.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5213	52.45606	332	328	18.176



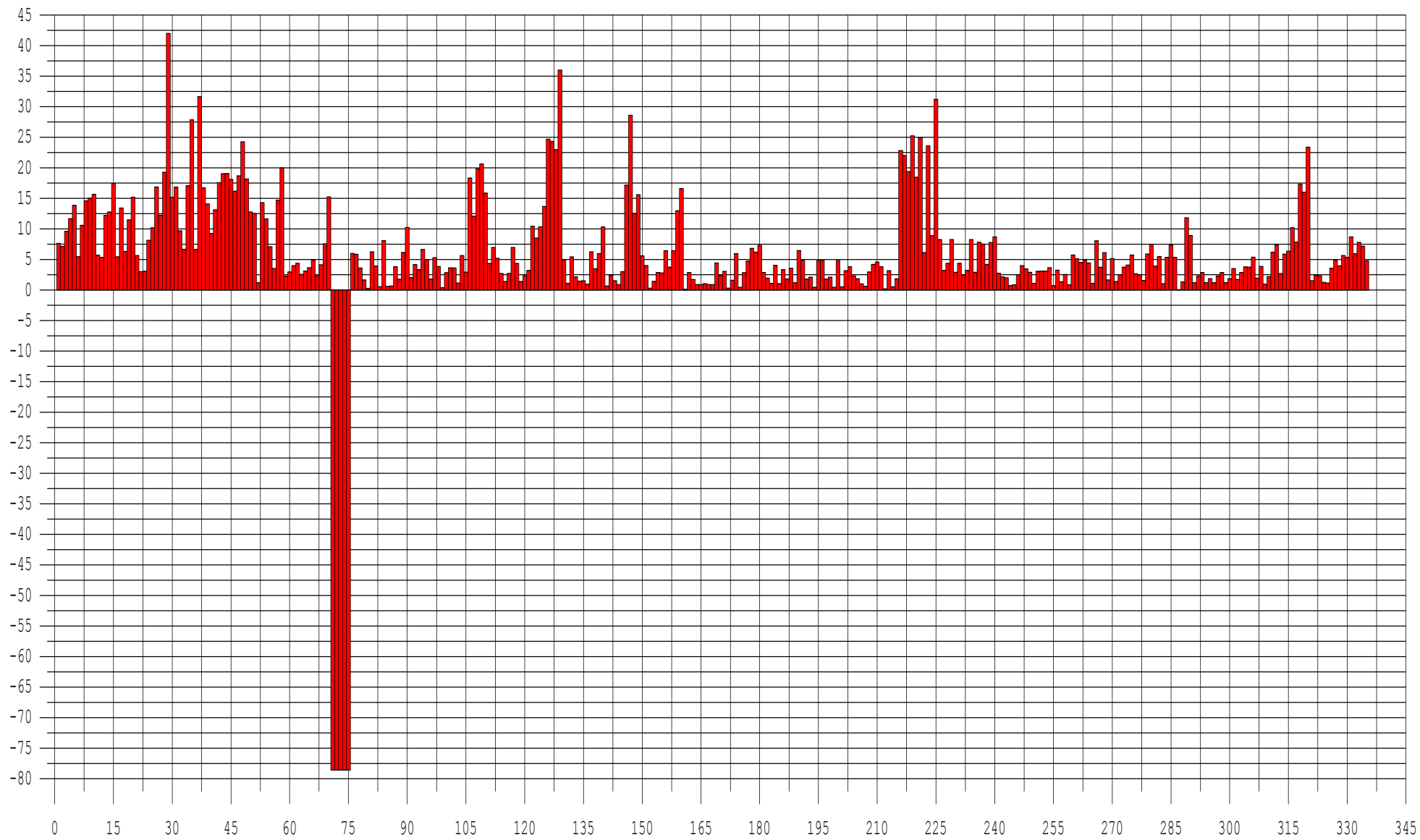
50.	Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5213	52.47275	332	329	12.767
51.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5713	52.33927	335	321	12.495
52.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5713	52.32258	335	320	1.201
53.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5713	52.3059	335	319	14.301
54.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5546	52.33927	334	321	11.650
55.	RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5546	52.35595	334	322	7.083
56.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.5713	52.77308	335	347	3.519
57.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.5379	52.7564	333	346	14.717
58.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.5546	52.7564	334	346	20.010
59.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.588	52.78977	336	348	2.277
60.	RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.588	52.80645	336	349	2.963
61.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.588	53.02336	336	362	3.975
62.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.5546	53.04004	334	363	4.369
63.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.5713	53.04004	335	363	2.555
64.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.6047	53.02336	337	362	3.094
65.	g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.6214	53.00667	338	361	3.650
66.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.7048	52.87319	343	353	4.924
67.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.6714	52.88988	341	354	2.343
68.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.6881	52.87319	342	353	4.131
69.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.7214	52.87319	344	353	7.554
70.	vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.7381	52.87319	345	353	15.228
71.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7048	53.02336	343	362	-78.577
72.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7048	53.02336	343	362	-78.577
73.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7048	53.02336	343	362	-78.577
74.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7048	53.02336	343	362	-78.577
75.	Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7048	53.02336	343	362	-78.577
76.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.8716	52.98999	353	360	5.974
77.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.8382	52.9733	351	359	5.844
78.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.8549	52.98999	352	360	3.603
79.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.8882	53.00667	354	361	1.647
80.	byvshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.9049	53.02336	355	362	0.264
81.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.2552	53.14016	376	369	6.252
82.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.2385	53.14016	375	369	3.943
83.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.2219	53.14016	374	369	0.544
84.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.2719	53.14016	377	369	8.081
85.	RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.2886	53.15684	378	370	0.576
86.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.5721	53.24027	395	375	0.659
87.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.5555	53.22358	394	374	3.822
88.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.5388	53.22358	393	374	1.765
89.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.5888	53.24027	396	375	6.155
90.	RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.6055	53.24027	397	375	10.234
91.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.8557	53.82425	412	410	2.033
92.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.8557	53.79088	412	408	4.167
93.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.8557	53.80756	412	409	3.331
94.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.8724	53.84093	413	411	6.624
95.	RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.8724	53.85762	413	412	4.982
96.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.8724	53.67408	413	401	1.801
97.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.9058	53.67408	415	401	5.293
98.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.8891	53.67408	414	401	3.841
99.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.8557	53.67408	412	401	0.383
100.	RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.8557	53.69077	412	402	2.843
101.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9224	53.97442	416	419	3.626
102.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9058	53.94105	415	417	3.613
103.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9058	53.95773	415	418	1.136
104.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9391	53.9911	417	420	5.618
105.	RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9558	54.00779	418	421	2.926
106.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.9558	53.34038	418	381	18.331
107.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.9892	53.32369	420	380	12.089
108.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.9725	53.34038	419	381	19.828
109.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.9391	53.34038	417	381	20.656
110.	RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.9391	53.35706	417	382	15.849
111.	GMS Semjachik	159.98	54.1	160.0058	54.1079	421	427	4.345
112.	GMS Semjachik	159.98	54.1	160.0058	54.09121	421	426	6.948
113.	GMS Semjachik	159.98	54.1	159.9892	54.07453	420	425	5.182
114.	GMS Semjachik	159.98	54.1	160.0058	54.12458	421	428	2.714
115.	GMS Semjachik	159.98	54.1	160.0058	54.14127	421	429	1.401
116.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160.0058	54.12458	421	428	2.714
117.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160.0058	54.09121	421	426	6.948
118.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160.0058	54.1079	421	427	4.345
119.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160.0058	54.14127	421	429	1.401
120.	Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160.0225	54.14127	422	429	2.338
121.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1735	54.57508	491	455	3.198
122.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1401	54.57508	489	455	10.433
123.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1568	54.57508	490	455	8.496
124.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1735	54.5584	491	454	10.333

125.	GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1735	54.54171	491	453	13.657
126.	Mys Kozlova	161.7	54.5	161.7073	54.49166	523	450	24.693
127.	Mys Kozlova	161.7	54.5	161.6739	54.49166	521	450	24.326
128.	Mys Kozlova	161.7	54.5	161.6906	54.49166	522	450	22.971
129.	Mys Kozlova	161.7	54.5	161.7239	54.49166	524	450	35.981
130.	Mys Kozlova	161.7	54.5	161.7406	54.50834	525	451	4.936
131.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7239	55.39266	524	504	1.102
132.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7573	55.35929	526	502	5.427
133.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7406	55.37597	525	503	2.152
134.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7239	55.40934	524	505	1.458
135.	RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7406	55.42603	525	506	1.516
136.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.8741	55.07564	533	485	0.950
137.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.9074	55.07564	535	485	6.249
138.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.8907	55.07564	534	485	3.469
139.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.8741	55.09232	533	486	5.951
140.	Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.8741	55.10901	533	487	10.319
141.	Selo Hajl'julja	162	58.15	162.0075	58.14572	541	669	0.675
142.	Selo Hajl'julja	162	58.15	162.0075	58.11235	541	667	2.406
143.	Selo Hajl'julja	162	58.15	162.0075	58.12903	541	668	1.523
144.	Selo Hajl'julja	162	58.15	162.0242	58.1624	542	670	0.894
145.	Selo Hajl'julja	162	58.15	162.0409	58.17909	543	671	2.991
146.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.1576	54.75862	550	466	17.171
147.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.1243	54.72525	548	464	28.574
148.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.141	54.74194	549	465	12.517
149.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.1576	54.77531	550	467	15.602
150.	Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.141	54.79199	549	468	5.586
151.	Selo Uka	162.14	57.92	162.1243	57.89544	548	654	3.991
152.	Selo Uka	162.14	57.92	162.1243	57.86207	548	652	0.282
153.	Selo Uka	162.14	57.92	162.1243	57.87875	548	653	1.412
154.	Selo Uka	162.14	57.92	162.1076	57.89544	547	654	2.854
155.	Selo Uka	162.14	57.92	162.0909	57.89544	546	654	2.787
156.	Mys Kamenist'j	162.15	54.83	162.1576	54.82536	550	470	6.441
157.	Mys Kamenist'j	162.15	54.83	162.1243	54.80868	548	469	3.756
158.	Mys Kamenist'j	162.15	54.83	162.141	54.82536	549	470	6.417
159.	Mys Kamenist'j	162.15	54.83	162.1743	54.84205	551	471	12.985
160.	Mys Kamenist'j	162.15	54.83	162.1743	54.85873	551	472	16.602
161.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.2911	58.54616	558	693	0.116
162.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.2744	58.51279	557	691	2.854
163.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.2911	58.52948	558	692	1.717
164.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.3078	58.56285	559	694	0.894
165.	Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.3244	58.57953	560	695	0.874
166.	Selo Pankara	162.34	58.6	162.3411	58.59622	561	696	1.036
167.	Selo Pankara	162.34	58.6	162.3078	58.56285	559	694	0.894
168.	Selo Pankara	162.34	58.6	162.3244	58.57953	560	695	0.874
169.	Selo Pankara	162.34	58.6	162.3578	58.59622	562	696	4.412
170.	Selo Pankara	162.34	58.6	162.3745	58.6129	563	697	2.350
171.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.4746	56.21023	569	553	3.044
172.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.4412	56.21023	567	553	0.309
173.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.4579	56.21023	568	553	1.577
174.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.4912	56.21023	570	553	5.962
175.	Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.5079	56.22692	571	554	0.435
176.	Selo Dranka	162.58	58.76	162.608	58.76307	577	706	2.839
177.	Selo Dranka	162.58	58.76	162.5746	58.74638	575	705	4.728
178.	Selo Dranka	162.58	58.76	162.5913	58.74638	576	705	6.811
179.	Selo Dranka	162.58	58.76	162.6247	58.76307	578	706	6.206
180.	Selo Dranka	162.58	58.76	162.6414	58.76307	579	706	7.288
181.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.8249	58.86318	590	712	2.877
182.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.7915	58.82981	588	710	1.928
183.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.8082	58.8465	589	711	1.077
184.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.8415	58.86318	591	712	4.047
185.	Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.8415	58.87987	591	713	1.046
186.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.8082	57.36151	589	622	3.342
187.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.7748	57.32814	587	620	1.809
188.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.7915	57.34483	588	621	3.562
189.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.8249	57.3782	590	623	1.187
190.	RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.8415	57.3782	591	623	6.448
191.	Ossora	163.08	59.3	163.0917	59.24694	606	735	4.833
192.	Ossora	163.08	59.3	163.0751	59.21357	605	733	1.794
193.	Ossora	163.08	59.3	163.0751	59.23026	605	734	2.098
194.	Ossora	163.08	59.3	163.1084	59.26363	607	736	0.462
195.	Ossora	163.08	59.3	163.1251	59.26363	608	736	4.818
196.	Poselok Ossora	163.09	59.3	163.0917	59.24694	606	735	4.833
197.	Poselok Ossora	163.09	59.3	163.0751	59.21357	605	733	1.794
198.	Poselok Ossora	163.09	59.3	163.0751	59.23026	605	734	2.098
199.	Poselok Ossora	163.09	59.3	163.1084	59.26363	607	736	0.462



200.	Poselok Ossora	163.09	59.3	163.1251	59.26363	608	736	4.818
201.	Selo Tymlat	163.2	59.48	163.2085	59.49722	613	750	0.515
202.	Selo Tymlat	163.2	59.48	163.2419	59.49722	615	750	3.166
203.	Selo Tymlat	163.2	59.48	163.2252	59.49722	614	750	3.812
204.	Selo Tymlat	163.2	59.48	163.2085	59.5139	613	751	2.320
205.	Selo Tymlat	163.2	59.48	163.1918	59.5139	612	751	1.827
206.	Selo Kostroma	163.21	59.17	163.2085	59.16352	613	730	1.003
207.	Selo Kostroma	163.21	59.17	163.2419	59.14683	615	729	0.605
208.	Selo Kostroma	163.21	59.17	163.2252	59.16352	614	730	2.955
209.	Selo Kostroma	163.21	59.17	163.1918	59.1802	612	731	4.191
210.	Selo Kostroma	163.21	59.17	163.1751	59.1802	611	731	4.593
211.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.2252	59.49722	614	750	3.812
212.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.2585	59.48053	616	749	0.194
213.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.2419	59.49722	615	750	3.166
214.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.2085	59.49722	613	750	0.515
215.	Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.1918	59.5139	612	751	1.827
216.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2419	57.59511	615	636	22.814
217.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2085	57.56174	613	634	22.021
218.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2252	57.57842	614	635	19.403
219.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2585	57.61179	616	637	25.237
220.	GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2585	57.62848	616	638	18.457
221.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.3586	56.27697	622	557	24.942
222.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.342	56.2436	621	555	6.132
223.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.3586	56.26029	622	556	23.588
224.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.3586	56.29366	622	558	8.898
225.	GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.3753	56.31034	623	559	31.226
226.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.4587	59.83092	628	770	8.246
227.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.4254	59.81424	626	769	3.215
228.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.442	59.83092	627	770	4.371
229.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.4754	59.83092	629	770	8.256
230.	Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.4754	59.84761	629	771	2.894
231.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.442	59.83092	627	770	4.371
232.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.4087	59.79755	625	768	2.449
233.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.4254	59.81424	626	769	3.215
234.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.4587	59.83092	628	770	8.246
235.	Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.4754	59.84761	629	771	2.894
236.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.6756	58.7297	641	704	7.810
237.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.6422	58.71301	639	703	7.526
238.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.6589	58.71301	640	703	4.193
239.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.6922	58.74638	642	705	7.771
240.	Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.7089	58.76307	643	706	8.697
241.	Selo Anapka	163.75	59.94	163.7756	59.94772	647	777	2.753
242.	Selo Anapka	163.75	59.94	163.7423	59.91435	645	775	2.167
243.	Selo Anapka	163.75	59.94	163.759	59.93103	646	776	2.009
244.	Selo Anapka	163.75	59.94	163.7923	59.9644	648	778	0.730
245.	Selo Anapka	163.75	59.94	163.809	59.98109	649	779	0.859
246.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.859	58.97998	652	719	2.528
247.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.8257	58.94661	650	717	3.981
248.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.8424	58.96329	651	718	3.450
249.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.8757	58.99666	653	720	2.906
250.	Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.8924	58.99666	654	720	1.094
251.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2761	59.9644	677	778	3.055
252.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2427	59.9644	675	778	3.101
253.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2594	59.9644	676	778	3.100
254.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2927	59.9644	678	778	3.649
255.	Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2927	59.98109	678	779	0.718
256.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.4429	60.09789	687	786	3.259
257.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.4095	60.09789	685	786	1.354
258.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.4262	60.09789	686	786	2.543
259.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.4595	60.09789	688	786	0.859
260.	Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.4762	60.0812	689	785	5.737
261.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.6597	59.99778	700	780	5.106
262.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.6264	59.99778	698	780	4.525
263.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.643	59.99778	699	780	4.919
264.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.6764	59.99778	701	780	4.427
265.	Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.6931	59.99778	702	780	1.113
266.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.8766	59.78087	713	767	8.054
267.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.8432	59.78087	711	767	3.735
268.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.8599	59.78087	712	767	6.109
269.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.8932	59.79755	714	768	1.643
270.	Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.9099	59.79755	715	768	5.139
271.	Selo Geka	165.25	60.08	165.2435	60.0812	735	785	1.396
272.	Selo Geka	165.25	60.08	165.2102	60.06452	733	784	2.498
273.	Selo Geka	165.25	60.08	165.2269	60.06452	734	784	3.755
274.	Selo Geka	165.25	60.08	165.2602	60.0812	736	785	4.093

275.	Selo Geka	165.25	60.08	165.2769	60.0812	737	785	5.736
276.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.5104	60.18131	751	791	2.675
277.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.4771	60.18131	749	791	2.513
278.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.4937	60.18131	750	791	1.559
279.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.5271	60.18131	752	791	5.892
280.	Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.5438	60.18131	753	791	7.458
281.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.744	60.24805	765	795	3.908
282.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.7106	60.23137	763	794	5.486
283.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.7273	60.24805	764	795	1.037
284.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.7606	60.24805	766	795	5.355
285.	Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.7773	60.24805	767	795	7.370
286.	Nikol'skoe	165.98	55.2	165.9775	55.17575	779	491	5.327
287.	Nikol'skoe	165.98	55.2	165.9441	55.20912	777	493	0.050
288.	Nikol'skoe	165.98	55.2	165.9608	55.19244	778	492	1.333
289.	Nikol'skoe	165.98	55.2	165.9942	55.15907	780	490	11.804
290.	Nikol'skoe	165.98	55.2	166.0108	55.15907	781	490	8.920
291.	Korf	166	60.37	166.0108	60.36485	781	802	1.187
292.	Korf	166	60.37	165.9775	60.34816	779	801	2.282
293.	Korf	166	60.37	165.9942	60.34816	780	801	2.857
294.	Korf	166	60.37	166.0275	60.38154	782	803	1.204
295.	Korf	166	60.37	166.0442	60.39822	783	804	1.849
296.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	166.0108	60.36485	781	802	1.187
297.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	165.9775	60.34816	779	801	2.282
298.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	165.9942	60.34816	780	801	2.857
299.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	166.0275	60.38154	782	803	1.204
300.	Selo Oljutorka	166.1	60.31	166.0442	60.39822	783	804	1.849
301.	Selo Telichiki	166.11	60.44	166.1109	60.41491	787	805	3.508
302.	Selo Telichiki	166.11	60.44	166.0776	60.41491	785	805	1.722
303.	Selo Telichiki	166.11	60.44	166.0942	60.41491	786	805	2.885
304.	Selo Telichiki	166.11	60.44	166.1276	60.41491	788	805	3.789
305.	Selo Telichiki	166.11	60.44	166.1443	60.41491	789	805	3.750
306.	Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2611	60.44828	796	807	5.365
307.	Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2277	60.44828	794	807	1.961
308.	Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2444	60.44828	795	807	3.859
309.	Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2777	60.46496	797	808	0.936
310.	Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2944	60.46496	798	808	2.189
311.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.0951	60.29811	846	798	6.197
312.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.0617	60.28142	844	797	7.365
313.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.0784	60.29811	845	798	2.689
314.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.1118	60.31479	847	799	5.867
315.	GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.1118	60.33148	847	800	6.364
316.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.5788	54.79199	875	468	10.194
317.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.5455	54.82536	873	470	7.834
318.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.5621	54.80868	874	469	17.337
319.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.5955	54.79199	876	468	15.993
320.	Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.6122	54.79199	877	468	23.371
321.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.2135	60.54839	973	813	1.511
322.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.1802	60.54839	971	813	2.426
323.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.1968	60.54839	972	813	2.332
324.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.2302	60.54839	974	813	1.248
325.	Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.2469	60.54839	975	813	1.152
326.	Apuka	169.62	60.39	169.6138	60.43159	997	806	3.572
327.	Apuka	169.62	60.39	169.5805	60.43159	995	806	4.857
328.	Apuka	169.62	60.39	169.5972	60.43159	996	806	3.952
329.	Apuka	169.62	60.39	169.6305	60.41491	998	805	5.647
330.	Apuka	169.62	60.39	169.6472	60.41491	999	805	5.358
331.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7665	61.2158	1186	853	8.688
332.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7331	61.2158	1184	853	5.933
333.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7498	61.2158	1185	853	7.789
334.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7832	61.23248	1187	854	7.160
335.	GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7998	61.24917	1188	855	4.783



**Рисунок 12. Распределение глубин в узлах сетки, сопоставляемых защищаемым пунктам и их соседям.**

Следующая серия рисунков 13-21 представляет контуры береговой линии исследуемой области (тонкая черная линия), прилегающую 5-ти метровую изобату (тонкая синяя линия), 55 сеточную аппроксимацию (маленькие красные крестики), защищаемые пункты в «исходных» координатах (лиловые кружки с большими синими цифрами внутри), их сеточные аппроксимации (зеленые треугольники с маленькими оранжевыми цифрами внутри), их соседи (маленькие коричневые кружочки), а также «спорные» узлы, требующие уточнения (большие красные окружности). Точки на рисунках пронумерованы в соответствии с таблицей 1.

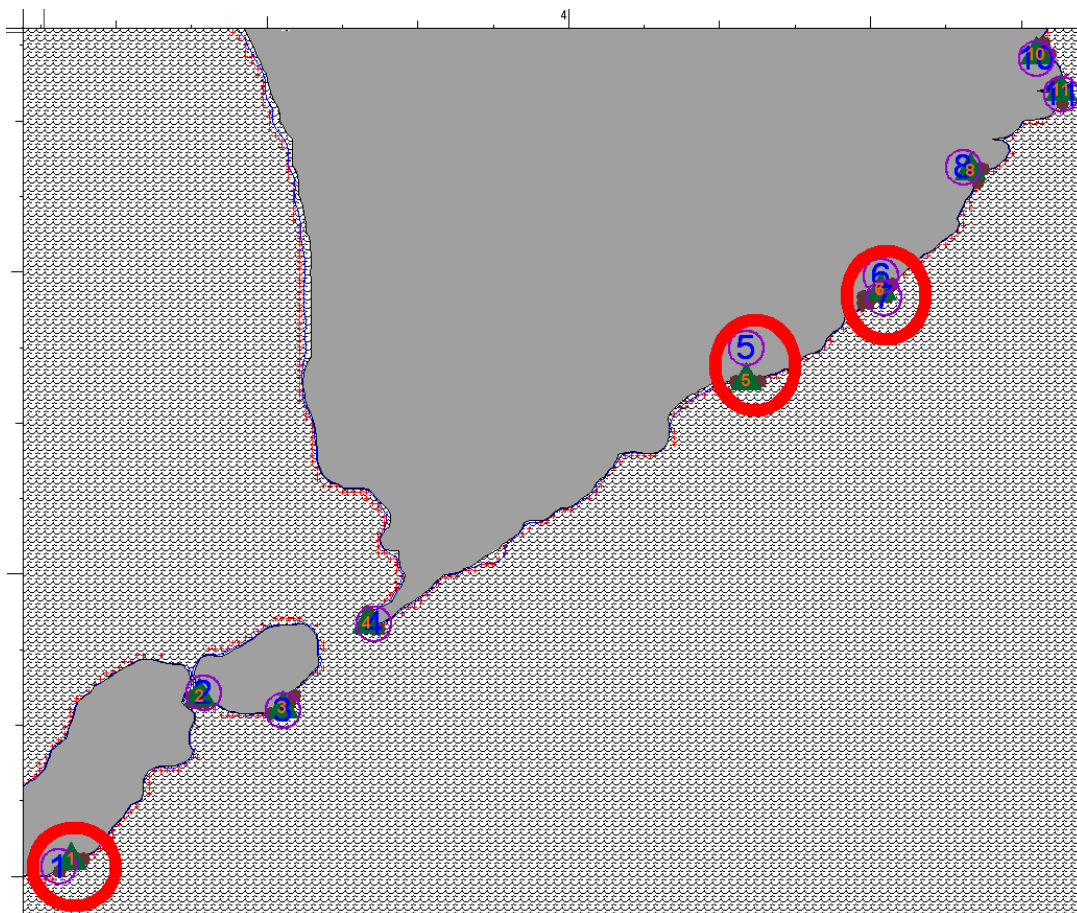


Рисунок 13.

На рисунке 22 изображены (крупные бежевые кружки) точки, в которых размещались расчетные мареографы для первых тестовых вычислительных экспериментов.

## **6. О выборе математических моделей.**

Как уже было отмечено, выбор адекватной математической модели зависит от специфики решаемой задачи, специфики акватории, в которой решается задача и, что не менее важно, этапа развития явления в рамках одной задачи и одной акватории.

Использование наиболее полных моделей не всегда целесообразно не только в силу серьезного роста требуемых вычислительных ресурсов и усложнения необходимых алгоритмов, но и в силу невозможности адекватного определения всех входных параметров таких моделей.

К настоящему времени накоплен опыт, показывающий, что распространение волн цунами сейсмического происхождения можно с достаточной точностью рассчитывать в рамках уравнений мелкой воды первого и второго приближений.

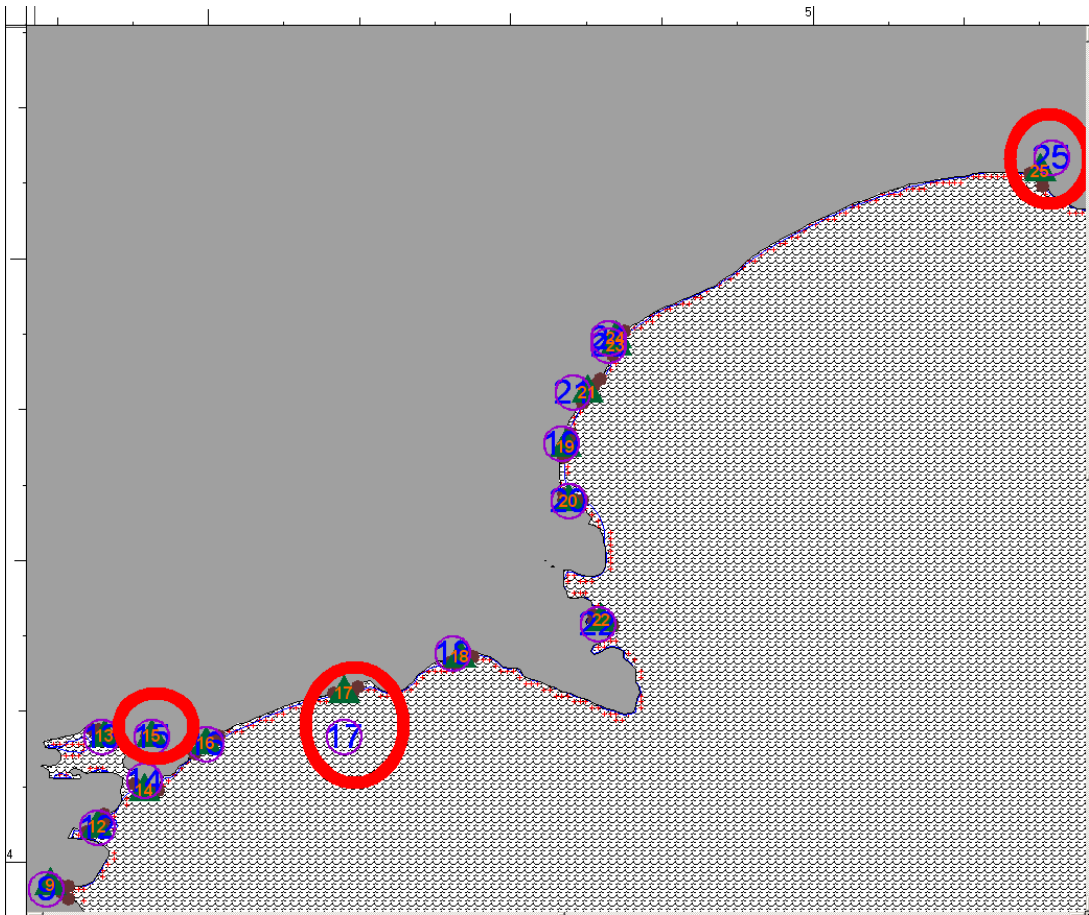


Рисунок 14.

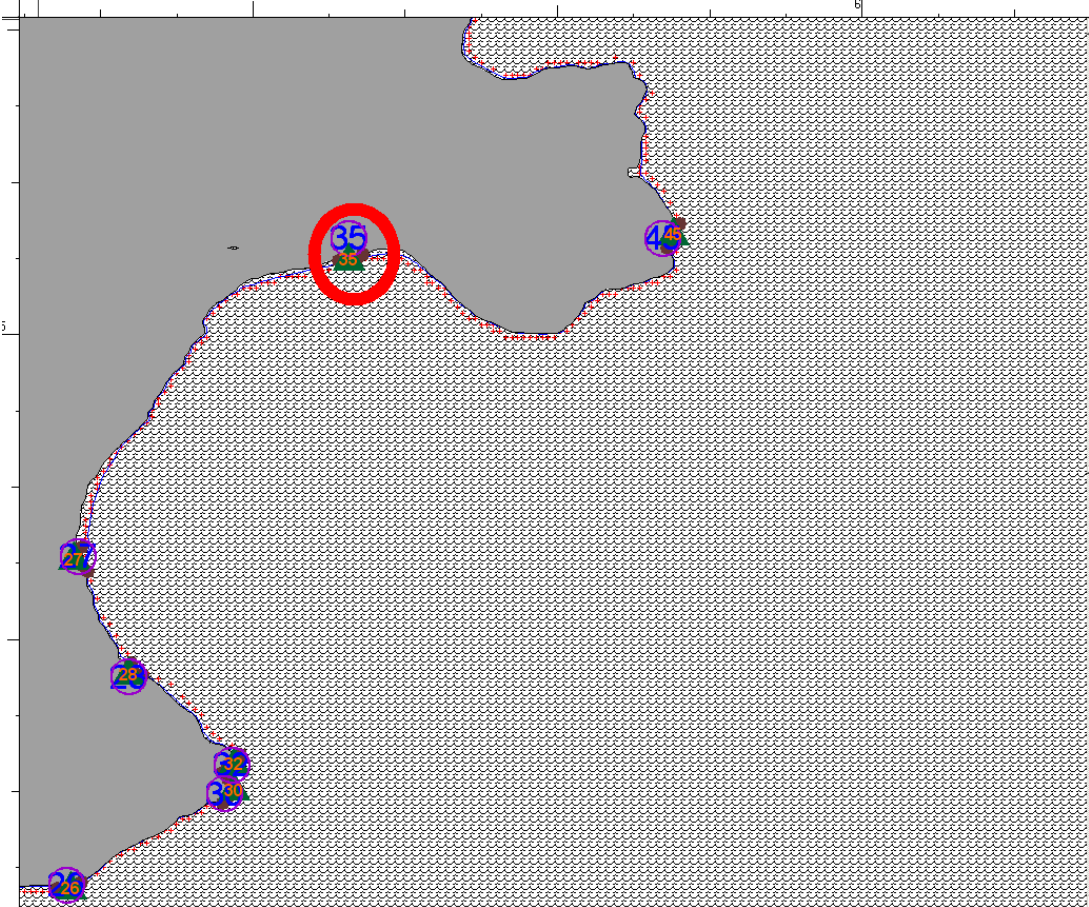


Рисунок 15.



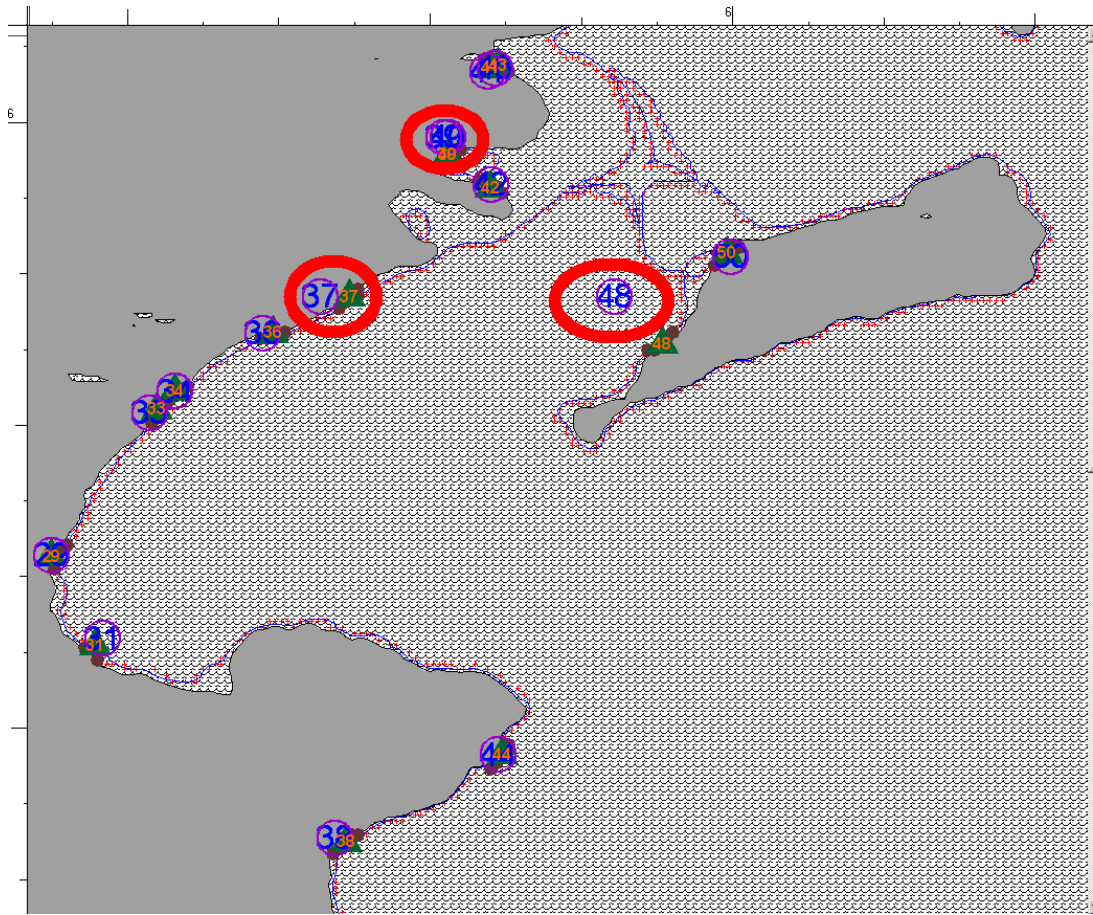


Рисунок 16

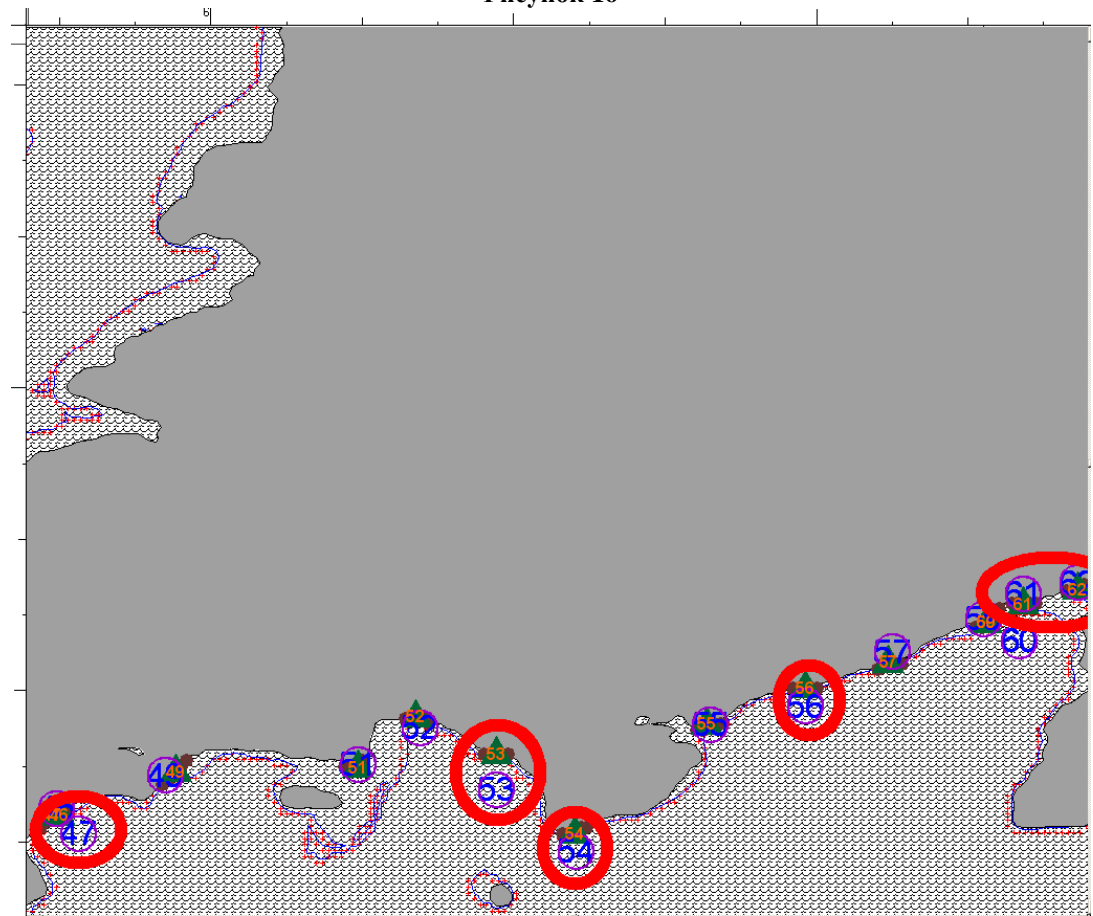


Рисунок 17.

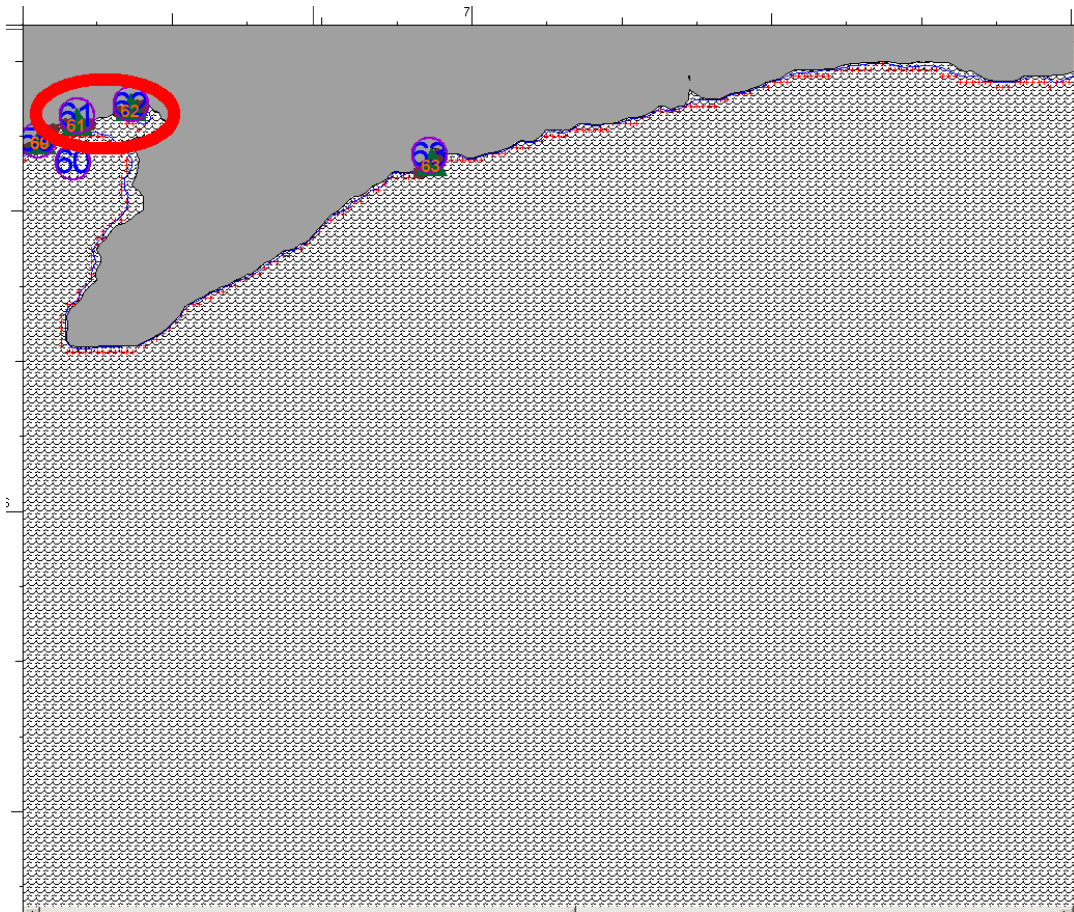


Рисунок 18.

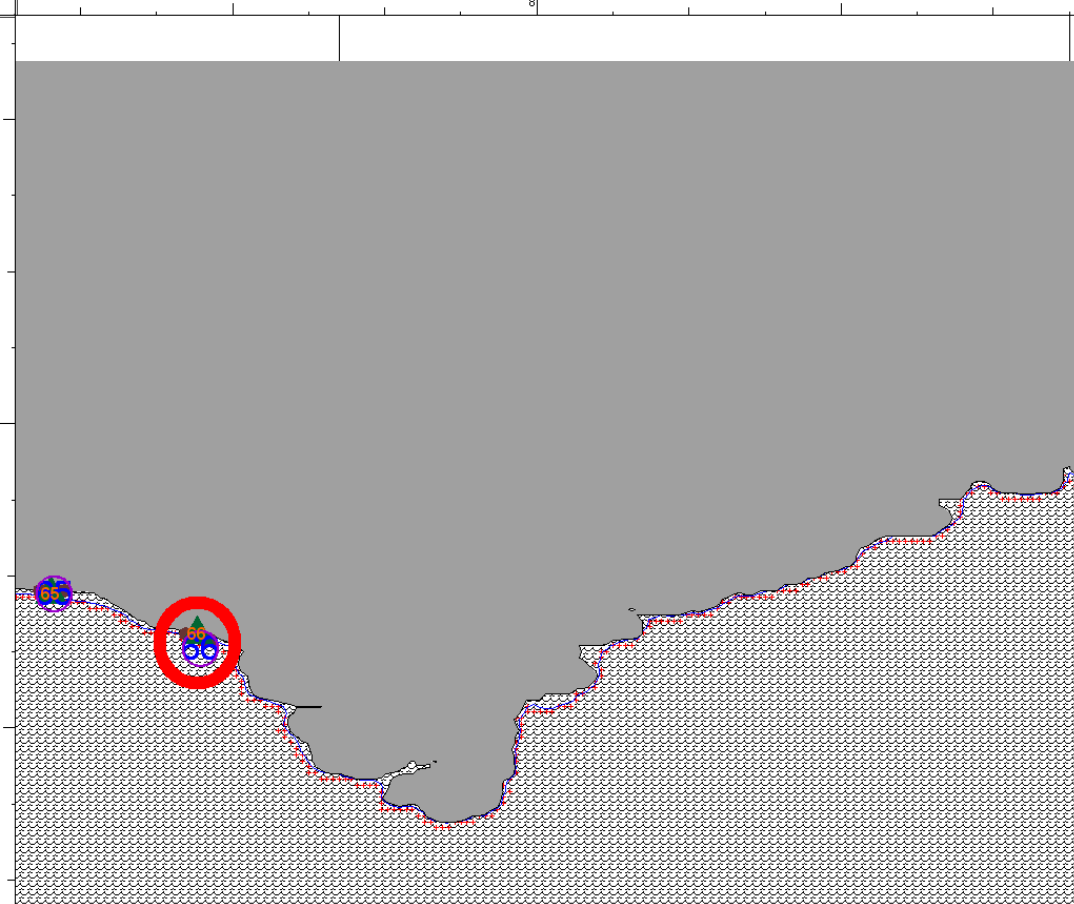


Рисунок 19.



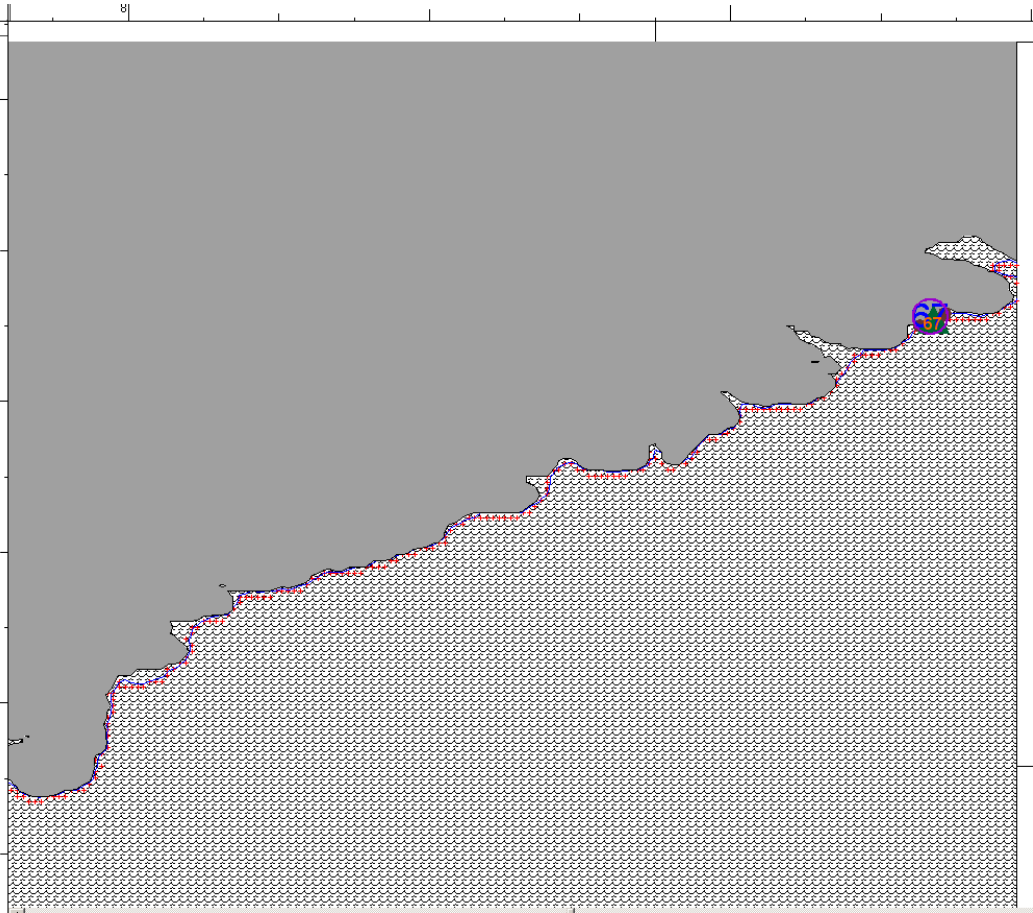


Рисунок 20.

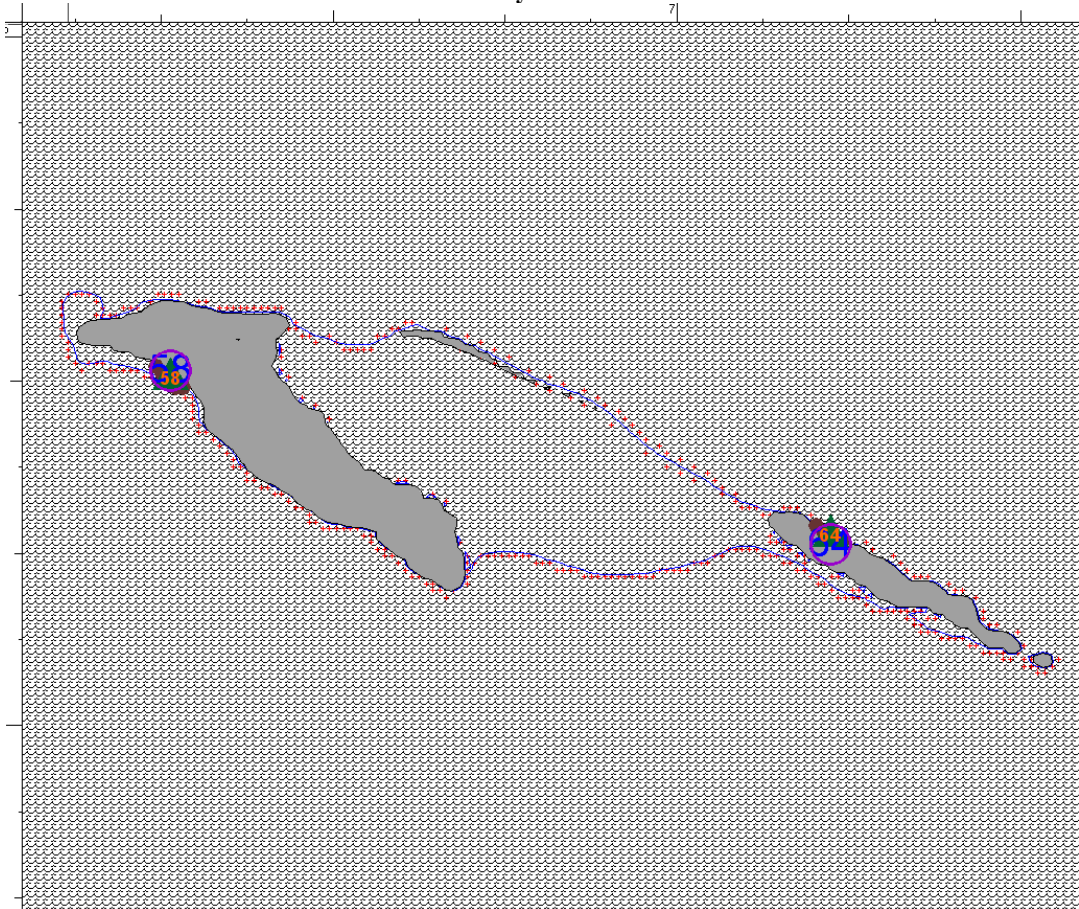
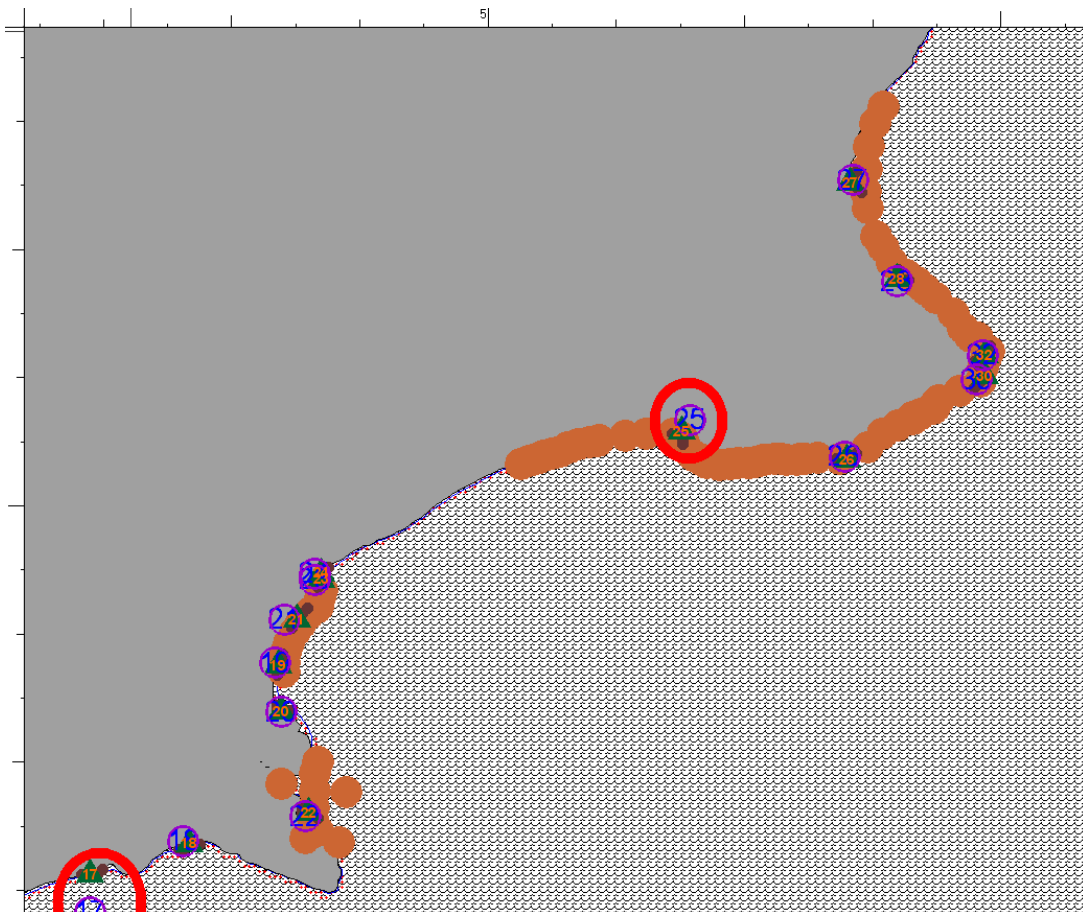


Рисунок 21





**Рисунок 22. Размещение точек для пробных вычислительных экспериментов.**

При этом замечено, что на разных пространственно-временных масштабах целесообразно использовать модели различного порядка гидродинамической аппроксимации. Так, распространение цунами по глубокому океану допустимо рассчитывать в рамках линейных уравнений первого и второго порядков. Однако в этих уравнениях необходимо учитывать сферичность земли и влияние сил Кориолиса.

Учет дисперсии необходим при распространении волн на значительные расстояния.

Трансформацию волны вблизи берега, а также взаимодействие с прибрежными конструкциями следует моделировать в рамках нелинейно-дисперсионных моделей с привлечением трехмерных моделей для уточнения вертикальной структуры потока.

Определение зоны затопления сухого берега, а также вычисление максимальных высот волн традиционно проводится в рамках нелинейных уравнений мелкой воды.

Опыт авторов настоящего отчета, основанный на решении как исследовательских, так и прикладных задач цунами, позволяет утверждать, что даже самые простые математические модели позволяют вполне адекватно оценить начальный этап развития цунами, в то время как последующие эффекты требуют тщательной работы для своего адекватного воспроизведения.

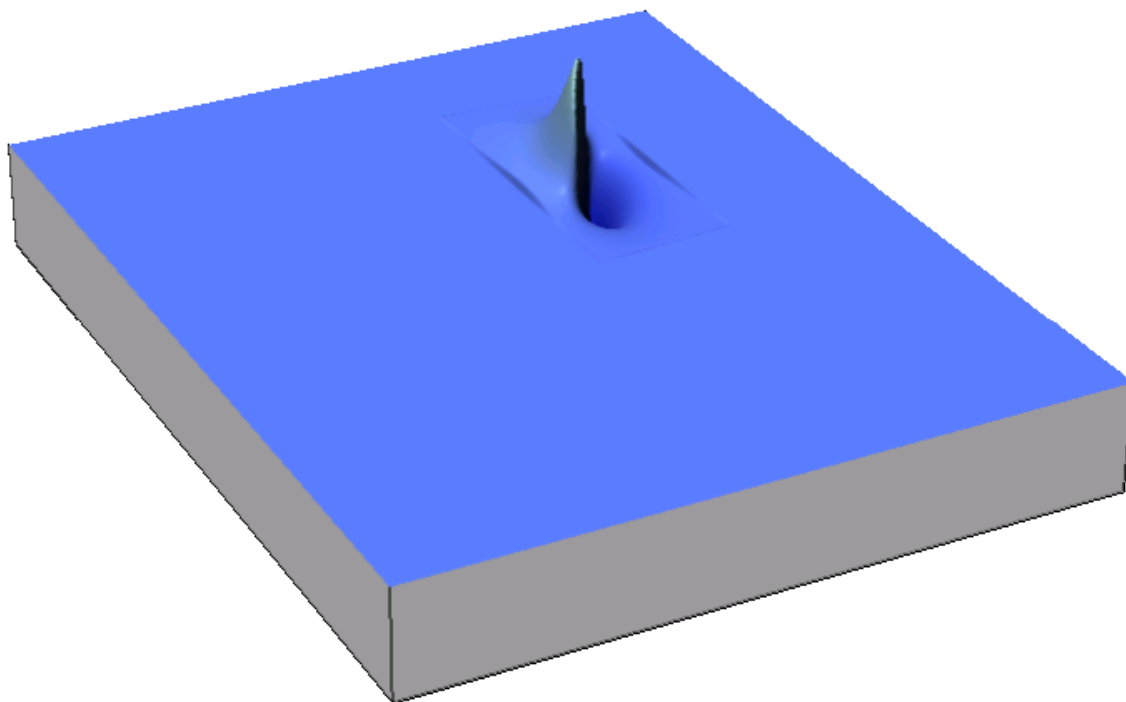
Правильный выбор модели для конкретной задачи может быть сделан только в результате предварительных множественных расчетов задач, близких по содержанию к

прикладным, с использованием различных моделей, различных алгоритмов на различных сетках.

В итоге может быть выполнено районирование защищаемых акваторий и побережья по математическим моделям, способным обеспечить адекватность результатов для каждого из типов производственных задач. Одновременно должно выполняться районирование по допустимым типам входных данных – определение детальности сетки для обеспечения нужной точности и степени допустимой модификации границ. А также районирование по другим «гидродинамическим» параметрам – шероховатости, характерном ветровом трении и т.п.

Таким образом, на первом этапе выполнения работ, разработан ряд основополагающих требований к математическим моделям, описывающим распространение волн цунами, и, предполагаемым к использованию в составе алгоритмического обеспечения процедур оценки характеристик цунами при принятии решений об угрозе цунами и отмене состояния угрозы цунами. В соответствии с Техническим заданием на первом этапе проекта выполнялись также работы по разработке структуры системы и ее программного наполнения для решения предусмотренных Контрактом задач численного моделирования критических характеристик волн цунами.

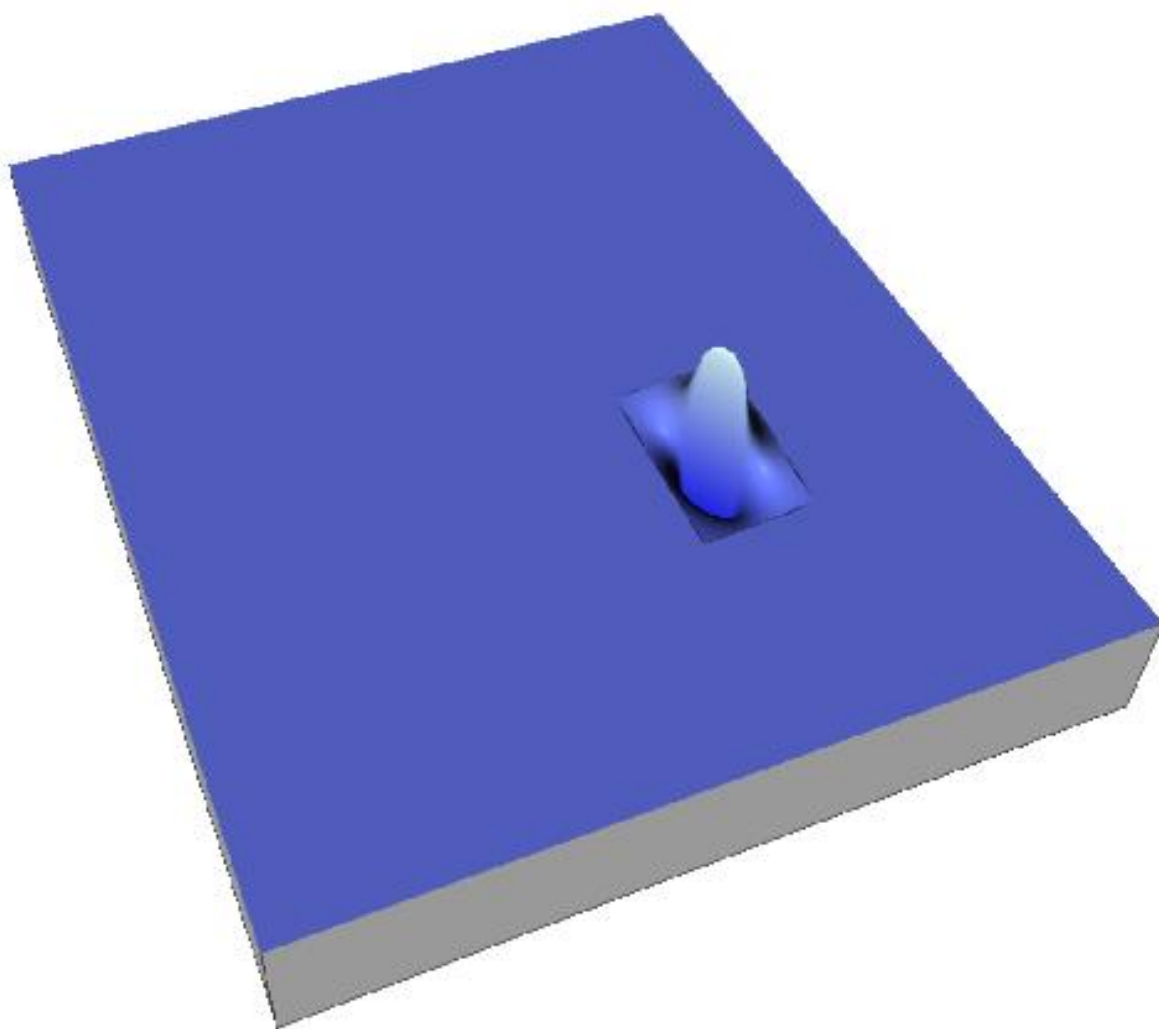
## **7. О результатах предварительных вычислительных экспериментов.**



**Рисунок 23. Начальное возвышение свободной поверхности, порожденное сейсмическим источником с гипоцентром в точке с координатами (55°С.Ш., 166°В.Д.)**

Первые вычислительные эксперименты выполнялись с целью оценки особенностей области моделирования, выбора оптимальных расчетных параметров, определения математической модели или совокупности математических моделей, способных обеспечить необходимую точность результатов на заданной батиметрии и с помощью имеющихся вычислительных устройств (мощный 4-х ядерный вычислительный сервер, созданный в рамках государственного контракта 18н-06).

В качестве источников начальных возмущений (рисунки 23, 24) использовались поля, рассчитанные для модельных цунамигенных землетрясений, гипоцентра которых были расположены в точках ( $55^{\circ}$ С.Ш.,  $166^{\circ}$ В.Д.) и ( $55.7^{\circ}$  С.Ш.,  $159.5^{\circ}$  В.Д.). Первая группа расчетов проводилась для источника с  $W = 100$  км., а вторая с увеличенным в два раза этим параметром  $W = 200$  км.



**Рисунок 24. Начальное возвышение свободной поверхности, порожденное сейсмическим источником с гипоцентром в точке с координатами ( $55.7^{\circ}$  С.Ш.,  $159.5^{\circ}$  В.Д.)**

Расчеты проводились с помощью вычислительной системы «НЕРЕУС», реализующей – модель теории мелкой воды в нелинейном и линейном приближениях в сферической системе координат. Вычислительные алгоритмы, как и было отмечено выше базируются на классическом алгоритме схемы МакКормака, модифицированной с целью обеспечения

возможности управления процедурами фильтрации высокочастотных осцилляций, порождаемых спецификой компьютерных вычислений.

С целью определения особенностей аппроксимации нелинейных конвективных членов и влияния этих особенностей на точность расчета высот волн цунами в приграничных точках были рассмотрены два варианта такой аппроксимации – в дивергентной и в НЕдивергентной формах. Достоинства дивергентных схем, обеспечивающих автоматическое сохранение соответствующих законов сохранения приводит, к сожалению, к серьезным трудностям, связанным с делением на малые величины при определении скоростей течения по вычисленным значениям потоков. В этом случае в прибрежных зонах приходится делить поток на малые значения полной глубины. Этих неприятностей лишены недивергентные схемы, требующие для выполнения основных балансных соотношений достаточно детальной сетки (с малым пространственным шагом). На рисунках 25 – 28 изображены результаты расчетов, где Здесь черная линия соответствует *линейной* модели, синяя – *нелинейной* модели с *недивергентной* аппроксимацией нелинейных членов, красная – *нелинейной* модели с *дивергентной* аппроксимацией.

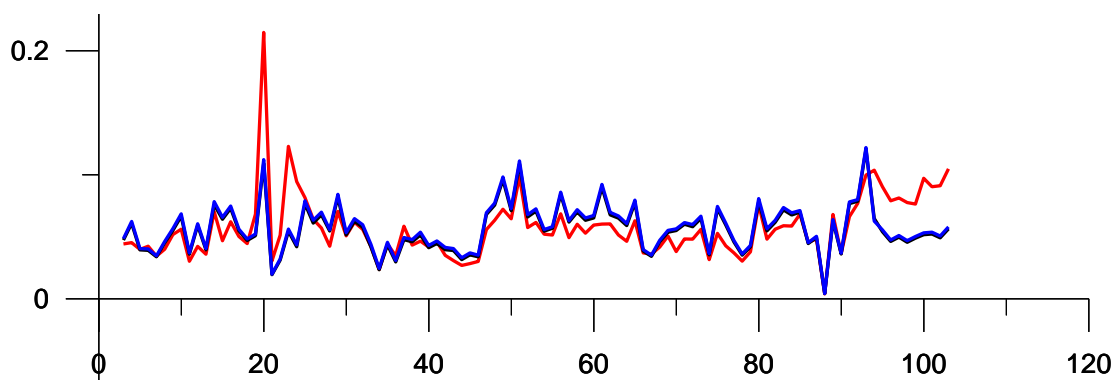


Рисунок 25. Распределение «высот волн» в расчетных мареографах для источника с гипоцентром в точке (55°С.Ш., 166°В.Д.),  $W = 100$  км.

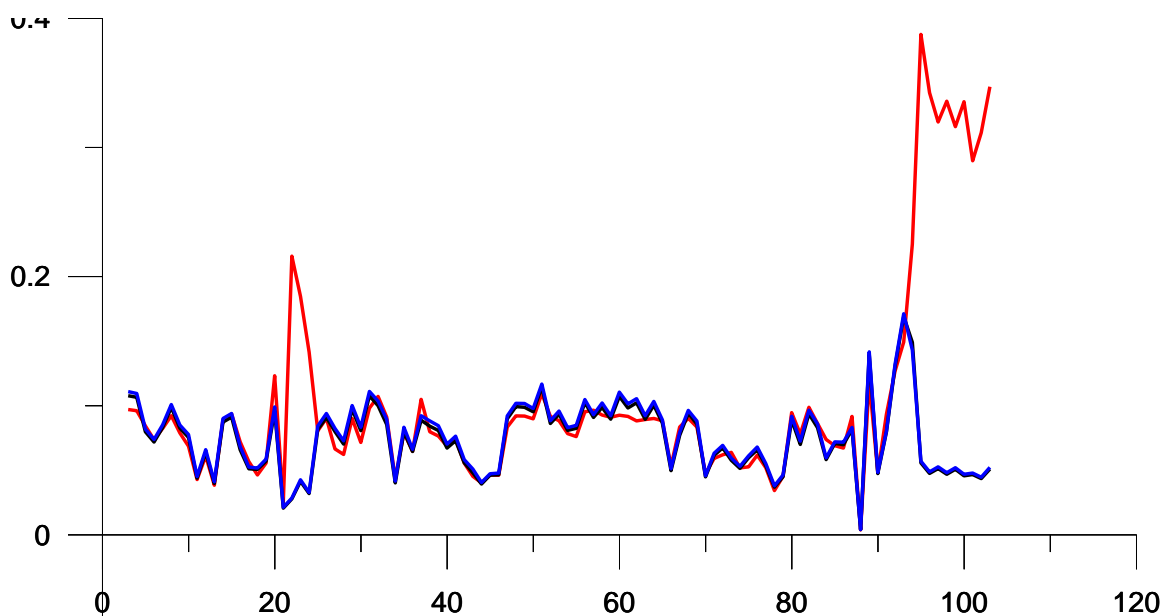


Рисунок 26. Распределение «высот волн» в расчетных мареографах для источника с гипоцентром в точке (55°С.Ш., 166°В.Д.),  $W = 200$  км.

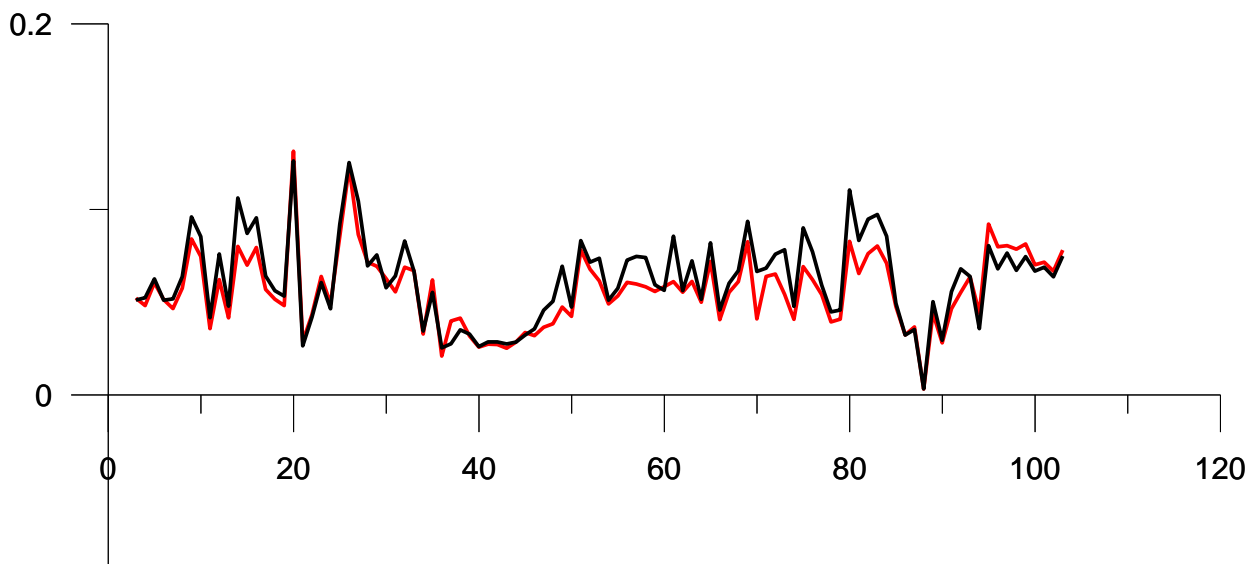


Рисунок 27. Распределение «высот волн» в расчетных мареографах для источника с гипоцентром в точке (55.7° С.Ш., 159.5° В.Д.),  $W = 100$  км.

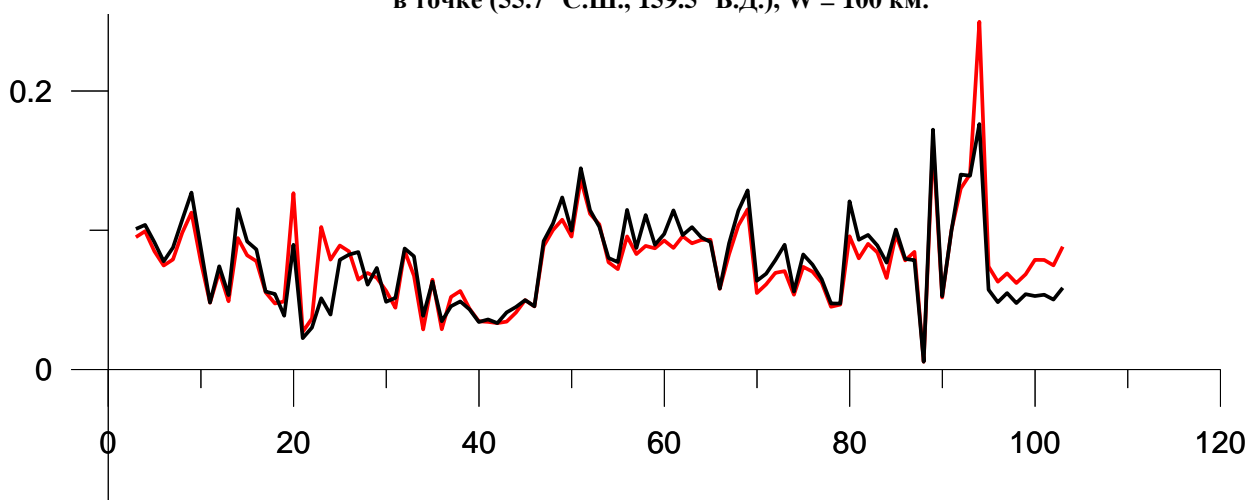


Рисунок 28. Распределение «высот волн» в расчетных мареографах для источника с гипоцентром в точке (55.7° С.Ш., 159.5° В.Д.),  $W = 200$  км.

По горизонтальной оси отложены номера мареографов с юга на север, а по вертикальной – «высота волны» в терминологии, введенной ЯМА – полусумма абсолютных значений максимальных и минимальных значений уровня свободной поверхности. Ссылаясь на опыт системы ЯМА, можно утверждать, что именно такие величины воспринимаются в качестве высоты волны на побережье.

Приведенные результаты показывают, что, скорее всего, расчеты будут проводиться по линейной модели, которая в тестовых расчетах практически не отличается от нелинейной модели. Эти различия, оставаясь пренебрежимо малыми, несколько возрастают при увеличении размеров очага. Отклонения, отмечаемые в нелинейной модели при дивергентной аппроксимации, проявляются в отдельных точках, достаточно локализованы и, скорее всего, объясняются упомянутыми выше обстоятельствами.