

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

30 июня 2009 года

**«Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов побережья
Дальнего востока РФ для модельных очагов удаленных цунамигенных
землетрясений»**

**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-09 от 09 февраля 2009 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

_____ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2009 г

Исполнители:

д.ф.-м.н.

инженер-исследователь

аспирант НГУ

В.К.Гусяков

С.А.Бейзель

В.В.Бабайлов

Содержание

Содержание.....	3
1. Введение	4
2. Краткая характеристика выполненных работ	4
3. Защищаемые пункты	5
4. Модельные цунамигенные землетрясения и соответствующие начальные возмущения	7
5. Общая характеристика расчетной области.....	9
6. Результаты предварительных расчетов	10
7. Уточняющие расчеты для трех базовых модельных источников	15
8. Сравнительный анализ цунами опасности модельных источников удаленных цунами	18
9. Заключение	24

1. Введение

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ, согласно календарному плану, посвящен разработке базы данных, включающей модели очагов удаленных цунамигенных землетрясений для побережья Дальнего Востока РФ, распределенных в соответствии с сейсмотектоническими особенностями цунамигенных зон Тихоокеанского региона.

2. Краткая характеристика выполненных работ

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 удаленных цунамигенных землетрясений. В ходе выполнения работ предусматривается выполнение необходимой модификации информационных структур, интерфейсов и вычислительных алгоритмов, созданных и совершенствовавшихся на предыдущих этапах работ по программе в 2007 и 2008 гг. (контракты 01н-07 от 22 марта 2007 и № 2н-08 от 21 мая 2008 г.).

Методика проведения вычислительных экспериментов на этом этапе не претерпела существенных изменений. Как и на предыдущих стадиях работы в 2007 и 2008 гг., первым шагом является уточнение перечня защищаемых пунктов, их географических координат, определение особенностей прилегающего рельефа суши, конфигурации береговой линии и батиметрии прибрежных акваторий.

На следующем шаге выполняется анализ геофизической обстановки и определяются потенциально опасные зоны размещения цунамигенных землетрясений, уточняются параметры моделей этих землетрясений, рассчитываются контуры соответствующих зон начальных возмущений. С учетом взаимного расположения этих зон, позиций защищаемых пунктов, предполагаемых трасс распространения цунами от области генерации начального возмущения к защищаемому побережью определяется расчетная область и производится привязка к этой области координат защищаемых пунктов и эпицентров цунамигенных землетрясений.

Затем с помощью средств информационно-вычислительной системы WinITDB производится предварительный расчет изохрон цунами от выявленных потенциально опасных зон. С использованием полученных временных характеристик определяются необходимое физическое время моделирования явлений, а также временные и географические параметры для реализации предложенной исполнителями технологии проведения последовательности расчетов с измельчением расчетной сетки («заморозка»).

Детальное описание этой методики, а также результаты ее тестирования на модельных и реальных задачах также были изложены в отчетах по контракту № 2н-08 от 21 мая 2008 г. В этом же отчете приведено детальное описание методик расчета начальных возмущений, порожденных модельными цунамигенными землетрясениями, и методик моделирования трансформации волн цунами на трассах от источника возмущения до защищаемого побережья. Эти методики обеспечивают определение мареограмм и экстремальных характеристик волн вблизи защищаемых пунктов, а также картин распределения волновой энергии по результатам моделирования («свечения»).

Первые расчеты выполняются на пяти- и двухминутной сетках, впоследствии результаты этих расчетов используются в качестве начальных данных для уточненных расчетов. Эти результаты позволяют также сделать предварительные качественные и количественные оценки относительной цунамиопасности моделируемых землетрясений и сопоставить значимость проявления волн цунами в различных защищаемых пунктах побережья.

Таким образом, исполнителями на первом этапе работы получены следующие результаты:

1. определены потенциально опасные для дальневосточного побережья зоны удаленных цунамигенных землетрясений;

2. рассчитаны поля изохрон волн цунами этих модельных цунамигенных землетрясений;
3. определен перечень защищаемых пунктов, уточнены их географические координаты;
4. определены параметры расчетной области; построены соответствующие массивы цифровой батиметрии, выполнена привязка защищаемых пунктов к контуру оцифрованной береговой линии;
5. определены параметры модельных очагов цунамигенных землетрясений, рассчитаны соответствующие поля начальных возмущений;
6. выполнены расчеты на пяти- и двухминутной сетках по моделированию цунами, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений, определены экстремальные характеристики проявления цунами в защищаемых пунктах, рассчитаны поля «свечений»;
7. подготовлены исходные данные для проведения уточняющих расчетов на измельченных (до 30 секунд) сетках с использованием методики «заморозки».

3. Защищаемые пункты

Все заданные Заказчиком защищаемые пункты разделены на 7 частично пересекающихся групп:

- 1 – пункты Камчатского УГМС;
- 2 – ГМС Камчатского УГМС;
- 3 – пункты Сахалинского УГМС, схема 1;
- 4 – пункты Сахалинского УГМС, схема 2;
- 5 – пункты Сахалинского УГМС, схема 3;
- 6 – пункты Приморского УГМС;
- 7 – станции Приморского УГМС.

В приведенной ниже таблице (Таблица 1) перечислены указанные Заказчиком защищаемые пункты, индекс, определяющий их принадлежность одной из групп, «исходные» географические координаты защищаемых пунктов, их целочисленные координаты в терминах номеров узлов выбранного Исполнителем фрагмента минутной сетки, соответствующие им физические координаты, отклонение этих значений от «исходных» и значения глубин. Иллюстрация распределения глубин под «защищаемыми пунктами» на минутной сетке приведена на Рис. 1. Без учета этих значений входных параметров невозможна адекватная интерпретация результатов вычислительных экспериментов.

Таблица 1. Защищаемые пункты.

	name	index	Psi-0	Phi-0	j	i	psi	phi	d-psi	d-phi	D-ij-calc
1	Apuka	1	60.46	169.58	1707	2556	60.43333	169.5833	0.026667	-0.00333	4
2	Pahachi	1	60.56	169.14	1714	2529	60.55	169.1333	0.01	0.006667	3
3	Tilichiki	1	60.43	163.18	1705	2344	60.4	166.05	0.03	-2.87	2
4	Korf	1	60.37	166.01	1703	2342	60.36667	166.0167	0.003333	-0.00667	2
5	Vyvenka	1	60.19	165.45	1692	2310	60.18333	165.4833	0.006667	-0.03333	3
6	Il'pyrskoe	1	59.96	164.18	1679	2232	59.96667	164.1833	-0.00667	-0.00333	2
7	Tymlat	1	59.5	163.18	1651	2173	59.5	163.2	0	-0.02	2
8	Ossora	1	59.25	163.07	1636	2166	59.25	163.0833	0	-0.01333	3
9	Kostroma	1	59.04	163.18	1623	2172	59.03333	163.1833	0.006667	-0.00333	2
10	Karaga	1	59.11	163.12	1628	2168	59.11667	163.1167	-0.00667	0.003333	2
11	Ivashka	1	58.57	162.3	1595	2120	58.56667	162.3167	0.003333	-0.01667	2
12	Ust'-Kamchatsk	1	56.24	162.5	1454	2131	56.21667	162.5	0.023333	0	4
13	Petropavlovsk-Kamchatskii	1	53.05	158.63	1261	1899	53	158.6333	0.05	-0.00333	2
14	Nikol'skoe	1	55.2	166.02	1394	2337	55.21667	165.9333	-0.01667	0.086667	2

15	Apuka	2	60.46	169.58	1707	2556	60.43333	169.5833	0.026667	-0.00333	4
16	Korf	2	60.37	166.01	1703	2342	60.36667	166.0167	0.003333	-0.00667	2
17	Ossora	2	59.25	163.07	1636	2166	59.25	163.0833	0	-0.01333	3
18	Ozernaya	2	57.65	163.23	1540	2175	57.65	163.2333	0	-0.00333	3
19	Afrika	2	56.18	163.3	1451	2179	56.16667	163.3	0.013333	0	1
20	Kronoki	2	54.58	161.21	1355	2052	54.56667	161.1833	0.013333	0.026667	5
21	Semyachiki	2	54.2	159.98	1330	1982	54.15	160.0167	0.05	-0.03667	1
22	Petropavlovskii mayak	2	52.88	158.72	1254	1904	52.88333	158.7167	-0.00333	0.003333	1
23	Vodopadnaya	2	51.82	158.1	1190	1868	51.81667	158.1167	0.003333	-0.01667	10
24	Lopatka	2	50.87	156.67	1133	1781	50.86667	156.6667	0.003333	0.003333	2
25	Nicol'skoe	2	55.2	166.02	1394	2337	55.21667	165.9333	-0.01667	0.086667	2
26	Shumshu	3	50.74	156.31	1120	1766	50.65	156.4167	0.09	-0.10667	3
27	Severo-Kuril'sk	3	50.68	156.12	1121	1750	50.66667	156.15	0.013333	-0.03	8
28	Simushir	3	46.82	151.78	888	1491	46.78333	151.8333	0.036667	-0.05333	5
29	Urup	3	45.96	149.99	833	1386	45.86667	150.0833	0.093333	-0.09333	3
30	Burevestnik	3	44.92	147.61	777	1239	44.93333	147.6333	-0.01333	-0.02333	2
31	Malokuril'skoe	3	43.87	146.82	715	1190	43.9	146.8167	-0.03	0.003333	61
32	Yuzhno-Kuril'sk	3	44.04	145.85	722	1132	44.01667	145.85	0.023333	0	5
33	M.Kril'on	4	45.9	142.08	835	906	45.9	142.0833	0	-0.00333	5
34	Nevel'sk	4	46.68	141.86	882	892	46.68333	141.85	-0.00333	0.01	8
35	Holmsk	4	47.06	142.06	904	903	47.05	142.0333	0.01	0.026667	10
36	Il'inskii	4	47.99	142.21	960	912	47.98333	142.1833	0.006667	0.026667	5
37	Ulegorsk	4	49.08	142.07	1025	902	49.06667	142.0167	0.013333	0.053333	7
38	Pil'vo (Smirnyh)	4	50.04	142.18	1084	910	50.05	142.15	-0.01	0.03	1
39	Aleksandrovsk- Sahalinskii	4	50.9	142.15	1136	909	50.91667	142.1333	-0.01667	0.016667	4
40	De-Kastri	4	51.48	140.77	1169	830	51.46667	140.8167	0.013333	-0.04667	2
41	Sov.Gavan'	4	48.97	140.29	1021	802	49	140.35	-0.03	-0.06	2
42	Grossevichi	4	47.99	139.53	960	754	47.98333	139.55	0.006667	-0.02	5
43	Severo-Kuril'sk	5	50.68	156.12	1121	1750	50.66667	156.15	0.013333	-0.03	8
44	Odoptu	5	53.37	143.17	1283	971	53.36667	143.1667	0.003333	0.003333	2
45	Komrvo	5	51.12	143.57	1148	995	51.11667	143.5667	0.003333	0.003333	3
46	Pogranichnoe	5	50.37	143.76	1103	1007	50.36667	143.7667	0.003333	-0.00667	1
47	M.Terpeniya	5	48.65	144.73	999	1065	48.63333	144.7333	0.016667	-0.00333	4
48	Poronaisk	5	49.22	143.09	1033	968	49.2	143.1167	0.02	-0.02667	1
49	Makarov	5	48.63	142.77	998	949	48.61667	142.8	0.013333	-0.03	5
50	Vzmor'e	5	47.85	142.51	951	933	47.83333	142.5333	0.016667	-0.02333	4
51	Starodubskoe	5	47.41	142.82	926	950	47.41667	142.8167	-0.00667	0.003333	2
52	Novikovo	5	46.37	143.35	864	981	46.38333	143.3333	-0.01333	0.016667	8
53	Korsakov	5	46.64	142.78	879	945	46.63333	142.7333	0.006667	0.046667	5
54	Kuril'sk	5	45.23	147.88	796	1253	45.25	147.8667	-0.02	0.013333	45
55	s. Maksimovka	6	46.09	137.89	846	658	46.08333	137.95	0.006667	-0.06	8
56	p. Ternei	6	45	136.6	782	581	45.01667	136.6667	-0.01667	-0.06667	22
57	p. Plastun	6	44.75	136.29	765	562	44.73333	136.35	0.016667	-0.06	19
58	p. Kamenka	6	44.46	136.02	747	542	44.43333	136.0167	0.026667	0.003333	15
59	s. Lidovka	6	44.43	135.87	745	535	44.4	135.9	0.03	-0.03	16
60	p. Rudnaya pris- tan'	6	44.36	135.82	742	532	44.35	135.85	0.01	-0.03	18
61	s. Veselyi Yar	6	43.96	135.45	717	510	43.93333	135.4833	0.026667	-0.03333	19
62	p. Ol'ga	6	43.75	135.29	702	496	43.68333	135.25	0.066667	0.04	7
63	s. Moryak- Rybolov	6	43.34	134.78	680	469	43.31667	134.8	0.023333	-0.02	16
64	s. Valentin	6	43.12	134.29	666	438	43.08333	134.2833	0.036667	0.006667	31

65	p. Glazkovka	6	43.07	134.17	664	432	43.05	134.1833	0.02	-0.01333	10
66	s. Sokolovka	6	44.12	133.86	653	414	42.86667	133.8833	1.253333	-0.02333	36
67	s. Kievka	6	42.91	133.7	651	402	42.83333	133.6833	0.076667	0.016667	8
68	d. Melkovodnoe	6	42.86	133.62	651	400	42.83333	133.65	0.026667	-0.03	17
69	buh. Uspeniya	6	42.82	133.52	650	393	42.81667	133.5333	0.003333	-0.01333	11
70	Vrangel'	6	42.72	133.07	646	363	42.75	133.0333	-0.03	0.036667	10
71	d. Beregovaya	6	42.76	133.08	647	362	42.76667	133.0167	-0.00667	0.063333	18
72	Nahodka	6	42.78	132.86	650	356	42.81667	132.9167	-0.03667	-0.05667	5
73	p. Livadiya	6	42.87	132.68	651	342	42.83333	132.6833	0.036667	-0.00333	24
74	Bol'shoi Kamen'	6	43.11	132.35	667	319	43.1	132.3	0.01	0.05	13
75	Vladivostok	6	43.13	131.92	670	294	43.15	131.8833	-0.02	0.036667	10
76	s. Andreevka	6	42.65	131.13	637	249	42.6	131.1333	0.05	-0.00333	2
77	ОАО «"Morskoi port v buhte Troitsa»	6	42.64	131.08	637	246	42.6	131.0833	0.04	-0.00333	3
78	p. Zarubino	6	42.65	131.07	638	245	42.61667	131.0667	0.033333	0.003333	2
79	Zolotoi (morskaya)	7	47.32	138.97	919	719	47.3	138.9667	0.02	0.003333	15
80	Sosunovo (morskaya)	7	46.53	138.33	873	682	46.53333	138.35	-0.00333	-0.02	12
81	Malaya Kema (morskaya)	7	45.42	137.15	805	611	45.4	137.1667	0.02	-0.01667	9
82	Rudnaya pristan' (morskaya)	7	44.36	135.82	742	532	44.35	135.85	0.01	-0.03	18
83	Preobrazhenie (morskaya)	7	42.9	133.91	653	414	42.86667	133.8833	0.033333	0.026667	36
84	Nahodka (morskaya)	7	42.78	132.86	650	356	42.81667	132.9167	-0.03667	-0.05667	5
85	Vladivostok	7	43.13	131.92	670	294	43.15	131.8833	-0.02	0.036667	10
86	Pos'et (morskaya)	7	42.66	130.8	641	228	42.66667	130.7833	-0.00667	0.016667	3

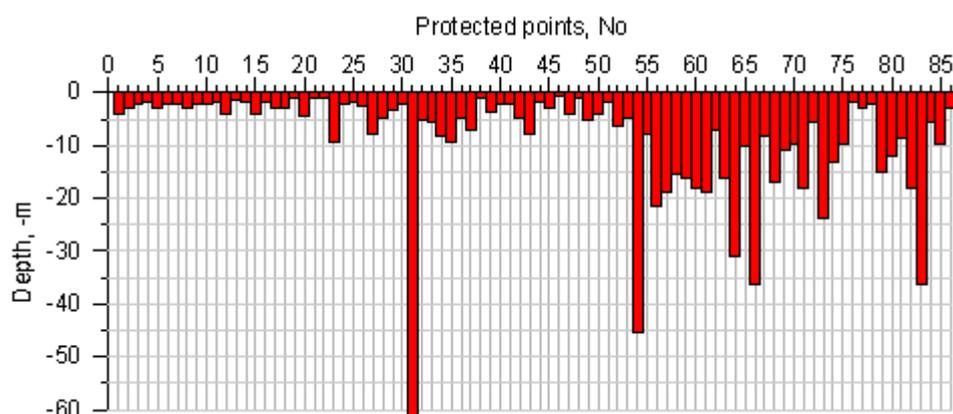


Рис. 1. Распределение глубин под защищаемыми пунктами

4. Модельные цунамигенные землетрясения и соответствующие начальные возмущения

Как было показано в завершающем отчете по контракту № 2н-08 от 21 мая 2008 г., для Дальневосточного побережья России наиболее опасными уделенными цунамигенными зонами являются зоны, примыкающие к Тихоокеанскому побережью Америки. В отчете по упомянутому проекту даны краткие характеристики этих зон:

«Для Курило-Камчатского побережья особого рассмотрения требует проблема оценки опасности цунами от Южно-Американских землетрясений. Благодаря специфике взаимного расположения области источника и области воздействия (удаленность по направлению почти точно на 180°, в силу чего происходит заметная конвергенция фронта цунами при распространении на сфере) и малому затуханию с расстоянием, сильнее южно-американские цунами

оказывают разрушительное воздействие на побережье Японии, Курильских остров и Камчатки. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана....

Другим районом с потенциальной угрозой возникновения трансокеанских цунами следует считать западное побережье США вблизи штатов Вашингтон и Орегон. По сравнению с расположенным к югу от них штатом Калифорния, этот район обладает существенно более слабой фоновой сейсмичностью, однако геологическими работами и изучением следов палеоцунами было доказано, что здесь также возможны сильные (с магнитудой до 9.0) землетрясения, период повторяемости которых варьируется в интервале 250 – 300 лет . Последнее по времени такое землетрясение произошло в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон) в конце января 1700 года. Письменных свидетельств о нем не осталось (поскольку землетрясение произошло еще до прибытия первых европейцев на эти земли). Само событие было идентифицировано исключительно по геологическим признакам, его точную дату удалось установить путем корреляции с японскими хрониками, сообщавшими о необычных волнах с высотами до 4 – 5 метров, наблюдавшихся в различных пунктах восточного побережья Японии, причем о каких-либо сейсмических событиях в то время не сообщалось.»

При выполнении работ, предусмотренных настоящим контрактом, использованы начальные возмущения, рассчитанные с использованием модельных очагов землетрясений, произошедших у берегов Чили и США. Один из них, называемый далее «Chile-S», моделировал Чилийское землетрясение 22-го мая 1960-го года с магнитудой 9.5 и координатами гипоцентра 42.2 градуса ю.ш., 74.2 градуса з.д., второй – «Chile-N» – географически размещен вблизи города Икике, где в 1877 году произошло землетрясение с магнитудой 9.0. Параметры очага «Chile-N» соответствовали первому, более сильному очагу «Chile-S», а координаты его гипоцентра были выбраны так, чтобы примерные верхняя и правая границы его положительной части возмущения (край разрыва) проходили вдоль побережья (Таблица 2). Третий очаг – «Cascadia» – моделирует январское 1700 года землетрясение в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон) с магнитудой 9.1 и гипоцентром в точке 44.5 градуса с.ш., 124.6 градуса з.д.

Таблица 2. Параметры источников.

Name	у	х, с учетом перехода через 180 градусов в.д.	L, км	W, км	δ	λ	Θ	D_0 , м	H_{top} , км
a. Chile-S	42.2° ю.ш.	«285.8°»	1000	100	20°	90°	190°	20	10
b. Chile-N	23.3° ю.ш.	«289.6°»	1000	100	20°	90°	180°	20	10
c. Cascadia	44.5° с.ш.	«235.4°»	800	80	20°	90°	180°	15	10

Вычисленные по этим параметрам начальные возмущения изменялись в следующих пределах: для очагов «Chile-S» и «Chile-N» – от -3 до +9 метров, а для очага «Cascadia» – от -2.3 до +6.6 метров. Контуры соответствующих начальных возмущений приведены ниже (Рис. 2).

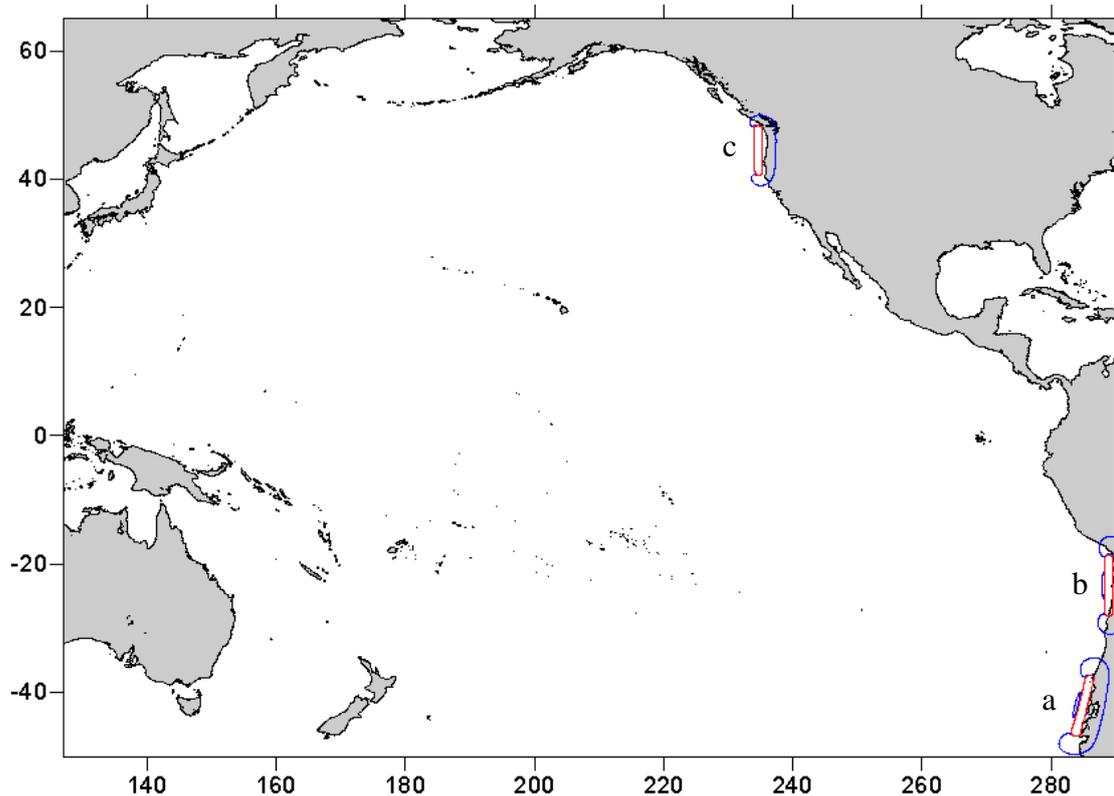


Рис. 2. Контуры начальных возмущений исходных очагов «Chile-S» (a), «Chile-N» (b), «Cascadia» (c).

5. Общая характеристика расчетной области

В качестве расчетной области использовалась акватория Тихого океана в пределах от 127 градусов в.д. до 70 градусов з.д. («290 градусов в.д.» – с учетом перехода через 180 градусов) и от 50 градусов ю.ш. до 65 градусов с.ш. (Рис. 3). Виртуальные мареографы были установлены в точках, приведенных в таблице 1 (Рис. 4).

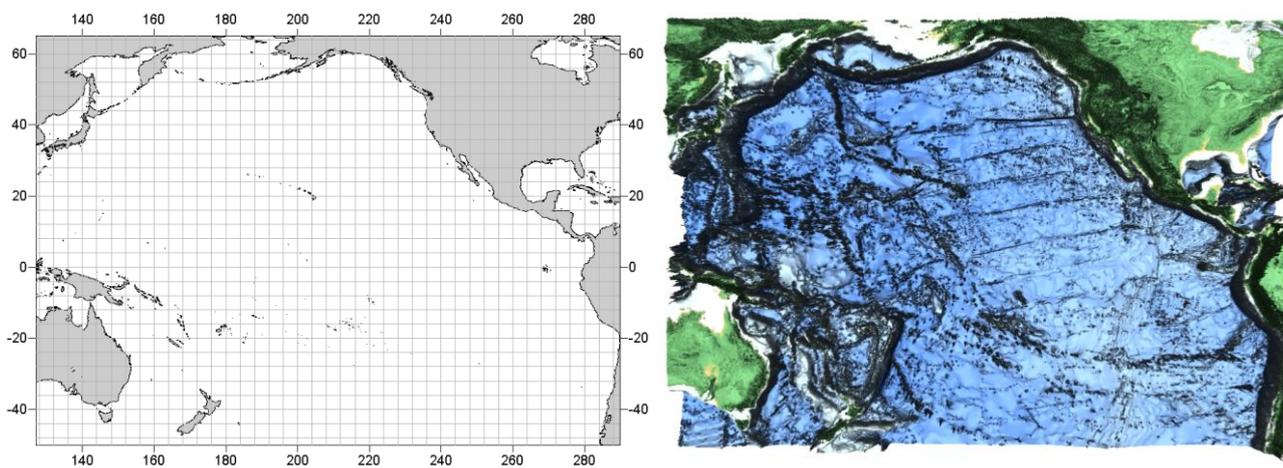


Рис. 3. Расчетная область для моделирования удаленных цунами: контур (слева) и рельеф дна (справа).

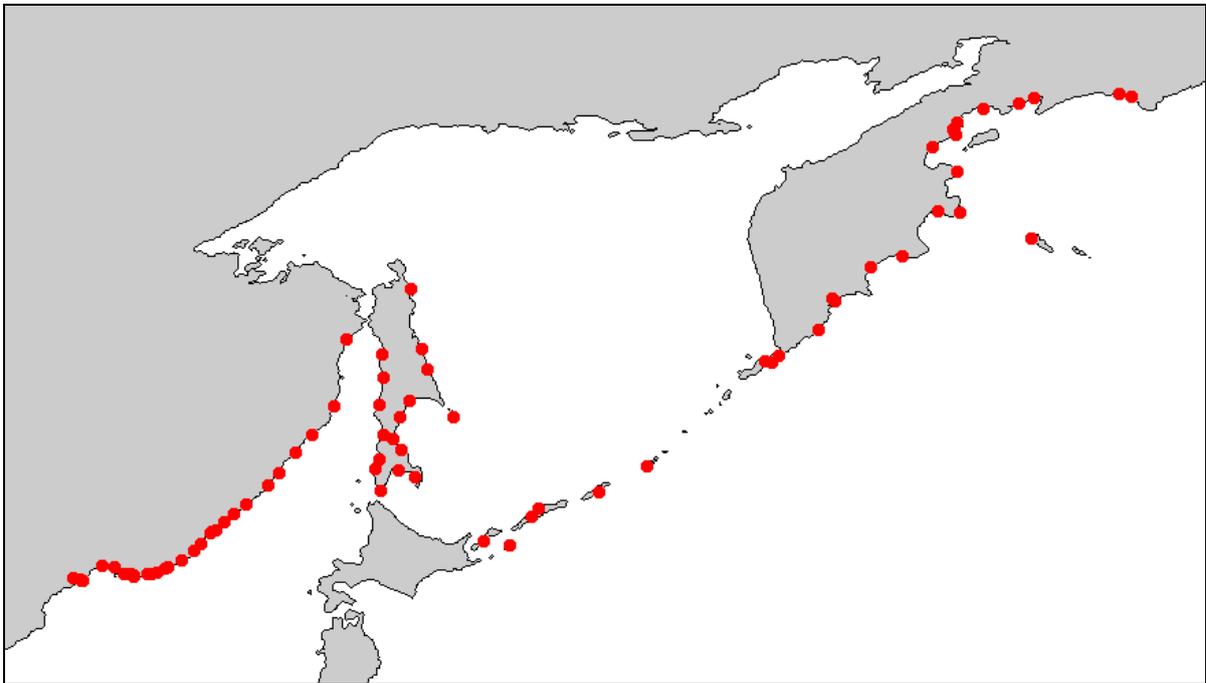


Рис. 4. Схема расстановки виртуальных мареографов.

6. Результаты предварительных расчетов

Выполненные с помощью системы WinITDB расчеты изохрон для модельных очагов цунами приведены на рисунках (Рис. 5, Рис. 6, Рис. 7).

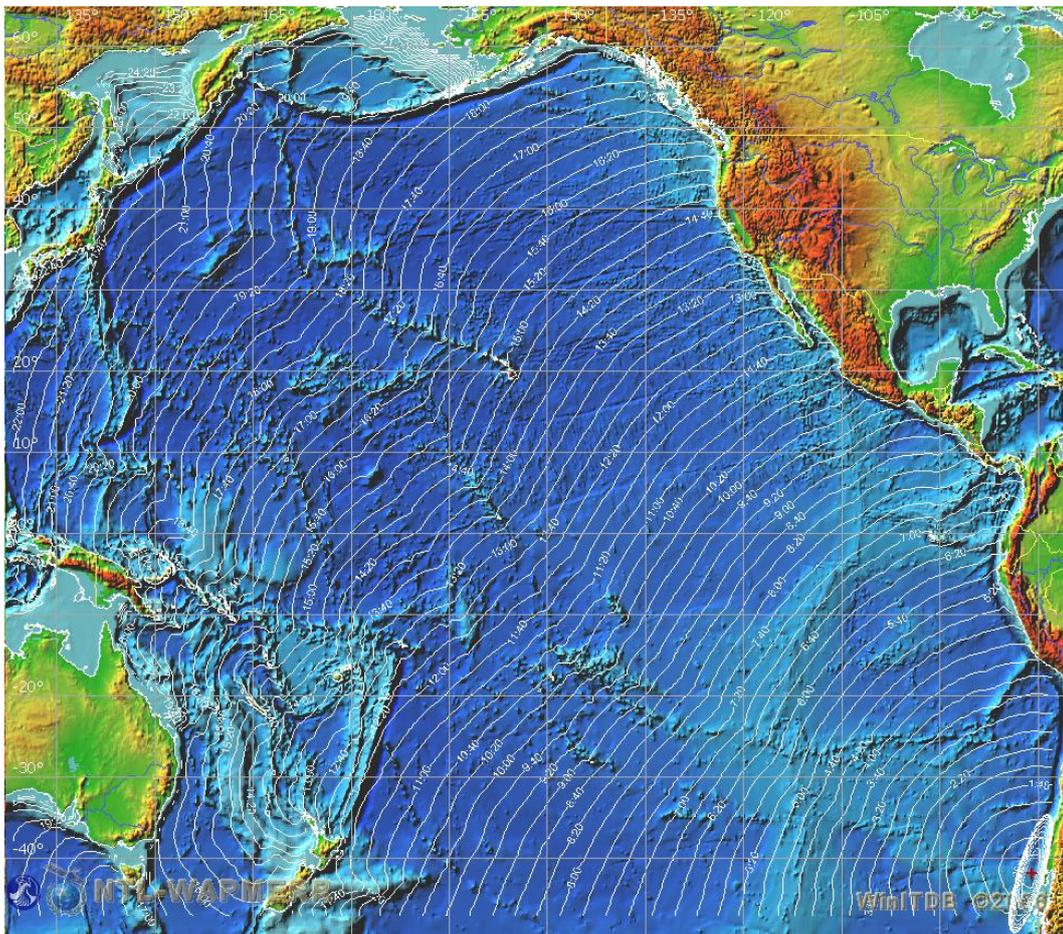


Рис. 5. Изохроны цунами от модельного источника «Chile-S»

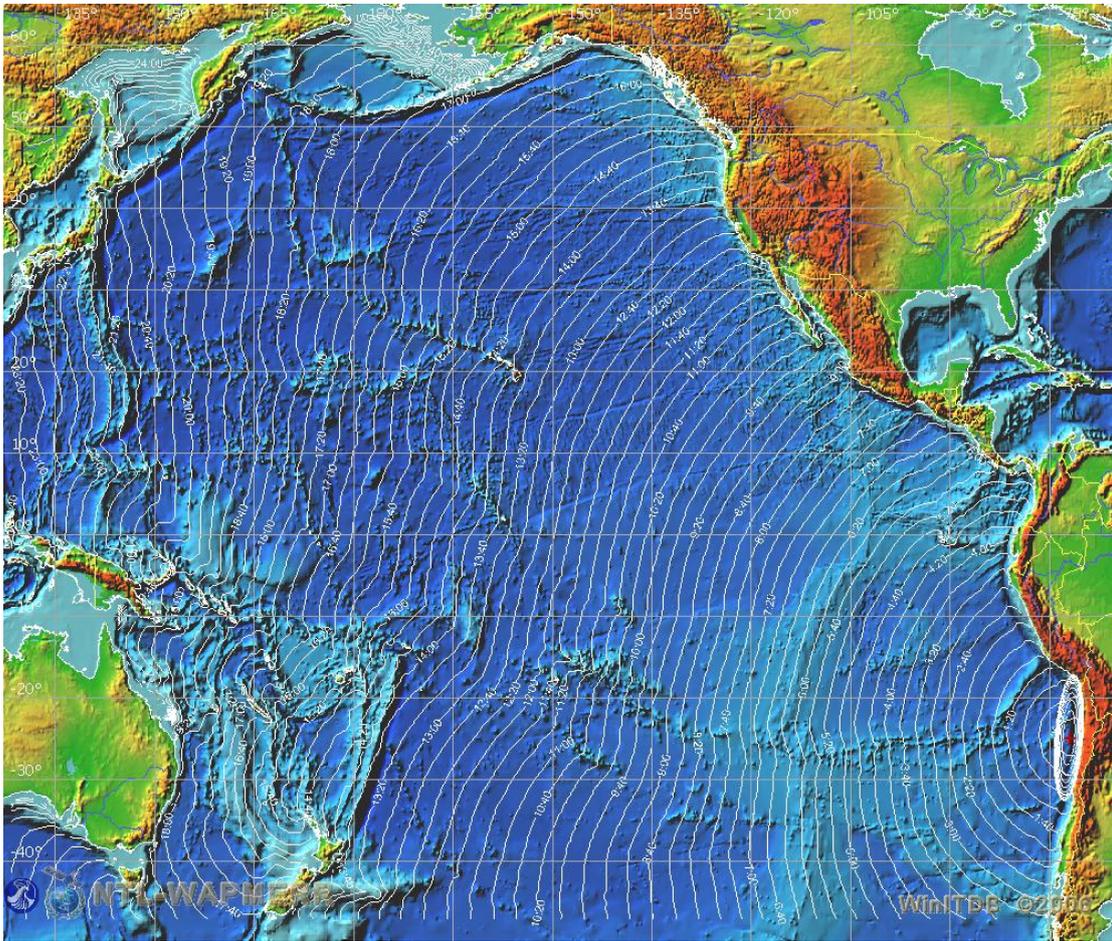


Рис. 6. Изохроны цунами от модельного источника «Chile-N»

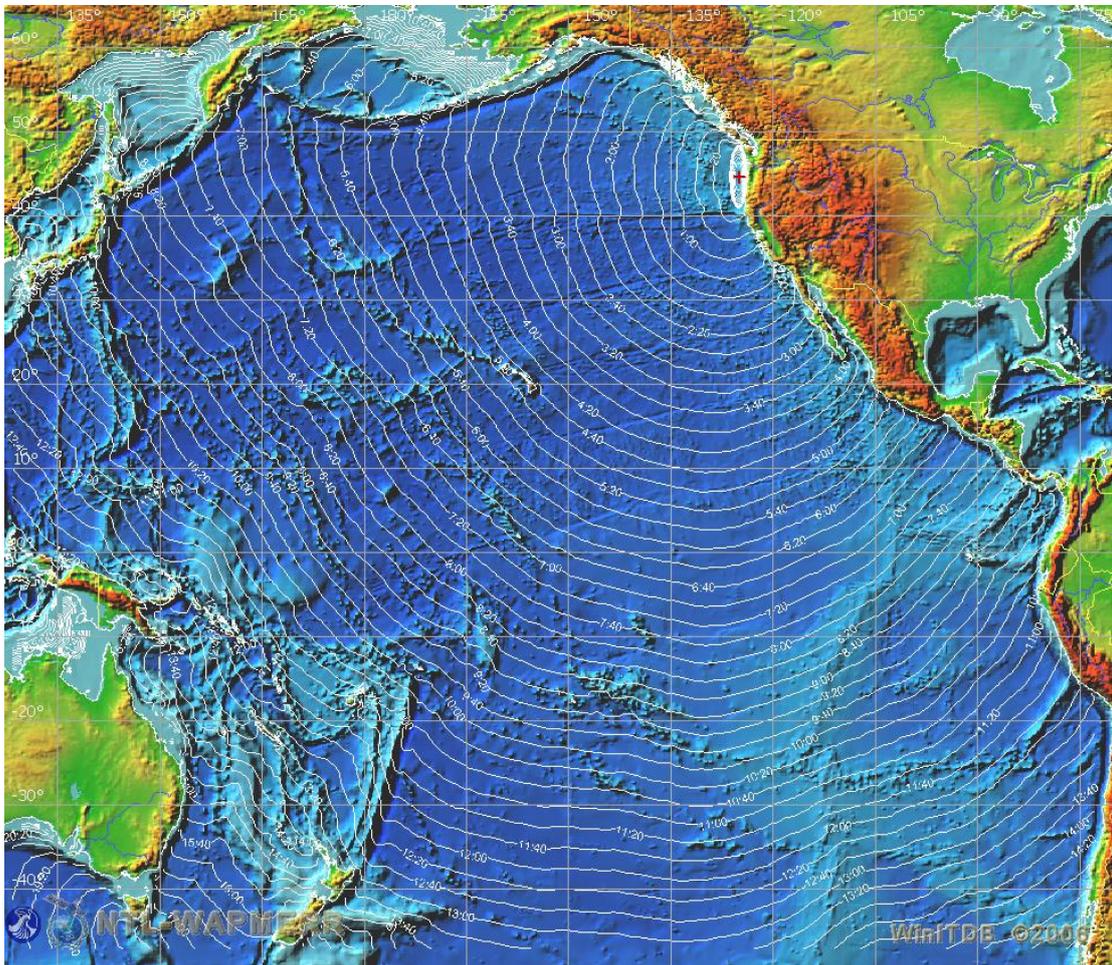


Рис. 7. Изохроны цунами от модельного источника «Cascadia»

Изохроны показывают, что для источника «Chile-S» передний фронт цунами подходит к берегам Камчатки через 21 час после начала события, к Курильским островам – спустя еще 40 минут, а к берегам Сахалина – через 23 часа. При смещении очага к северу (очаг «Chile-N») соответствующие времена составляют 19:40, 20:20, 22:40. Волны, порожденные очагом «Cascadia», приходят к побережью России значительно быстрее – 7:20 (Камчатка), 8:00 (Курильские острова), 10:00 (Сахалин). Конечно, эти значения являются оценочными и, как указывалось выше, будут учтены при постановке задач уточняющих расчетов.

Предварительные расчеты динамики волн цунами были проведены на сетках с шагом 5 и 2 минуты до момента времени 150000 секунд (~42 часа). Получившиеся на сетке с шагом 5 минут картины свечения приведены на Рис. 8.

Согласно полученным результатам, для модельного очага «Chile-S» основная часть энергии распространяется на северо-запад: к Филиппинам, Японии, Курилам и Камчатке. Для очага «Chile-N», расположенного севернее, энергия больше рассеивается по всему Тихому океану. В случае очага «Cascadia» распространения значительной части волновой энергии в сторону Российского побережья не наблюдается.

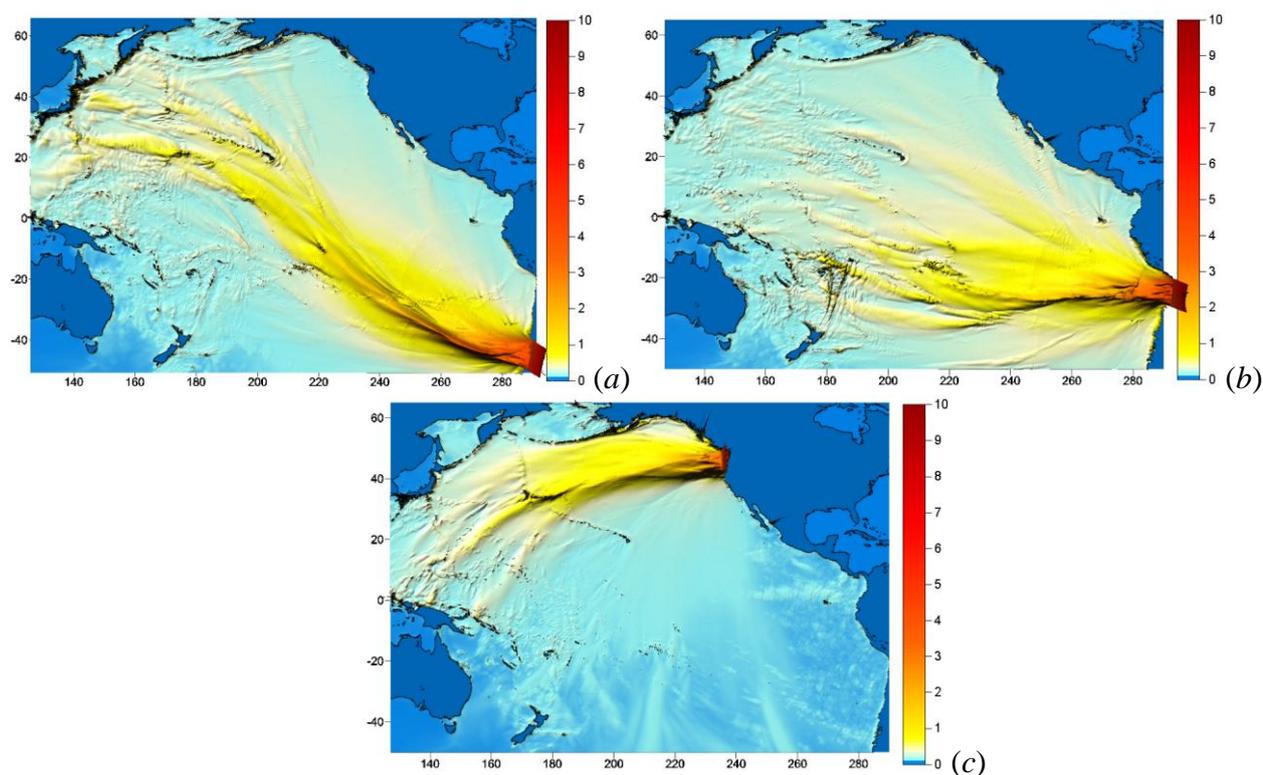


Рис. 8. Картины свечения удаленных цунами от четырех модельных очагов цунамигенных землетрясений: «Chile-S» (a), «Chile-N» (b), «Cascadia» (c).

Как показывают полученные на сетке с шагом 2 минуты предварительные распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах (Рис. 9), наибольшие волны (амплитуды до 3.5 – 4.5 метров) к дальневосточному побережью Российской Федерации приходят от источника «Chile-S», причем значительные амплитуды (порядка 1 метра и больше) наблюдаются на побережье Камчатки, Курильских островов и восточной части Сахалина, а у западной его части и вдоль побережья Приморского края амплитуды незначительны (не более 30 см).

Для очага «Chile-N» амплитуды несколько меньше (до 3 метров), а для «Cascadia» не превышают 1 метра.

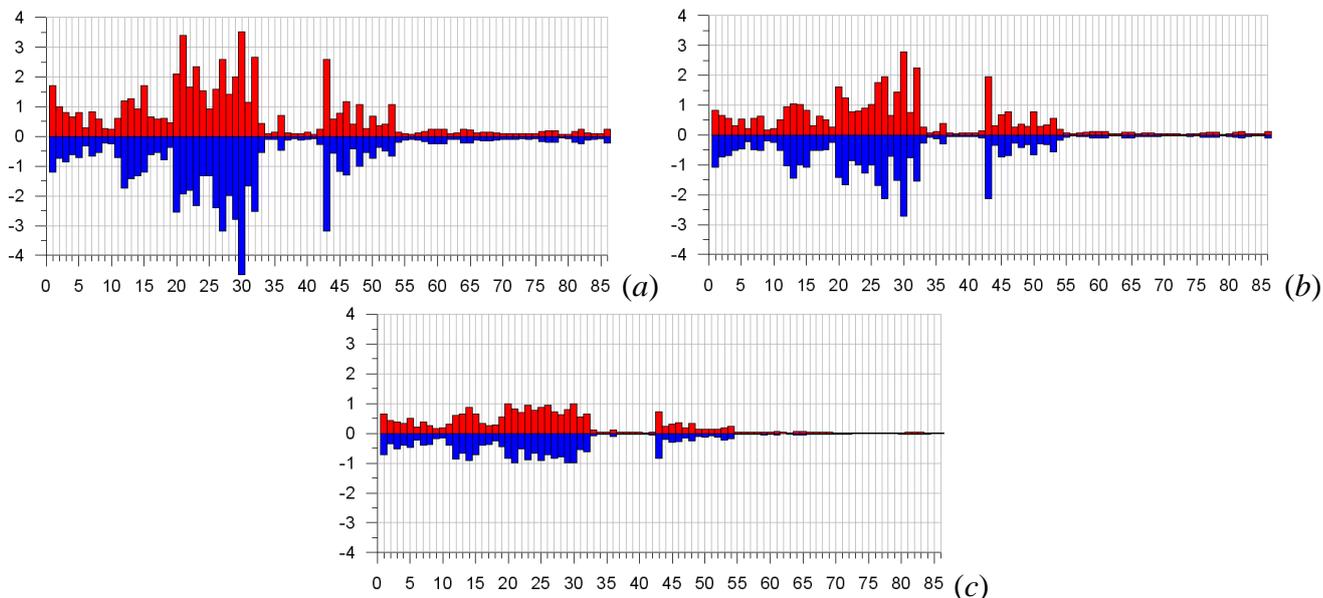


Рис. 9. Распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах для модельных очагов «Chile-S» (a) «Chile-N» (b) и «Cascadia» (c), рассчитанные на двухминутной сетке.

Экстремальные значения амплитуд наблюдаются в пунктах Кроноки (20), Семячки (21), Северо-Курильск (27, 43), Буревестник (30), Южно-Курильск (32). В скобках указаны номера соответствующих строк в таблице (Таблица 1).

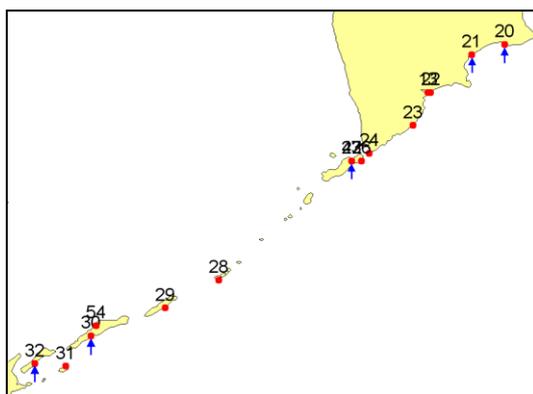


Рис. 10. Положение защищаемых пунктов с экстремальными значениями амплитуд волн цунами от «чилийских» очагов

Предварительные расчеты по двухминутной сетке показали заметное разделение совокупности защищаемых пунктов по степени проявления волн цунами. Анализ результатов позволил выделить две группы пунктов, в которых проявление волн цунами при наиболее опасном цунами (очаг Chile_S) оказывается существенным – от 0.5 м до 4 м и более. Так в первую группу входят пункты с номерами 1 – 32, 43, 54 (Рис. 11), расположенные на побережье п-ва Камчатка, на Курильских островах и на о-ве Беринга (Таблица 3.). При нумерации согласно приложенным к Техническому заданию перечням в соответствующей таблице и на графиках распределений экстремальных высот волн имеют место повторы. Это замечание касается пунктов Апука (1, 15), Оссора (8, 17), Никольское (14, 25), Северо-Курильск (27, 43). Исключения составляют три пункта, расположенные у побережья «в глубине» Карагинского залива Ильпырское (6), Кострома (9) и Карага (10), а также пункт Курильск (54), расположенный на северо-западном побережье о-ва Итуруп.

Вторая группа защищаемых пунктов с ощутимыми проявлениям волн включает защищаемые пункты, расположенные у побережья о-ва Сахалин (Рис. 11), с номерами 36, 44 – 53 (Таблица 4.). И в этой группе имеют место исключения, они касаются anomalously низких амплитуд в пунктах Макаров (49) и Стародубское (51), расположенных на Восточном побережье. В эту же группу входит пункт Ильинский (36) с anomalously высоким для Западного побережья острова значением.

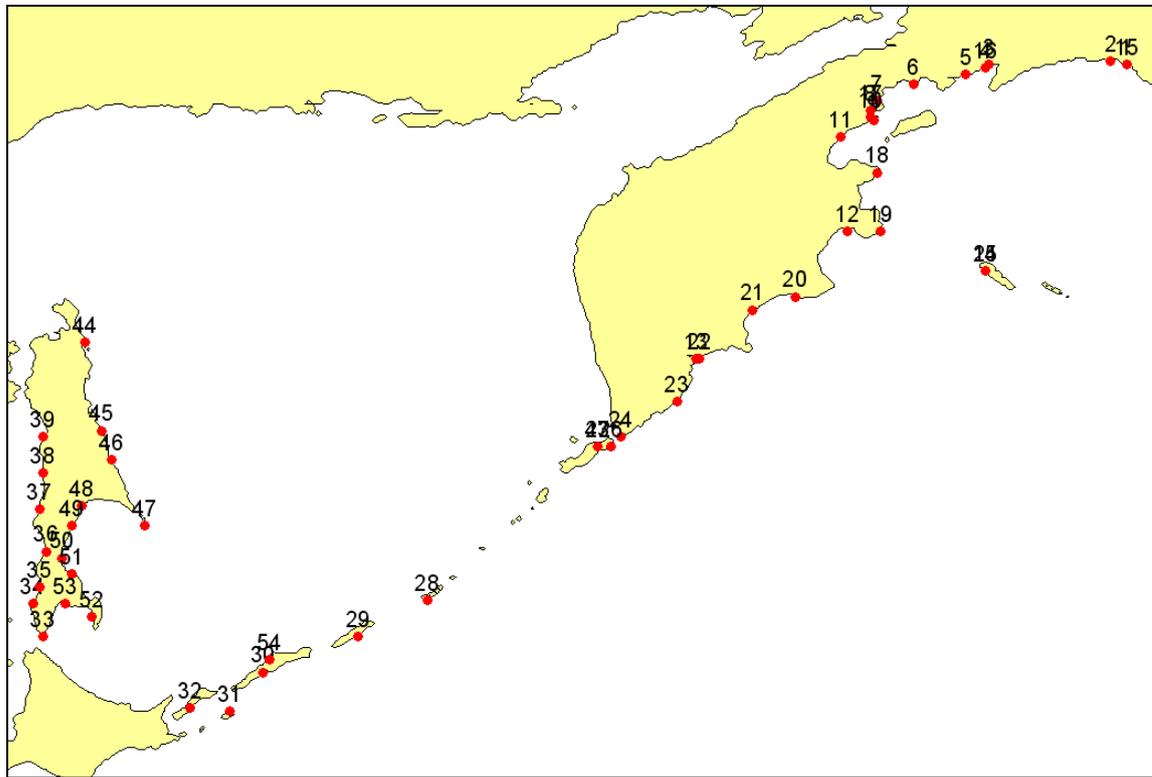


Рис. 11. Фрагмент расчетной области с указанием номеров защищаемых пунктов.

Таблица 3.

	name	index	Psi-0	Phi-0	j	i	psi	phi	d-psi	d-phi	D-ij-calc
1	Apuka	1	60.46	169.58	1707	2556	60.43333	169.5833	0.026667	-0.00333	4
2	Pahachi	1	60.56	169.14	1714	2529	60.55	169.1333	0.01	0.006667	3
3	Tilichiki	1	60.43	163.18	1705	2344	60.4	166.05	0.03	-2.87	2
4	Korf	1	60.37	166.01	1703	2342	60.36667	166.0167	0.003333	-0.00667	2
5	Vyvenka	1	60.19	165.45	1692	2310	60.18333	165.4833	0.006667	-0.03333	3
6	Il'pyrskoe	1	59.96	164.18	1679	2232	59.96667	164.1833	-0.00667	-0.00333	2
7	Tymlat	1	59.5	163.18	1651	2173	59.5	163.2	0	-0.02	2
8	Ossora	1	59.25	163.07	1636	2166	59.25	163.0833	0	-0.01333	3
9	Kostroma	1	59.04	163.18	1623	2172	59.03333	163.1833	0.006667	-0.00333	2
10	Karaga	1	59.11	163.12	1628	2168	59.11667	163.1167	-0.00667	0.003333	2
11	Ivashka	1	58.57	162.3	1595	2120	58.56667	162.3167	0.003333	-0.01667	2
12	Ust'-Kamchatsk	1	56.24	162.5	1454	2131	56.21667	162.5	0.023333	0	4
13	Petropavlovsk-Kamchatskii	1	53.05	158.63	1261	1899	53	158.6333	0.05	-0.00333	2
14	Nikol'skoe	1	55.2	166.02	1394	2337	55.21667	165.9333	-0.01667	0.086667	2
15	Apuka	2	60.46	169.58	1707	2556	60.43333	169.5833	0.026667	-0.00333	4
16	Korf	2	60.37	166.01	1703	2342	60.36667	166.0167	0.003333	-0.00667	2
17	Ossora	2	59.25	163.07	1636	2166	59.25	163.0833	0	-0.01333	3
18	Ozernaya	2	57.65	163.23	1540	2175	57.65	163.2333	0	-0.00333	3
19	Afrika	2	56.18	163.3	1451	2179	56.16667	163.3	0.013333	0	1
20	Kronoki	2	54.58	161.21	1355	2052	54.56667	161.1833	0.013333	0.026667	5
21	Semyachiki	2	54.2	159.98	1330	1982	54.15	160.0167	0.05	-0.03667	1
22	Petropavlovskii mayak	2	52.88	158.72	1254	1904	52.88333	158.7167	-0.00333	0.003333	1
23	Vodopadnaya	2	51.82	158.1	1190	1868	51.81667	158.1167	0.003333	-0.01667	10
24	Lopatka	2	50.87	156.67	1133	1781	50.86667	156.6667	0.003333	0.003333	2
25	Nikol'skoe	2	55.2	166.02	1394	2337	55.21667	165.9333	-0.01667	0.086667	2
26	Shumshu	3	50.74	156.31	1120	1766	50.65	156.4167	0.09	-0.10667	3
27	Severo-Kuril'sk	3	50.68	156.12	1121	1750	50.66667	156.15	0.013333	-0.03	8

28	Simushir	3	46.82	151.78	888	1491	46.78333	151.8333	0.036667	-0.05333	5
29	Urup	3	45.96	149.99	833	1386	45.86667	150.0833	0.093333	-0.09333	3
30	Burevestnik	3	44.92	147.61	777	1239	44.93333	147.6333	-0.01333	-0.02333	2
31	Malokuril'skoe	3	43.87	146.82	715	1190	43.9	146.8167	-0.03	0.003333	61
32	Yuzhno-Kuril'sk	3	44.04	145.85	722	1132	44.01667	145.85	0.023333	0	5
43	Severo-Kuril'sk	5	50.68	156.12	1121	1750	50.66667	156.15	0.013333	-0.03	8
54	Kuril'sk	5	45.23	147.88	796	1253	45.25	147.8667	-0.02	0.013333	45

Таблица 4.

	name	index	Psi-0	Phi-0	j	i	psi	phi	d-psi	d-phi	D-ij-calc
36	Il'inskii	4	47.99	142.21	960	912	47.98333	142.1833	0.006667	0.026667	5
44	Odoptu	5	53.37	143.17	1283	971	53.36667	143.1667	0.003333	0.003333	2
45	Komrvo	5	51.12	143.57	1148	995	51.11667	143.5667	0.003333	0.003333	3
46	Pogranichnoe	5	50.37	143.76	1103	1007	50.36667	143.7667	0.003333	-0.00667	1
47	M.Terpeniya	5	48.65	144.73	999	1065	48.63333	144.7333	0.016667	-0.00333	4
48	Poronaisk	5	49.22	143.09	1033	968	49.2	143.1167	0.02	-0.02667	1
49	Makarov	5	48.63	142.77	998	949	48.61667	142.8	0.013333	-0.03	5
50	Vzmor'e	5	47.85	142.51	951	933	47.83333	142.5333	0.016667	-0.02333	4
51	Starodubskoe	5	47.41	142.82	926	950	47.41667	142.8167	-0.00667	0.003333	2
52	Novikovo	5	46.37	143.35	864	981	46.38333	143.3333	-0.01333	0.016667	8
53	Korsakov	5	46.64	142.78	879	945	46.63333	142.7333	0.006667	0.046667	5

7. Уточняющие расчеты для трех базовых модельных источников

На втором этапе работ для рассмотренных ранее удаленных источников исполнителями были проведены уточняющие расчеты на одноминутной сетке с использованием технологии «заморозка», при этом в качестве начальных данных были взяты результаты расчетов на двухминутной сетке. При определении подобластей для таких уточняющих расчетов были приняты во внимание результаты изложенного выше анализа распределений экстремальных волновых характеристик. Соотношение расчетных областей и общие характеристики волновых полей для трех рассмотренных на этом этапе очагов цунами приведены на следующих рисунках (Рис. 12 *a,b,c*).

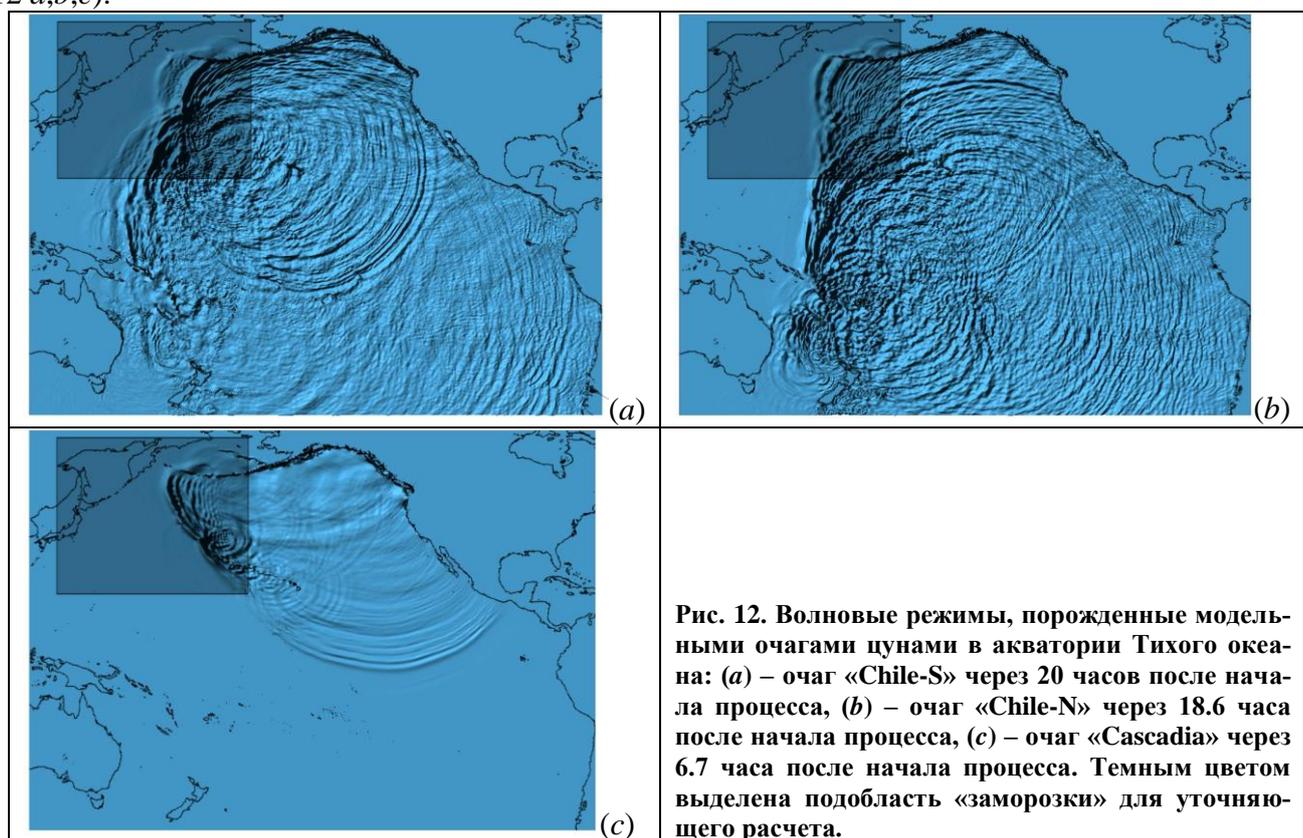


Рис. 12. Волновые режимы, порожденные модельными очагами цунами в акватории Тихого океана: (a) – очаг «Chile-S» через 20 часов после начала процесса, (b) – очаг «Chile-N» через 18.6 часа после начала процесса, (c) – очаг «Cascadia» через 6.7 часа после начала процесса. Темным цветом выделена подобласть «заморозки» для уточняющего расчета.

Рельеф дна расчетной подобласти, использованной для уточняющих расчетов на одно-минутной сетке, приведен на рисунке (Рис. 13). Эта подобласть включает фрагмент акватории Тихого океана, простирающийся с Юга на Север от 18 до 63 градусов Северной широты (2701 узел расчетной сетки) и с Запада на Восток от 135 до «190» градусов Восточной долготы (3301 узел расчетной сетки). Максимальная глубина в этой подобласти составляла 9631 м.

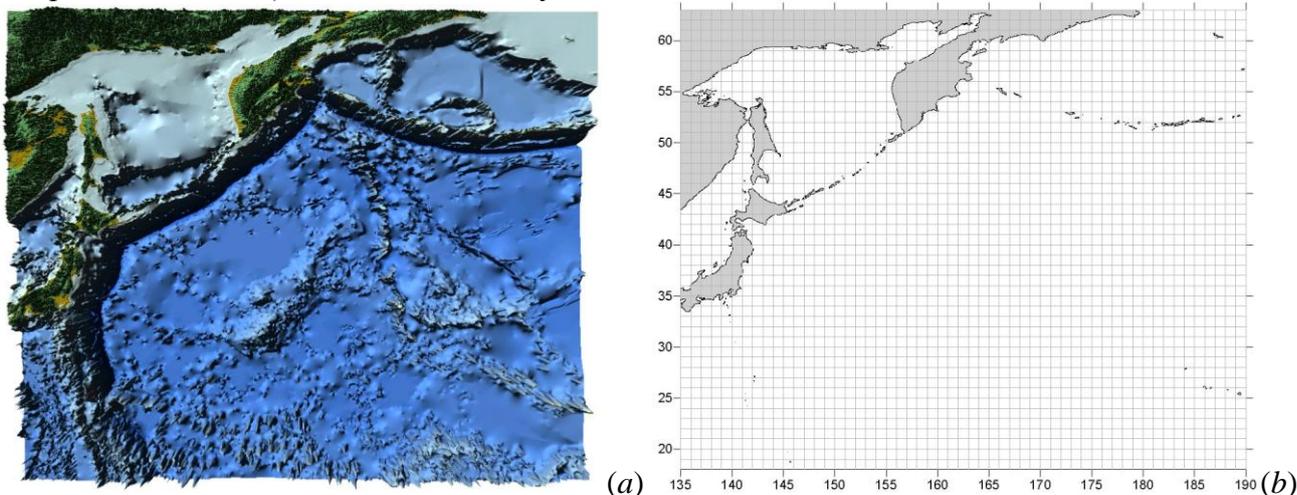


Рис. 13. Рельеф дна (a) и контур береговой линии (b) в подобласти, использованной для уточняющих расчетов.

По материалам уточняющих расчетов в соответствии с разработанной ранее технологией были построена база данных, содержащая результаты, предусмотренные Техническим заданием к настоящему контракту.

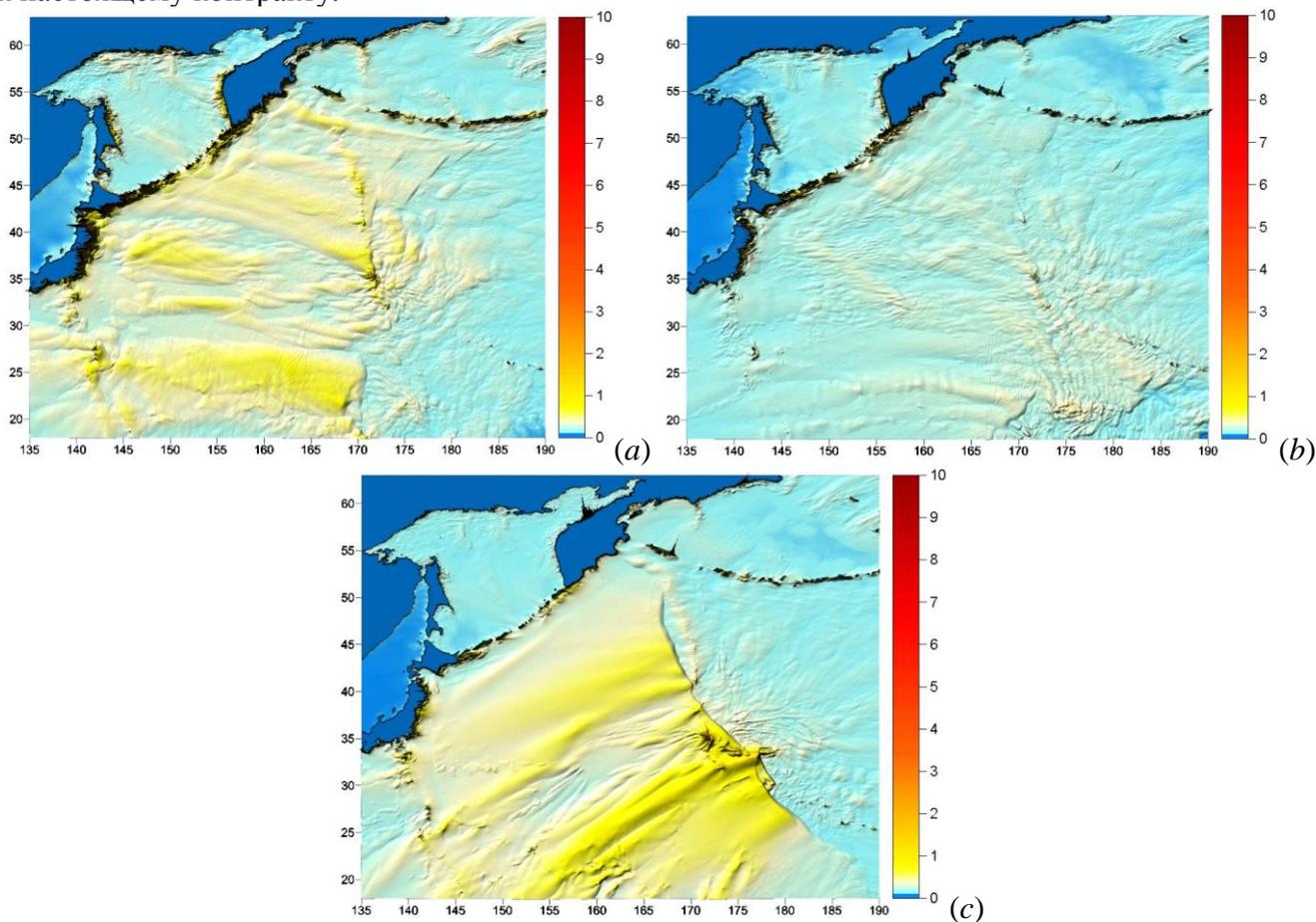


Рис. 14. Свечения цунами, порожденных модельными источниками «Chile-S» (a), «Chile-N» (b), «Cascadia» (c).

Приведенные выше картины свечений (Рис. 14) демонстрируют характерные для различных источников картины распространения волновой энергии. Для адекватной интерпретации этих рисунков следует учесть, что расчеты проводились в малой подобласти с использова-

нием в качестве начальных данных волновых полей (высоты волн и скорости), рассчитанных на некоторые, специально подобранные моменты времени (см. подпись к Рис. 12). Подробное описание такой методики приведено в уже упоминавшемся итоговом отчете по контракту № 2н-08 от 21 мая 2008 г. На фрагменте, соответствующем источнику «Chile-S» (Рис. 14, *a*), отчетливо видны ступки волновой энергии в акватории Охотского моря, пробившиеся сквозь островную Курильскую гряду к побережью.

Анализируя соответствующие распределения экстремальных высот волн (Рис. 15), следует учесть принятое исполнителями решение об исключении из рассмотрения пунктов, расположенных у побережья Приморья, в силу малости в этих пунктах высот волн цунами, рассчитанных на предварительном этапе (с использованием двухминутной сетки). Сравнение результатов, изображенных на этом рисунке, с результатами упомянутого выше предварительного расчета (Рис. 9) позволяет сделать вывод о незначительном влиянии двукратного увеличения разрешающей способности сетки на значения экстремальных высот волн. Сохраняется также и характер изменения исследуемых значений от пункта к пункту. Отмеченное обстоятельство скорее всего придаст планируемой серии расчетов на тридцатисекундной сетке в основном исследовательский характер.

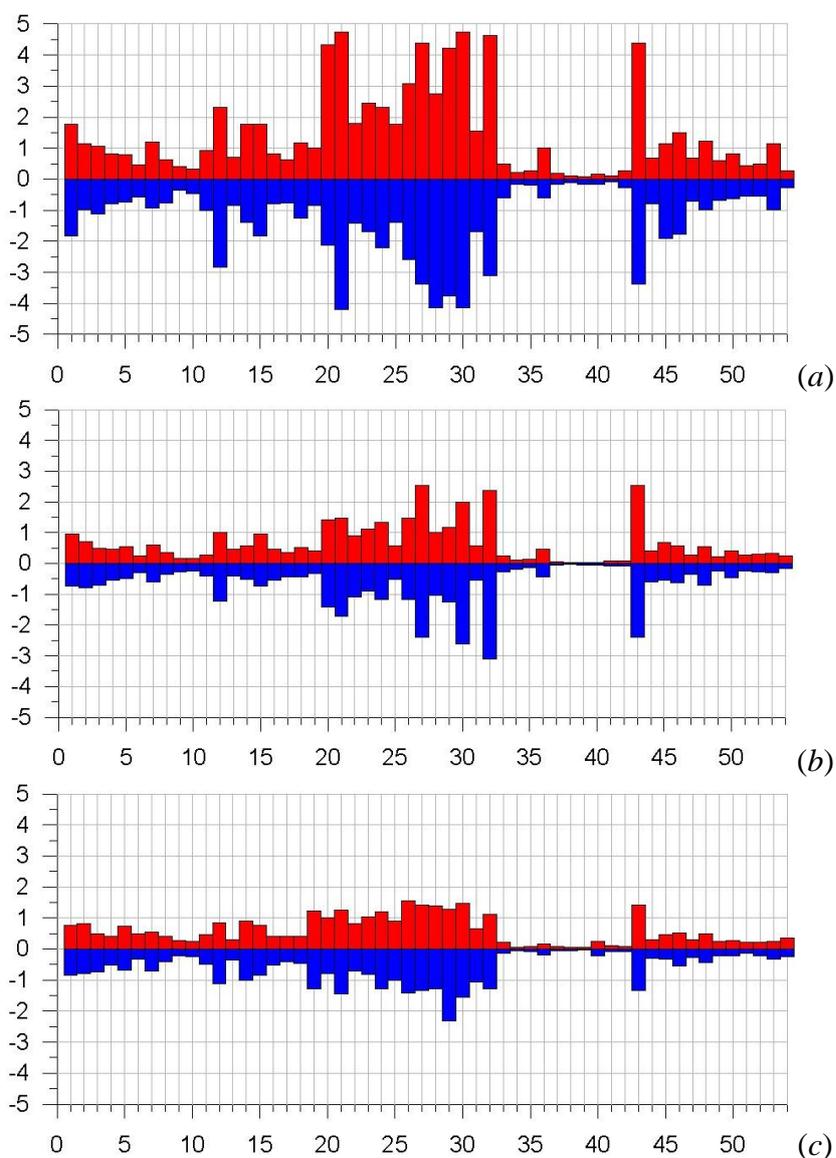


Рис. 15. Уточненные с помощью расчетов на одноминутной сетке распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах для модельных очагов «Chile-S» (a) «Chile-N» (b) и «Cascadia» (c).

8. Сравнительный анализ цунами опасности модельных источников удаленных цунами

С целью обоснования выбора модельных источников, использованных в ходе расчетов, результаты которых изложены выше, был построен набор дополнительных модельных источников, расположенных вдоль западного побережья Южной и Северной Америки. Их параметры близки соответствующим параметрам трех базовых модельных источников, которые, в свою очередь, были выбраны на основе анализа сейсмической обстановки, приведенного в итоговом отчете по контракту № 2н-08 от 21 мая 2008 г. Так, в северном полушарии были рассмотрены три модельных источника с параметрами, соответствующими источнику «Cascadia», первый из которых примыкал к источнику «Cascadia» с севера, второй – с юга, а третий располагался вблизи тихоокеанского побережья Мексики. Четвертый источник с параметрами, соответствующими источнику «Chile», располагался между рассмотренными ранее источниками «Chile-S» и «Chile-N». Последние два источника – пятый и шестой – имели параметры, соответствующие источнику «Iquique» (см. упомянутый выше итоговый отчет по контракту 2008 г.). Эти источники по своей «длине» вдвое короче источника «Chile» и располагались внутри источника «Chile-S» в северной и южной его половинах. Параметры источников и координаты их гипоцентров приведены в таблице (Таблица 5), а контуры соответствующих начальных возмущений изображены на рисунке (Рис. 16).

Таблица 5. Параметры дополнительных источников.

Name	y	x , с учетом перехода через 180 градусов в.д.	L , км	W , км	δ	λ	Θ	D_0 , м	H_{top} , км
1 (Cascadia-N)	51.1° с.ш.	«230.1°»	800	80	20°	90°	140°	15	10
2 (Cascadia-M)	36.7° с.ш.	«237.8°»	800	80	20°	90°	150°	15	10
3 (Cascadia-S)	13.1° с.ш.	«269.2°»	800	80	20°	90°	120°	15	10
4 (Chile-M)	32.8° ю.ш.	«287.8°»	1000	100	20°	90°	190°	20	10
5 (Iquique-M)	40.1° ю.ш.	«286.3°»	500	100	20°	90°	190°	10	10
6 (Iquique-S)	44.7° ю.ш.	«285.1°»	500	100	20°	90°	190°	10	10

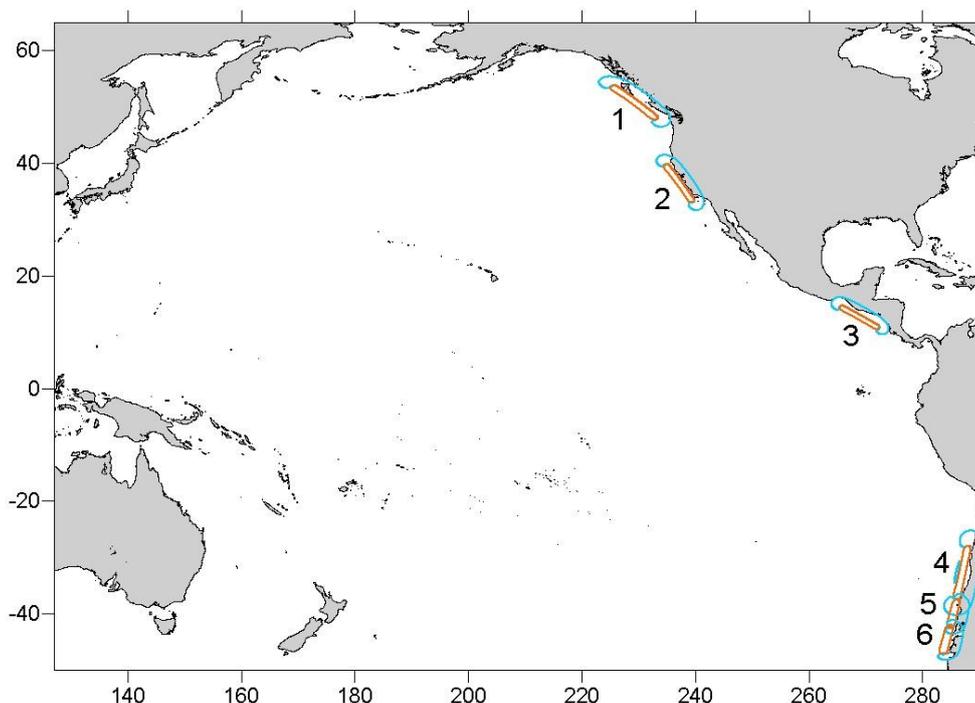


Рис. 16. Контуры начальных возмущений очагов.

С целью сравнительного анализа с полученными ранее результатами расчетов для трех исходных источников («Cascadia», «Chile-S», «Chile-N»), расчеты для новых шести источников были проведены на двухминутной сетке до момента времени 150000 секунд (~42 часа) во всей расчетной области для всех защищаемых пунктов. Ниже представлены полученные в ходе расчетов картины свечения (Рис. 17) и распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах (Рис. 18).

Картины свечения убедительно показывают, что для группы источников типа «Cascadia» только базовый источник (Рис. 17, *c* – «Cascadia») приводит к распространению волновой энергии по направлению к Дальневосточному побережью России. Смещение очага подводного землетрясения к северу, к югу и в район мексиканского побережья приводит к существенному изменению этого направления к югу. Так, для северного варианта (Рис. 17, *1* – «Cascadia-N») основной удар волны цунами принимают на себя острова Гавайского архипелага. Волна, порожденная южным вариантом источника (Рис. 17, *2* – «Cascadia-M»), задевает эти острова своей северной периферийной частью, а мексиканский вариант (Рис. 17, *3* – «Cascadia-S») генерирует волну, основная энергия которой уходит значительно южнее, частично затрагивая побережье Новой Зеландии.

Картины свечения от Чилийских источников также подтверждают обоснованность выбора в качестве основного, наиболее опасного для защищаемых пунктов побережья России, источника «Chile-S» (Рис. 17, *a*). Порожденная им волна обладает ярко выраженной направленностью распространения энергии, сосредоточенной в относительно узкой полосе, упирающейся в побережье Камчатки и Курильских островов. Как покажут приведенные ниже распределения экстремальных высот (Рис. 18, *a*), волнам от этого источника удастся проникнуть сквозь проливы в акваторию Охотского моря и заметно проявиться у берегов о-ва Сахалин. Наименее опасным, как и ожидалось, является промежуточное положение очага этого типа (Рис. 17, Рис. 18, *4* – «Chile-M»). Несколько большие амплитуды волн порождаются источником «Chile-N». (Рис. 17, Рис. 18, *b*).

Заключительный фрагмент рисунка (Рис. 17, *5,6*) иллюстрирует характеристики распространения волновой энергии от модельных источников, параметры которых связаны с историческим цунамигенным землетрясением вблизи г. Икике (Iquique, 1877 г.). Как показывают соответствующие распределения максимальных и минимальных высот волн (Рис. 18, *5,6*), их значения уступают «чилийским». Смещение источника к югу (Рис. 17, *6* – «Iquique-S») приводит к изменению трассы распространения волновой энергии, которая в отличие от незначительно сдвинутого к северу варианта источника (Рис. 17, *5* – «Iquique-M») обходит Гавайские о-ва с юга, при этом несколько возрастает ширина зоны основного потока энергии.

Непосредственное сопоставление результатов расчетов для различных типов модельных источников приведено на следующих рисунках (Рис. 19, Рис. 20), при этом на фрагментах (*d*) вместе с графиками, полученными с применением источников «Iquique-M» и «Iquique-S», приведены графики, соответствующие источнику «Chile-S», внутри контура которого и размещены эти источники.

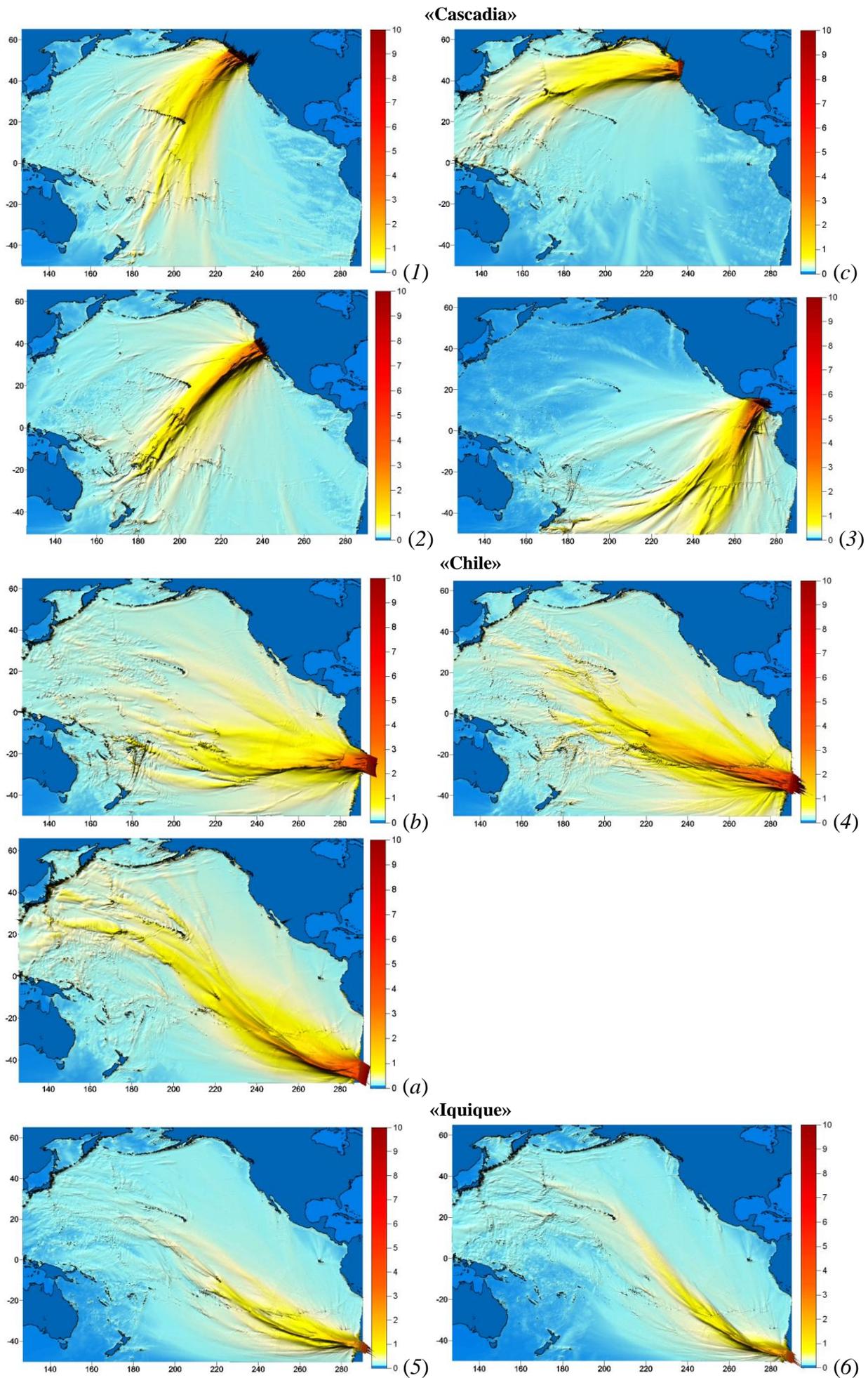
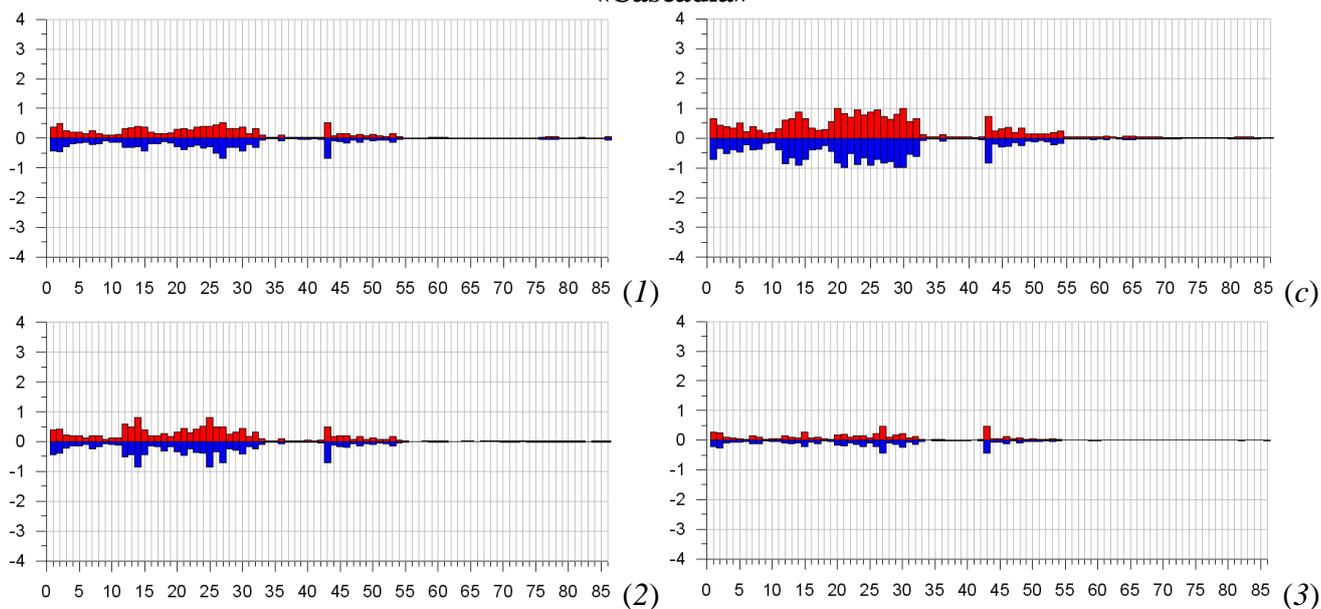
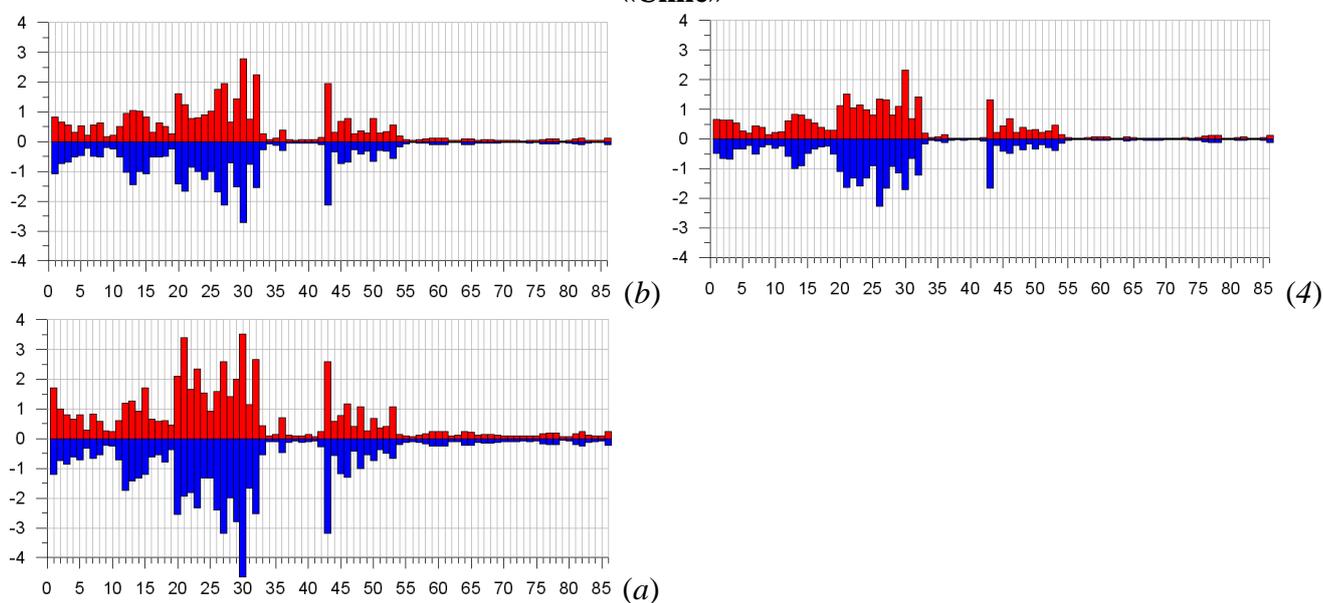


Рис. 17. Картины свечения удаленных цунами для дополнительных модельных источников.

«Cascadia»



«Chile»



«Iquique»

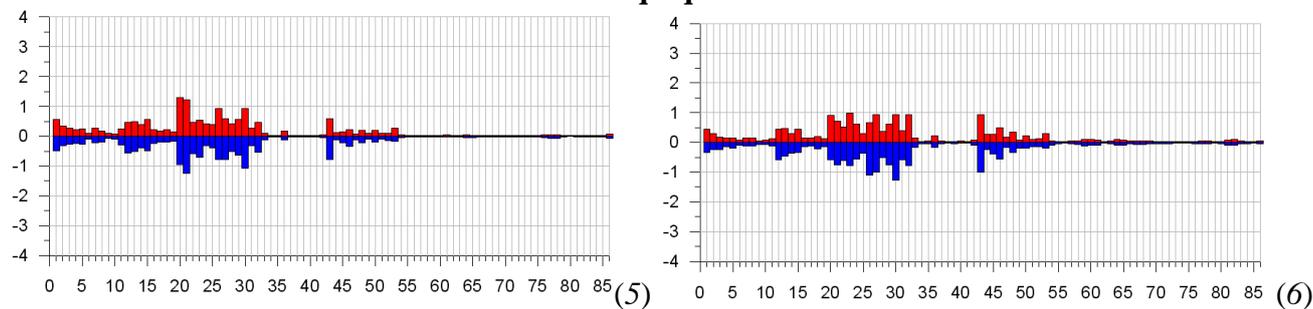
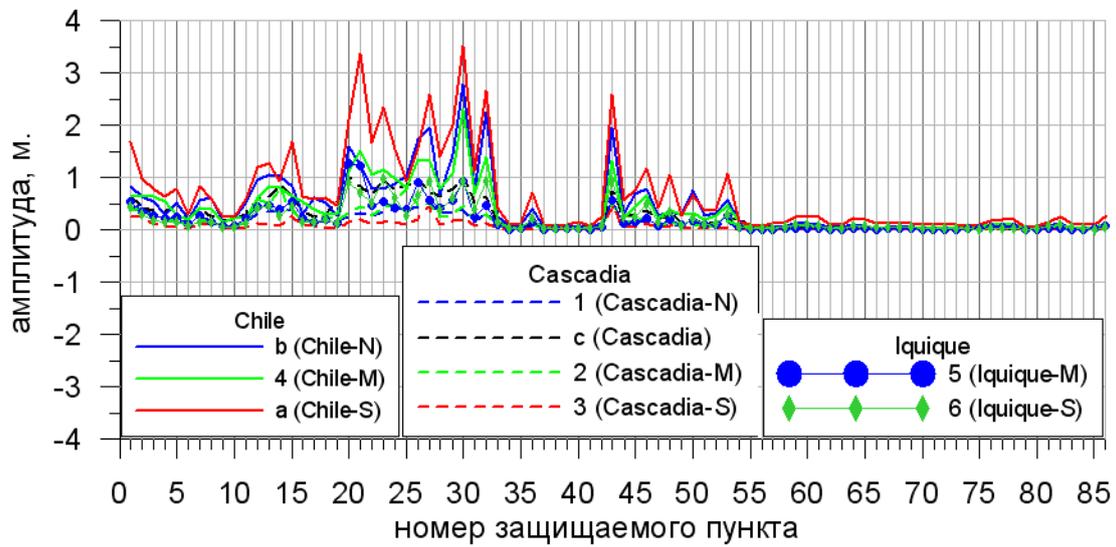
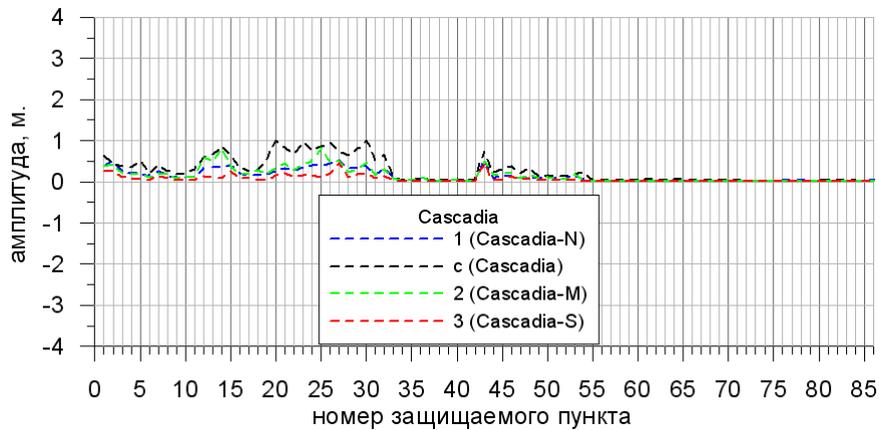


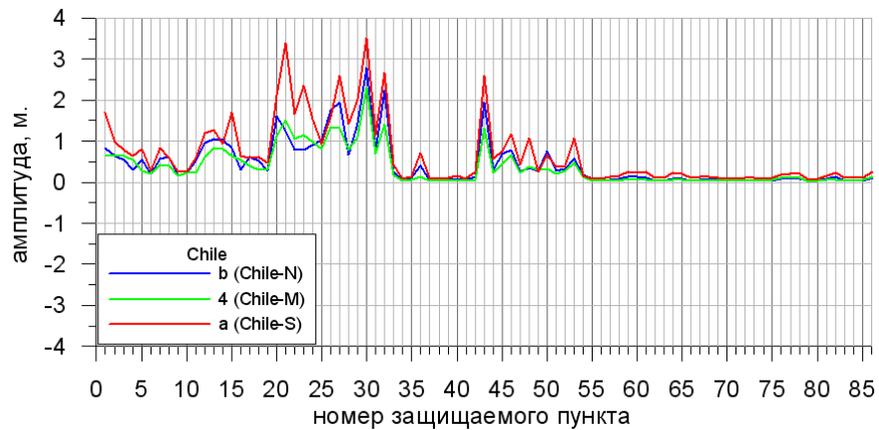
Рис. 18. Распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах от модельных удаленных цунами.



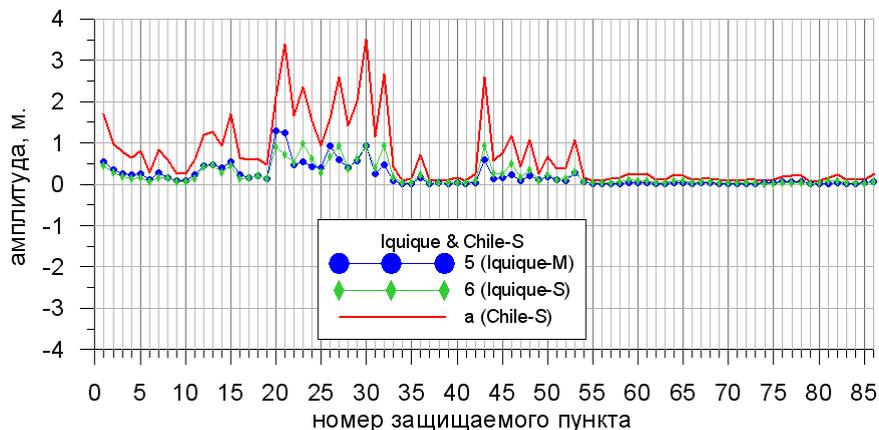
(a)



(b)

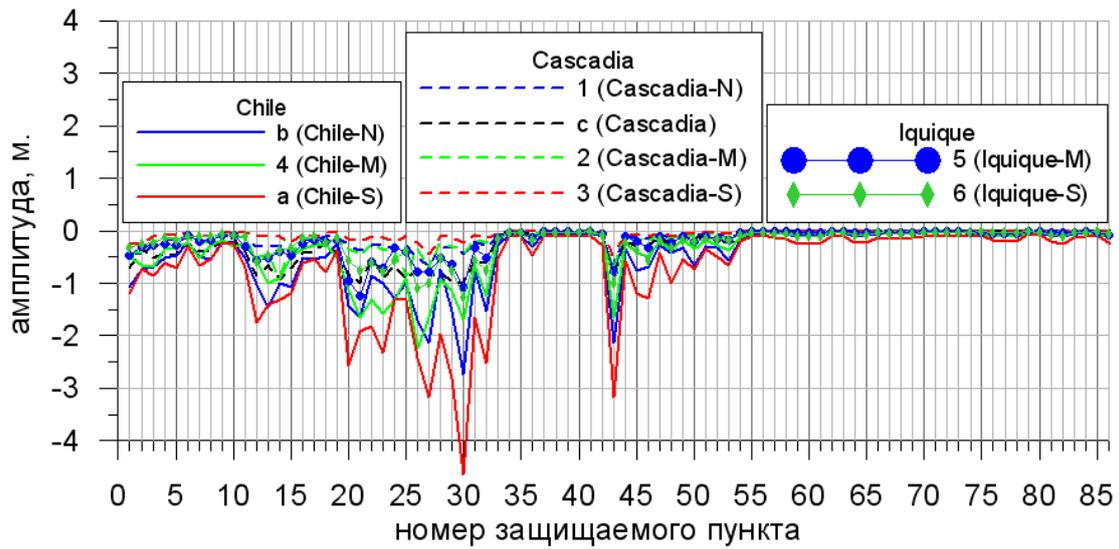


(c)

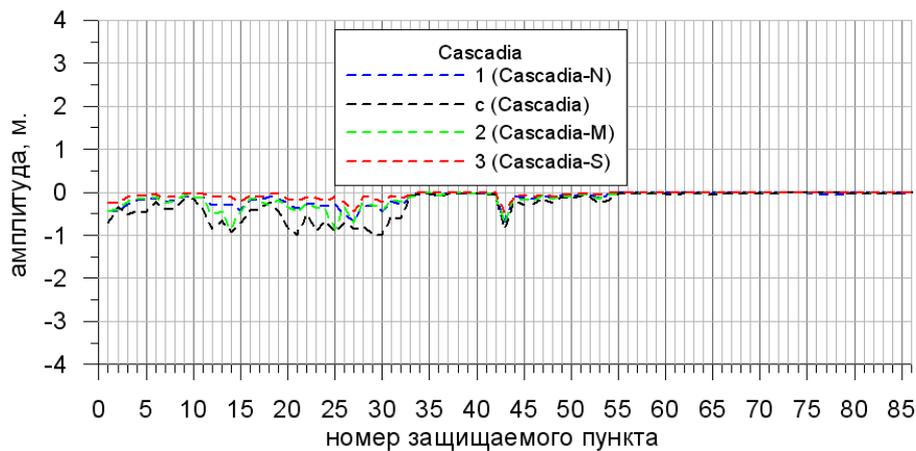


(d)

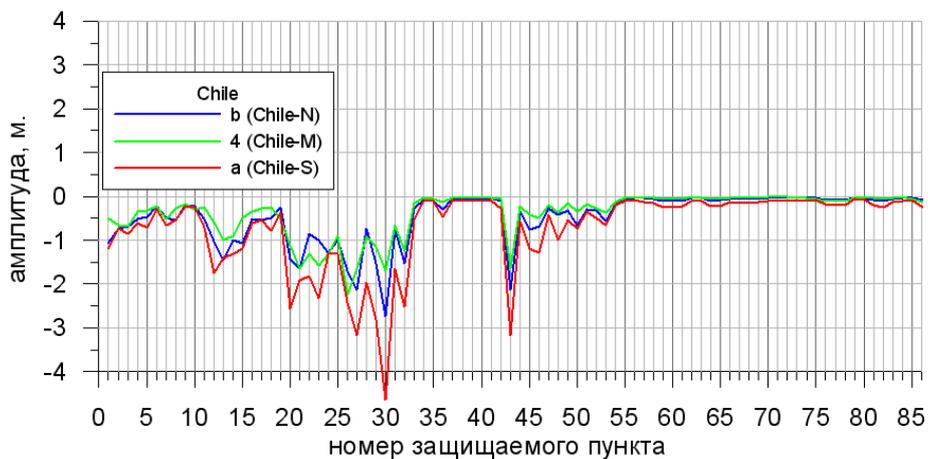
Рис. 19. Сравнение максимальных значений высот волн в защищаемых пунктах от различных типов модельных удаленных источников.



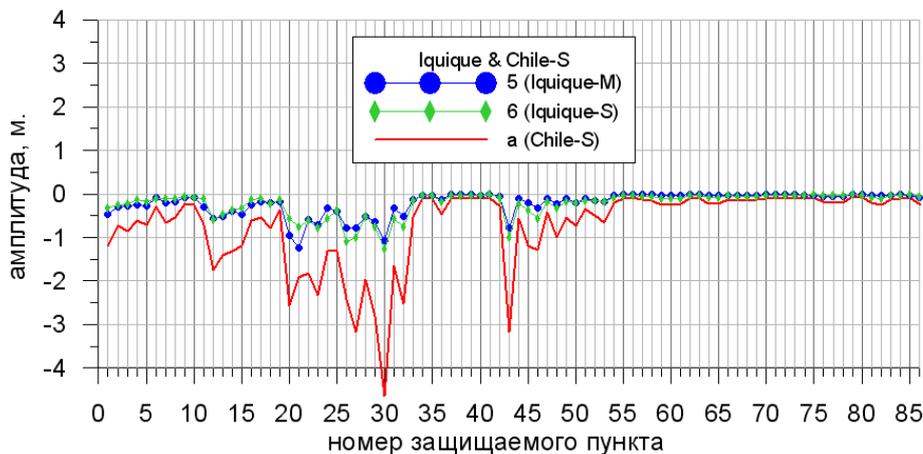
(a)



(b)



(c)



(d)

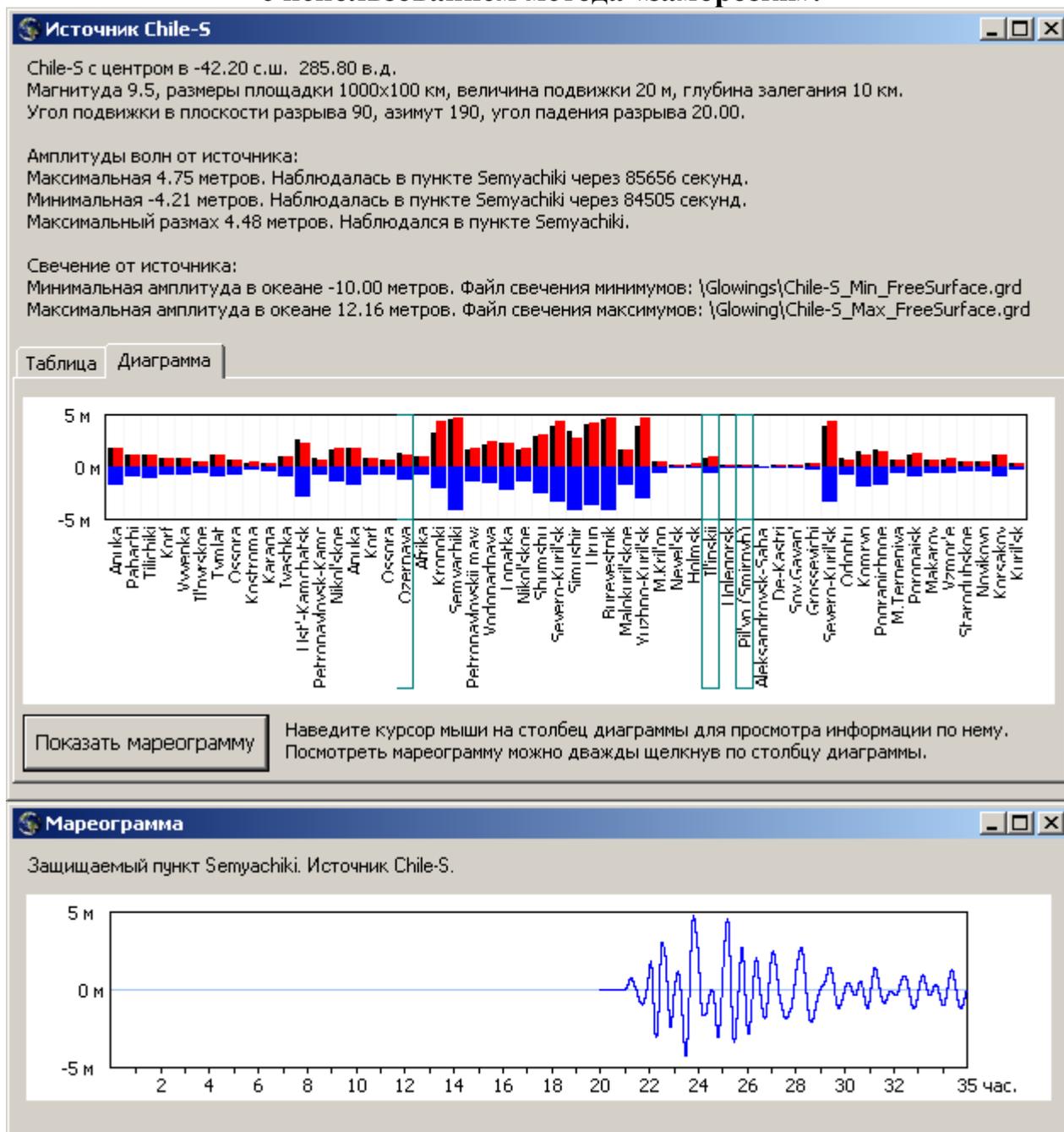
Рис. 20. Сравнение минимальных значений высот волн в защищаемых пунктах от различных типов модельных удаленных источников.

9. Заключение

Таким образом, исполнителями на первом этапе работы получены следующие результаты:

1. определены потенциально опасные для дальневосточного побережья РФ зоны удаленных цунамигенных землетрясений;
2. рассчитаны поля изохрон волн цунами, порожденных такими землетрясениями;
3. определен перечень защищаемых пунктов, уточнены их географические координаты;
4. определены параметры расчетной области; построены соответствующие массивы цифровой батиметрии, выполнена привязка защищаемых пунктов к контуру оцифрованной береговой линии;
5. определены параметры модельных очагов цунамигенных землетрясений, рассчитаны соответствующие поля начальных возмущений;
6. выполнены расчеты на пяти- и двухминутной сетках по моделированию цунами, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений, определены экстремальные характеристики проявления цунами в защищаемых пунктах, рассчитаны поля «свечений»;
7. выбрана расчетная подобласть для проведения уточняющих расчетов на одноминутной сетке;
8. проведены уточняющие расчеты с использованием метода «заморозки»;
9. предложена система «дополнительных» модельных очагов для сравнительного анализа рассчитанных режимов и обоснования выбора базовых модельных очагов «Chile-S», «Chile-N», «Cascadia»;
10. выполнены расчеты трансформации цунами, порожденных «дополнительными» источниками, результаты этих расчетов, сопоставлены с ранее полученными материалами для базовых источников;
11. созданы базы данных по материалам проведенных расчетов.

Материалы базы данных по расчетам на одноминутной сетке с использованием метода «заморозки».



Источник Chile-N

Chile-N с центром в -23.30 с.ш. 289.60 в.д.
Магнитуда 9.5, размеры площадки 1000x100 км, величина подвижки 20 м, глубина залегания 10 км.
Угол подвижки в плоскости разрыва 90, азимут 180, угол падения разрыва 20.00.

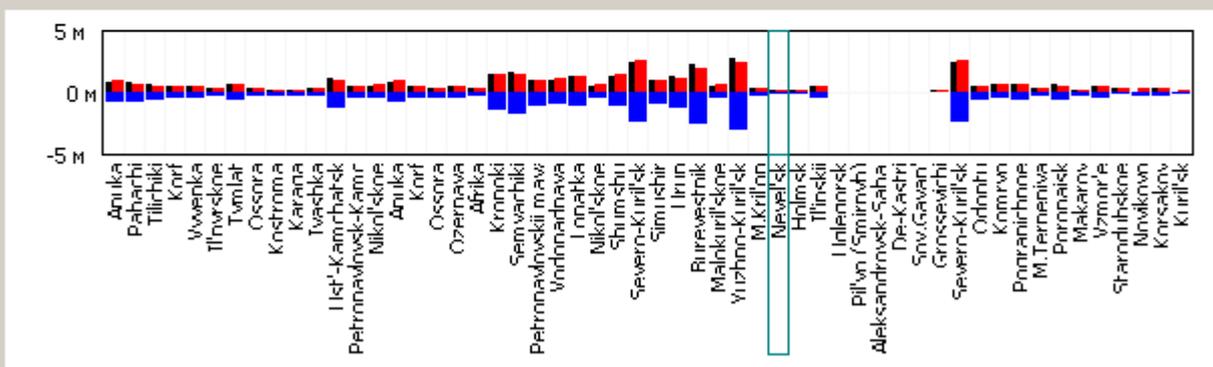
Амплитуды волн от источника:

Максимальная 2.53 метров. Наблюдалась в пункте Severo-Kuril'sk через 87044 секунд.
Минимальная -3.11 метров. Наблюдалась в пункте Yuzhno-Kuril'sk через 98100 секунд.
Максимальный размах 2.73 метров. Наблюдался в пункте Yuzhno-Kuril'sk.

Свечение от источника:

Минимальная амплитуда в океане -7.23 метров. Файл свечения минимумов: {Glowings}\Chile-N_Min_FreeSurface.grd
Максимальная амплитуда в океане 6.91 метров. Файл свечения максимумов: {Glowing}\Chile-N_Max_FreeSurface.grd

Таблица Диаграмма

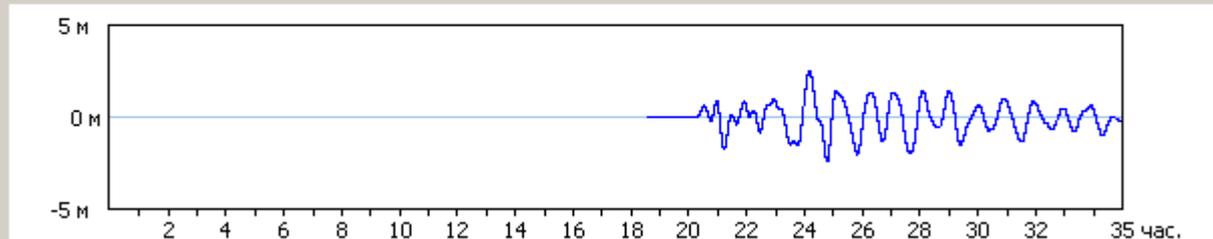


Показать мареограмму

Наведите курсор мыши на столбец диаграммы для просмотра информации по нему.
Посмотреть мареограмму можно дважды щелкнув по столбцу диаграммы.

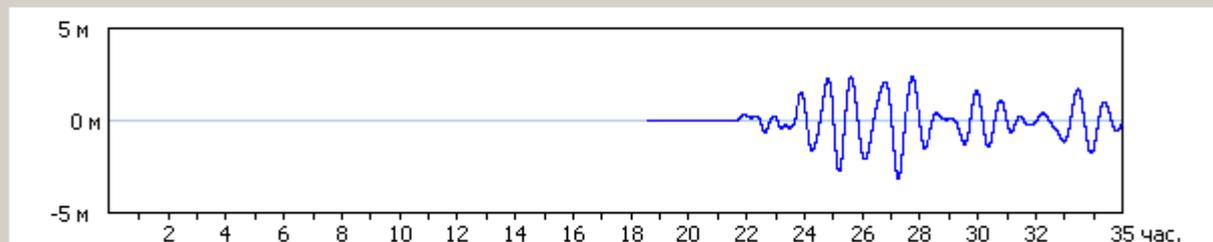
Мареограмма

Защищаемый пункт Severo-Kuril'sk. Источник Chile-N.



Мареограмма

Защищаемый пункт Yuzhno-Kuril'sk. Источник Chile-N.



Источник Cascadia

Магнитуда 9.0, размеры площадки 800x80 км, величина подвижки 20 м, глубина залегания 10 км.
Угол подвижки в плоскости разрыва 90, азимут 180, угол падения разрыва 15.00.

Амплитуды волн от источника:

Максимальная 1.54 метров. Наблюдалась в пункте Shumshu через 41082 секунд.

Минимальная -2.32 метров. Наблюдалась в пункте Urup через 37915 секунд.

Максимальный размах 1.80 метров. Наблюдался в пункте Urup.

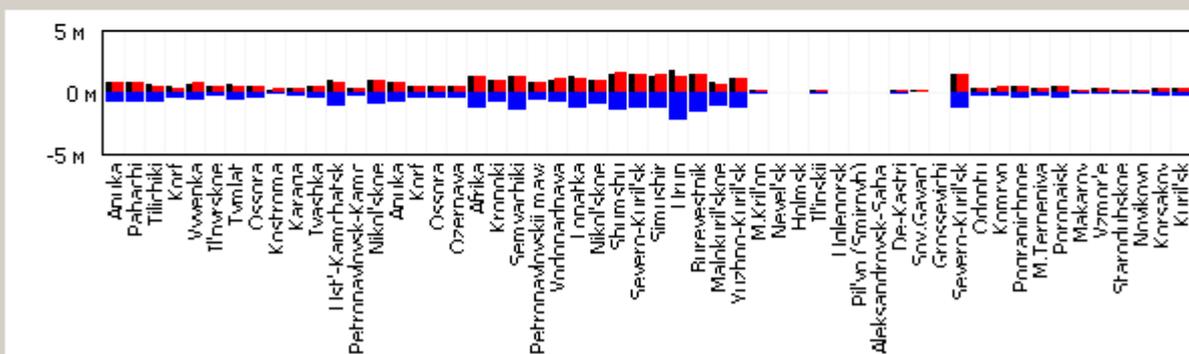
Свечение от источника:

Минимальная амплитуда в океане -10.00 метров. Файл свечения минимумов: \Glowings\Cascadia_Min_FreeSurface.grd

Максимальная амплитуда в океане 11.33 метров. Файл свечения максимумов:

\Glowing\Cascadia_Max_FreeSurface.grd

Таблица Диаграмма

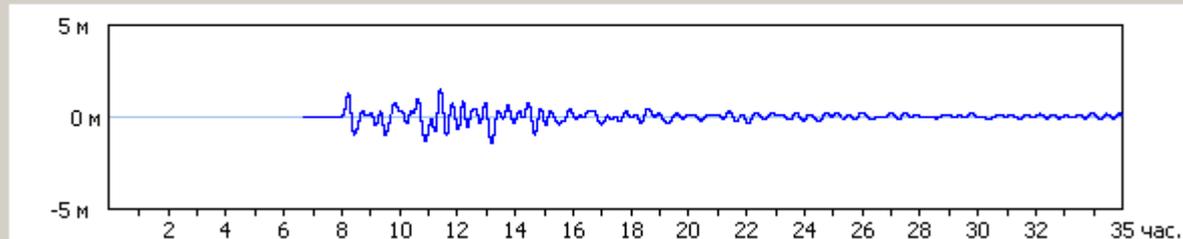


Показать мареограмму

Наведите курсор мыши на столбец диаграммы для просмотра информации по нему.
Посмотреть мареограмму можно дважды щелкнув по столбцу диаграммы.

Мареограмма

Защищаемый пункт Shumshu. Источник Cascadia.



Мареограмма

Защищаемый пункт Urup. Источник Cascadia.

