

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

30 октября 2010 года

**«Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов побережья  
Дальнего востока РФ для модельных очагов удаленных цунамигенных  
землетрясений, детальные расчеты на основе уточненной батиметрии  
для модельных очагов ближней зоны»**

**ИТОГОВЫЙ 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-10 от 01 февраля 2010 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2010 г

Исполнители:

в.н.с., д.ф.-м.н.

м.н.с.

инженер-исследователь

В.К. Гусяков

Д.Л. Чубаров

С.А. Бейзель

## Содержание

Содержание.....	3
1. Введение .....	4
2. Важное замечание .....	4
3. Краткая характеристика выполненных работ .....	5
УДАЛЕННЫЕ ЦУНАМИ .....	7
4. База данных модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений .....	7
5. Результаты предварительного моделирования удаленных цунами.....	11
ЦУНАМИ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ.....	23
6. Уточненная база данных модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны	23
7. Защищаемые пункты .....	27
8. Сравнение результатов моделирования ближних цунами в малых подобластях и в глобальной расчетной области .....	29
9. Результаты моделирования ближних цунами на детальной пятнадцатисекундной сетке .....	31
10. Заключение.....	37
11. Литература.....	37
12. Приложение 1. Гистограммы распределения экстремальных значений высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ по материалам уточненных расчетов в глобальной области на сетке с пространственным разрешением 15 географических секунд.....	41
13. Приложение 2. Зависимость результатов моделирования от разрешающей способности сетки .....	65
14. Приложение 3. Зависимость результатов моделирования от ориентации источника .....	67

## **1. Введение**

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ, согласно Техническому заданию, содержит результаты работ, сгруппированные по двум следующим разделам.

### **Удаленные цунами**

1. Представительный набор модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений, потенциально опасных для Дальневосточного побережья России.
2. База данных результатов предварительного моделирования (пятиминутная сетка) на 40 часов физического времени трансформации волн цунами, порожденных четырьмя модельными удаленными очагами цунамигенных землетрясений, потенциально опасными для Дальневосточного побережья России.
3. Материалы, полученные в ходе интерпретации результатов предварительного моделирования на пятиминутной сетке волн цунами, порожденных указанным в п. 2 набором модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений:
  - распределения экстремальных значений (максимальных и минимальных) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья России, включая защищаемые пункты, входящие в перечень, составленный Заказчиком;
  - распределения времен регистрации экстремальных значений (максимальных и минимальных) высот волн цунами в защищаемых пунктах;
  - распределения времен регистрации первых локальных положительных экстремальных значений высот волн цунами в защищаемых пунктах;
  - распределения «ожидаемых времен прихода волн цунами» в защищаемых пунктах;
  - распределения максимальных высот волн цунами в акватории Тихого океана после 40 часов трансформации в виде сеток (картин свечения);
  - мареограммы, рассчитанные в представительном наборе виртуальных мареографов, входящих в систему гидрофизических датчиков Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS).

### **Цунами ближней зоны**

1. Уточненный представительный набор модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны, в соответствии с сеймотектоническими особенностями акваторий Тихого океана, прилегающих к Камчатке и Курильским островам;
2. База данных рассчитанных за период 17.5 часов физического времени максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах для модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны, созданная на основе уточненной батиметрии;
3. База данных рассчитанных за период 17.5 часов физического времени мареограмм в защищаемых пунктах для модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны, созданная на основе уточненной батиметрии;
4. Результаты расчетов максимальных и минимальных высот волн рассчитанных за период 17.5 часов физического времени на основе уточненной батиметрии в виде сеток (картин свечения) для используемых модельных источников ближней зоны;
5. Результаты анализа и уточнения размеров и географического положения цунамигенных зон на основе результатов моделирования максимальных высот волн в защищаемых пунктах Камчатки, Курильских островов, восточного побережья о-ва Сахалин.

## **2. Важное замечание**

**Представленные на совещании исполнительной ФЦП (г. Южно-Сахалинск, июнь, 2010 г.) результаты решения модельных тестовых задач (см. также Приложение 2 к настоящему отчету) показали, что рассчитанные на пятнадцатисекундной сетке значения амплитуд волн цунами составляют около 75 % «правильных» значений, определяемых как предел сходимости решений этих задач при измельчении пространственного шага расчетной сетки.**

**Это обстоятельство недвусмысленно указывает на неоднократно указываемую необходимость выделения финансирования для создания национальной открытой базы батиметрических цифровых данных для акваторий, примыкающих к Дальневосточному побережью России.**

### **3. Краткая характеристика выполненных работ**

Полученные результаты представлены в виде соответствующих баз данных, файлов с результатами расчетов, таблиц, графиков, содержательных текстов. Структуры соответствующих файлов подробно изложены в отчетах, переданных Заказчику в 2007–2009 гг.

Результаты работ первого этапа, предусмотренных календарным планом, были изложены в Отчете от 15 сентября 2010 г., а соответствующие численные и графические материалы переданы в электронной форме.

Содержание этих результатов, полученных на **первом этапе**, таково:

1. согласован перечень защищаемых пунктов, уточнены их географические координаты;
2. определены потенциально опасные для исследуемого побережья цунамигенные землетрясения ближней зоны;
3. определены параметры «глобальной» расчетной области; построены соответствующие массивы цифровой батиметрии, выполнена привязка защищаемых пунктов к контуру оцифрованной береговой линии;
4. определены параметры модельных очагов цунамигенных землетрясений, рассчитаны соответствующие поля начальных возмущений;
5. на одноминутной расчетной сетке выполнено предварительное моделирование цунами, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений ближней зоны, определены экстремальные характеристики проявления цунами в защищаемых пунктах, рассчитаны поля максимальных и минимальных высот волн в виде сеток (картин свечения);
6. для проведения уточняющих расчетов на более детальной пятнадцатисекундной сетке определены параметры «малых» расчетных областей; построены соответствующие массивы цифровой батиметрии, выполнена привязка защищаемых пунктов к контурам оцифрованных береговых линий;
7. подготовлены исходные данные для проведения уточняющих расчетов на измельченных (до 15 секунд) сетках;
8. выполнены расчеты в «малых» подобластях на детальной пятнадцатисекундной сетке по моделированию цунами, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений ближней зоны, определены экстремальные характеристики проявления цунами в защищаемых пунктах, рассчитаны поля «свечений».
9. Результаты конвертированы в Базы данных, оснащенные необходимым графическим интерфейсом и средствами поиска.

На **заключительном** этапе работы проводились в двух направлениях.

#### **Удаленные цунами.**

*Первое* направление работ, согласно Техническому заданию, было связано с определением воздействия удаленных цунами на защищаемое побережье. Полученные здесь результаты основаны на материалах исследований, выполнявшихся по контрактным заданиям 2008 – 2009 гг.

Следуя изложенной созданной исполнителями информационно-вычислительной технологии, на первом шаге был построен геофизически обоснованный набор цунамигенных землетрясений, способных породить волны цунами, проявляющиеся у защищаемого побережья РФ. Были определены параметры таких землетрясений с магнитудой  $M_w = 9.0$ . По этим параметрам были рассчитаны соответствующие поля начальных смещений поверхности океана. Эти результаты позволили, в свою очередь, определить глобальную расчетную область, обеспечивающую с необходимой детальностью учет взаиморасположения защищаемых пунктов и очагов начальных возмущений поверхности океана. Первые, предварительные результаты были получены в

ходе моделирования на пятиминутной сетке волн цунами от набора удаленных очагов, представляющих различные зоны вероятного расположения цунамигенных землетрясений. Эти предварительные результаты послужили исходным материалом для анализа распределений экстремальных характеристик волн как вдоль Дальневосточного побережья РФ, так и в некоторых мареографных пунктах Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS), выявления закономерностей трансформации этих волн при их распространении по акватории океана и взаимодействии с берегом.

Таким образом, удалось заложить надежный базис для определения с необходимой детальностью на последующих этапах работ экстремальных значений высот волн у защищаемого побережья, порожденных удаленными цунами. Для получения адекватных по точности результатов с учетом размеров расчетной области и протяженности трасс распространения волн от зон источников возмущений к защищаемым пунктам будет необходимо:

1. сформулировать постановки задач для систематических модельных предварительных расчетов на пятиминутной и двухминутной сетках;
2. провести с необходимой полнотой предварительные вычислительные эксперименты на этих сетках;
3. уточнить батиметрические массивы и адаптировать их к особенностям вычислительных алгоритмов;
4. выделить малые подобласти для детального моделирования трансформации удаленных волн цунами вблизи Дальневосточного побережья РФ с использованием разработанной и тщательно исследованной ранее методики «заморозки»;
5. провести с необходимой полнотой модельные предварительные расчеты в «малых подобластях»;
6. уточнить соответствующие батиметрические массивы для «малых подобластей»;
7. провести необходимые серийные вычислительные эксперименты, в ходе которых рассчитать мареограммы в установленных виртуальных мареографных пунктах («основных» – в защищаемых пунктах и в «дополнительных» – вдоль всего защищаемого побережья с частотой не более 20 км, необходимой для содержательного анализа результатов); рассчитать экстремальные значения высот волн в виртуальных мареографах, а также рассчитать поля максимальных и минимальных высот волн в виде сеток (картин свечения).

Предложенная программа работ потребует привлечения весьма значительных вычислительных ресурсов и больших объемов дискового (ленточного) пространства для хранения промежуточных и итоговых данных, а также для обработки результатов расчетов. Эти обстоятельства определяют значительную продолжительность выполнения работ (не менее календарного года), необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов и достаточный объем финансирования (около 3 000 000 руб.).

### **Цунами ближней зоны.**

Со *вторым* направлением связаны работы по уточнению полученных на первом этапе результатов, касающихся моделирования «ближних» цунами:

1. определение границ уточненной глобальной расчетной области на пятнадцатисекундной сетке; построение соответствующих массивов цифровой батиметрии, привязка защищаемых пунктов к обновленному контуру оцифрованной береговой линии;
2. уточнение параметров модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны и расчет соответствующих полей начальных возмущений;
3. подготовка исходных данных для проведения уточняющих расчетов на измельченной (до 15 секунд) сетке в части, касающейся формирования дополнительных виртуальных мареографов, использованных в ходе интерпретации результатов;
4. проведение расчетов в «глобальной» области на детальной пятнадцатисекундной сетке по моделированию цунами, порожденных модельными очагами цунамигенных землетрясений;
5. определение экстремальных характеристик проявления цунами в защищаемых пунктах и в дополнительных виртуальных мареографных пунктах, расчет полей «свечений»;

6. анализ точности технологии «малых подобластей» путем сопоставления результатов работ, выполненных на первом и заключительном этапах календарного плана.

Результаты проведенных расчетов позволили выполнить одно из основных требований Технического задания – определить степень опасности различных цунамигенных зон для различных участков побережья.

## УДАЛЕННЫЕ ЦУНАМИ

### 4. База данных модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений

Предлагаемый исполнителями набор из 90 удаленных (по отношению к Дальневосточному региону РФ) источников цунами можно условно разбить на группы, соответствующие географическим зонам их расположения. Таких групп оказалось 8 (в скобках указаны идентификаторы источников, соответствующие их перечислению в Табл. 1):

1. Алеуто-Аляскинская группа (1а – 8а),
2. Североамериканская группа (9а – 22а),
3. Центральноамериканская группа (23а – 29а),
4. Южноамериканская группа (30а – 46а),
5. группа Новой Зеландии – Тонга (47а – 57а),
6. группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58а – 74а),
7. Филиппинская группа (75а – 86а),
8. группа Гуама (87а – 90а).

Удаленные источники цунами (Табл. 1) аппроксимировались системой модельных очагов подводных землетрясений с магнитудой  $M_w = 9.0$ . Очаг такого землетрясения представляет собой площадку разрыва длиной  $L = 430$  км и шириной  $W = 150$  км с величиной подвижки по ней  $D_0 = 11.6$  м. Сейсмический момент такого источника равен  $M_0 = 3.6 \cdot 10^{22}$  н·м, что по корреляционному соотношению [Kanamori, 1977]  $M_w = (\lg M_0 - 16.1)/1.5$  как раз и соответствует магнитуде  $M_w = 9.0$ .

Табл. 1. Таблица параметров модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M_w = 9.0$  (знак «-» соответствует «Южной широте» и «Западной долготе»)

ID	Latitude (N)	Longitude (E)	L (km)	W (km)	DE (grad)	LA (grad)	TE (grad)	D0 (m)	H_top (km)
1a	55	167.95	430	150	10	170	125	11.6	5
2a	53	173.4	430	150	10	160	110	11.6	5
3a	51.9	179.99	430	150	15	150	90	11.6	5
4a	52.5	-173.5	430	150	15	140	70	11.6	5
5a	53.8	-167.3	430	150	20	125	65	11.6	5
6a	55.5	-161.3	430	150	20	110	60	11.6	5
7a	58	-155.3	430	150	20	100	55	11.6	5
8a	60.5	-149.5	430	150	20	90	50	11.6	5
9a	60.9	-145.6	430	150	20	90	110	11.6	5
10a	59.2	-138.6	430	150	20	90	130	11.6	5
11a	56.3	-133.7	430	150	20	90	145	11.6	5
12a	53.2	-129.8	430	150	20	90	148	11.6	5
13a	49.8	-126.7	430	150	20	90	150	11.6	5
14a	46.4	-124	430	150	20	90	170	11.6	5
15a	42.6	-124.2	430	150	20	90	175	11.6	5
16a	38.7	-123.3	430	150	20	90	160	11.6	5
17a	35.3	-120.5	430	150	20	90	145	11.6	5
18a	32.1	-117.6	430	150	20	90	140	11.6	5

19a	29.2	-114.8	430	150	20	90	143	11.6	5
20a	26.1	-112.3	430	150	20	90	143	11.6	5
21a	22.8	-109.3	430	150	20	90	138	11.6	5
22a	20.3	-106.3	430	150	20	90	130	11.6	5
23a	17.9	-103.2	430	150	20	90	120	11.6	5
24a	16.5	-99.7	430	150	20	90	110	11.6	5
25a	15.6	-95.4	430	150	20	90	105	11.6	5
26a	14.2	-91.6	430	150	20	90	110	11.6	5
27a	12.9	-87.9	430	150	20	90	125	11.6	5
28a	10	-85	430	150	20	90	130	11.6	5
29a	8.2	-81.7	430	150	20	90	120	11.6	5
30a	6	-77.5	430	150	20	90	180	11.6	5
31a	2.3	-78.8	430	150	20	90	210	11.6	5
32a	-1	-81	430	150	20	90	200	11.6	5
33a	-4.8	-81	430	150	20	90	180	11.6	5
34a	-8	-79.3	430	150	20	90	150	11.6	5
35a	-11.4	-77.5	430	150	20	90	150	11.6	5
36a	-14.8	-75.7	430	150	20	90	140	11.6	5
37a	-16.8	-72.3	430	150	20	90	130	11.6	5
38a	-20.1	-70.2	430	150	20	90	185	11.6	5
39a	-24	-70.6	430	150	20	90	190	11.6	5
40a	-27.8	-71.1	430	150	20	90	185	11.6	5
41a	-31.9	-71.5	430	150	20	90	190	11.6	5
42a	-35.6	-72.4	430	150	20	90	190	11.6	5
43a	-39.5	-73.6	430	150	20	90	190	11.6	5
44a	-43.3	-74.5	430	150	20	90	185	11.6	5
45a	-47.3	-74.9	430	150	20	90	177	11.6	5
46a	-51.4	-74.1	430	150	20	90	170	11.6	5
47a	-55	160	430	150	30	90	25	11.6	5
48a	-51.4	163.8	430	150	30	90	30	11.6	5
49a	-48.2	167.9	430	150	30	90	35	11.6	5
50a	-44.9	171.6	430	150	30	90	38	11.6	5
51a	-41.9	175.2	430	150	30	90	35	11.6	5
52a	-38.1	178.6	430	150	30	90	30	11.6	5
53a	-34.2	-179	430	150	30	90	25	11.6	5
54a	-30.3	-177.1	430	150	30	90	20	11.6	5
55a	-26.1	-175.4	430	150	30	90	18	11.6	5
56a	-22.2	-174	430	150	30	90	18	11.6	5
57a	-17.9	-172.7	430	150	30	90	10	11.6	5
58a	-14.5	-173.8	430	150	45	90	120	11.6	5
59a	-16.2	-177.5	430	150	45	90	45	11.6	5
60a	-19.3	178.5	430	150	45	90	50	11.6	5
61a	-21.4	175	430	150	45	90	55	11.6	5
62a	-22.7	170.5	430	150	45	90	-15	11.6	5
63a	-18.9	169.2	430	150	45	90	-20	11.6	5
64a	-14.9	167.4	430	150	45	90	-25	11.6	5
65a	-10.9	165.4	430	150	45	90	-30	11.6	5
66a	-10	160	430	150	45	90	-50	11.6	5
67a	-7.4	156.6	430	150	45	90	-50	11.6	5
68a	-4.9	153.2	430	150	45	90	-50	11.6	5
69a	-6	148.4	430	150	45	90	-45	11.6	5
70a	-3.5	145.4	430	150	45	90	-55	11.6	5

71a	-2	141.4	430	150	45	90	-65	11.6	5
72a	-0.7	137.5	430	150	45	90	-75	11.6	5
73a	-0.1	133.3	430	150	45	90	-85	11.6	5
74a	0.8	129.2	430	150	45	90	-30	11.6	5
75a	3.7	126.8	430	150	45	90	-5	11.6	5
76a	8.1	126.5	430	150	45	90	-10	11.6	5
77a	12.5	125.4	430	150	45	90	-25	11.6	5
78a	15.7	122.9	430	150	45	90	-10	11.6	5
79a	20.1	122.8	430	150	45	90	10	11.6	5
80a	24.2	124.1	430	150	30	90	30	11.6	5
81a	26.9	127.6	430	150	30	90	45	11.6	5
82a	30.2	130.7	430	150	30	90	50	11.6	5
83a	33.1	143.2	430	150	20	90	60	11.6	5
84a	34.8	138.9	430	150	20	90	50	11.6	5
85a	37.9	142.2	430	150	20	90	30	11.6	5
86a	41.6	144.1	430	150	20	90	40	11.6	5
87a	10.4	141.6	430	150	45	90	45	11.6	5
88a	12.9	144.7	430	150	45	90	40	11.6	5
89a	16.2	146.8	430	150	45	90	10	11.6	5
90a	20.1	146.1	430	150	45	90	-15	11.6	5

Параметры каждого источника выбирались из соображений соответствия сейсмотектоническим особенностям конкретного цунамигенного региона, вытекающим из концепции поддвига океанической плиты под континентальную в районах активных континентальных окраин. При этом азимут простирания очага в большинстве случаев выбирался совпадающим с береговой (островной) линией, а угол падения площадки разрыва (угол DE) – совпадающим с главной литосферной границей раздела между надвигающейся континентальной и поддвигающейся океанической корой, меняясь в диапазоне от 10° до 45°. Направление подвижки по плоскости разрыва (угол LA) во всех случаях принимался равным 90°, что соответствует наиболее цунамиопасному варианту механизма очага. Система из 90 таких очагов (Рис. 1) покрывает практически все возможные цунамигенные области Тихого океана, возникновение цунами в которых может угрожать Дальневосточному побережью РФ.

Рассчитанные по алгоритму, изложенному в работе [Гусяков, 1978], остаточные смещения дна, создаваемые такими источниками, использовались в качестве начальных условий в задаче расчета распространения цунами на реальном рельефе дна Тихого океана. Контуры положительных и отрицательных начальных смещений от показанных на рисунке (Рис. 1) модельных очагов приведены на следующем рисунке (Рис. 2).

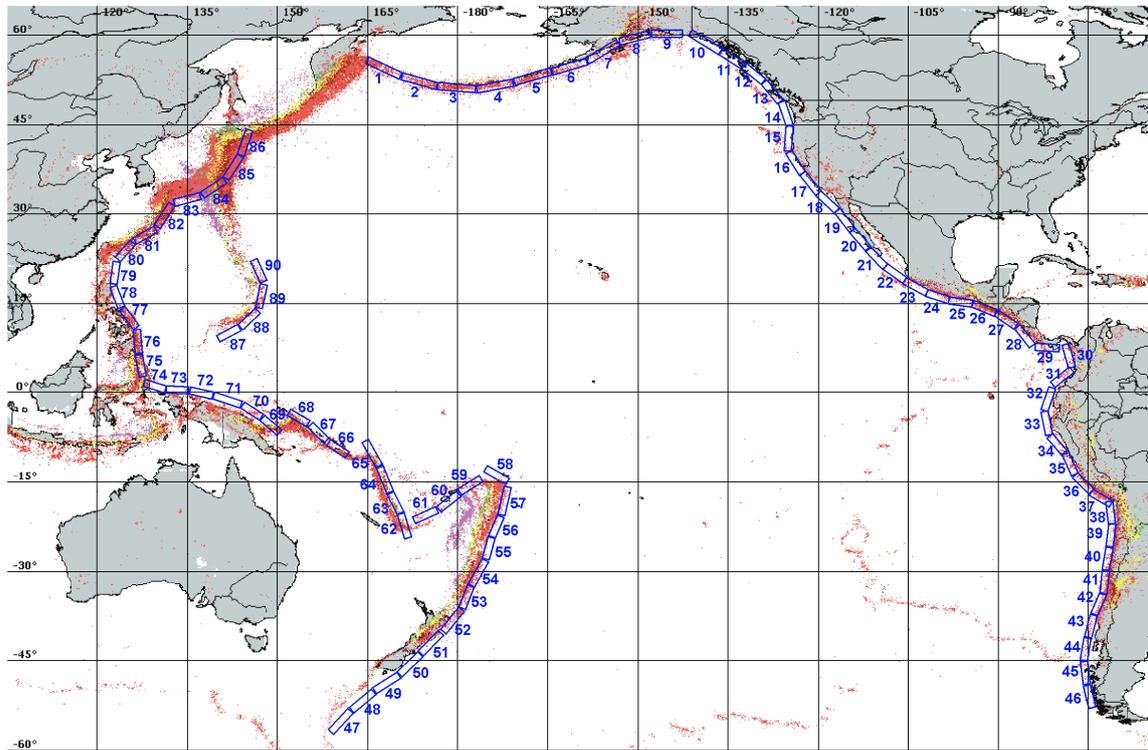


Рис. 1. Карта сейсмичности Тихого океана и расположение модельных очагов землетрясений с магнитудой  $M_w=9.0$ . Показаны проекции площадки разрыва в очагах этих землетрясений на поверхность Земли.

Моделирование трансформации удаленных относительно Дальневосточного побережья РФ цунами проводилось в акватории (Рис. 3), ограниченной с запада  $100^\circ$  В.Д., с востока  $60^\circ$  З.Д., с юга  $60^\circ$  Ю.Ш. и с севера  $65^\circ$  С.Ш. Соответствующий массив цифровой батиметрической информации был получен прореживанием одноминутной батиметрии «GEBCO-2009» на регулярную сетку с шагом 5 географических минут.

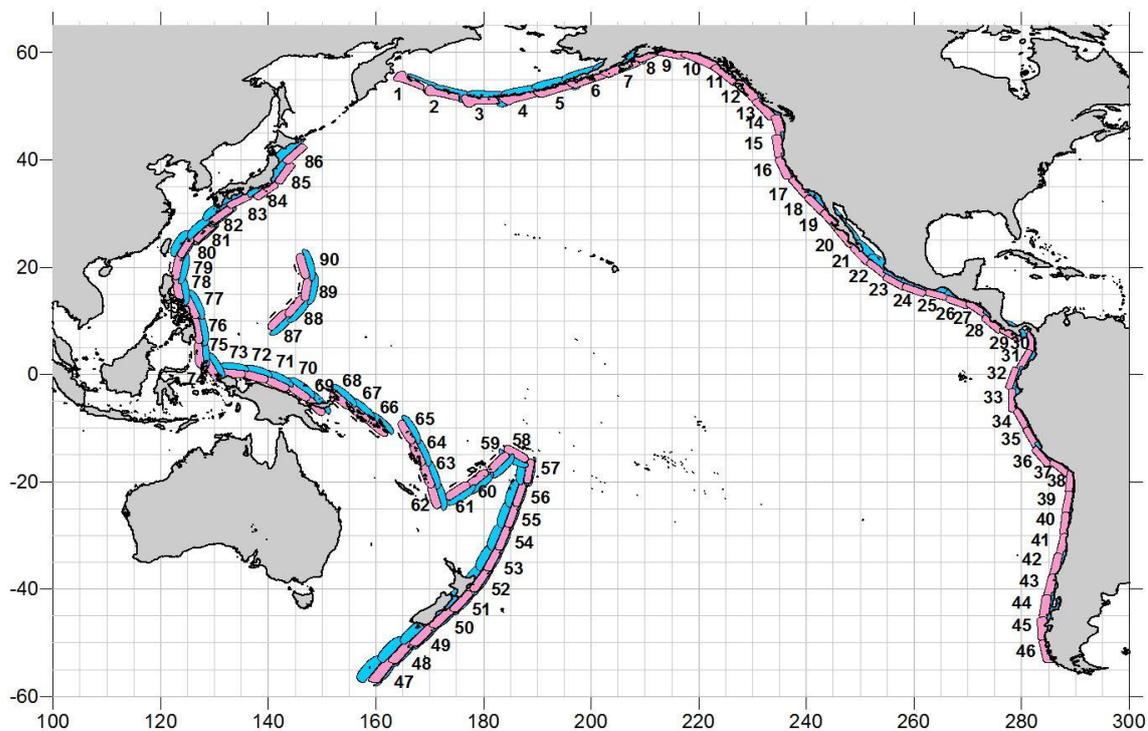


Рис. 2. Схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M_w = 9.0$ . Для удобства вычислений восточная граница расчетной области здесь указывается в  $300^\circ$  В.Д.

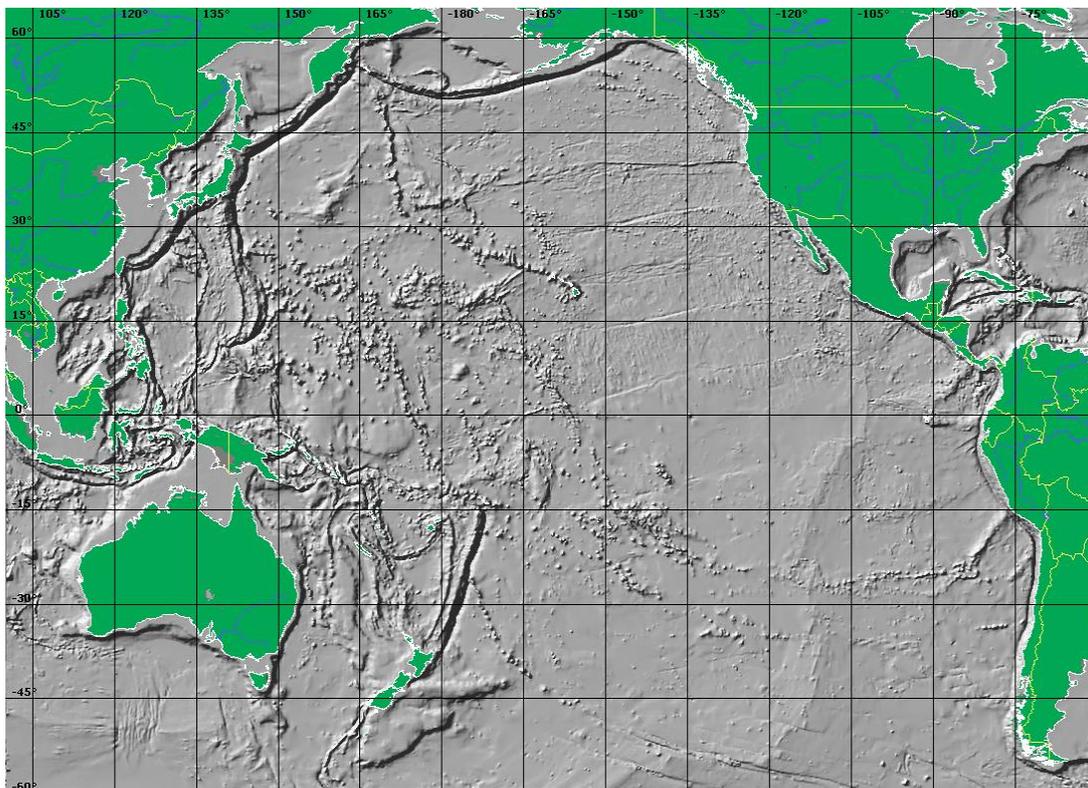


Рис. 3. Рельеф дна расчетной области, использованной для предварительных расчетов трансформации волн цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья РФ потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений.

## 5. Результаты предварительного моделирования удаленных цунами

На следующей серии рисунков представлены диаграммы свечения (распределения максимальных амплитуд цунами), порожденных четырьмя модельными очагами удаленных источников (Рис. 4) – источник «3а», входящий в Алеуто-Аляскинскую сейсмическую зону, источник «2ба», входящий в Центральноамериканскую сейсмическую зону (Рис. 5), источник «42а», входящий в Южноамериканскую (Чили) сейсмическую зону (Рис. 6), источник «71а», входящий в Новогвинейскую сейсмическую зону (Рис. 7).

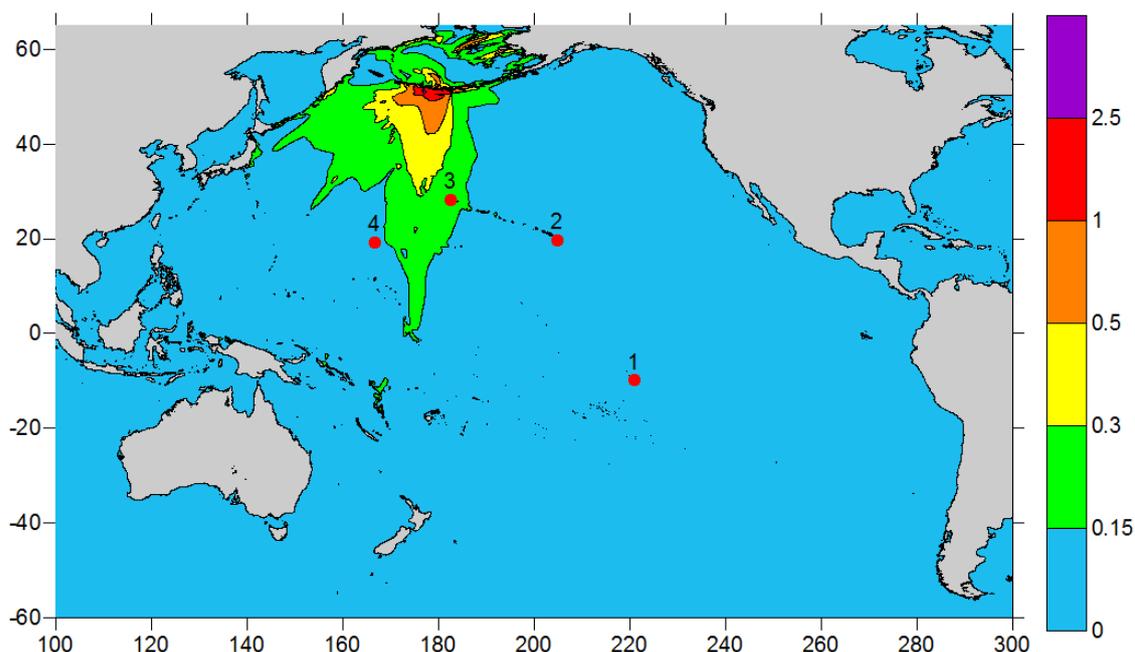


Рис. 4. Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «3а», входящим в Алеуто-Аляскинскую сейсмическую зону.

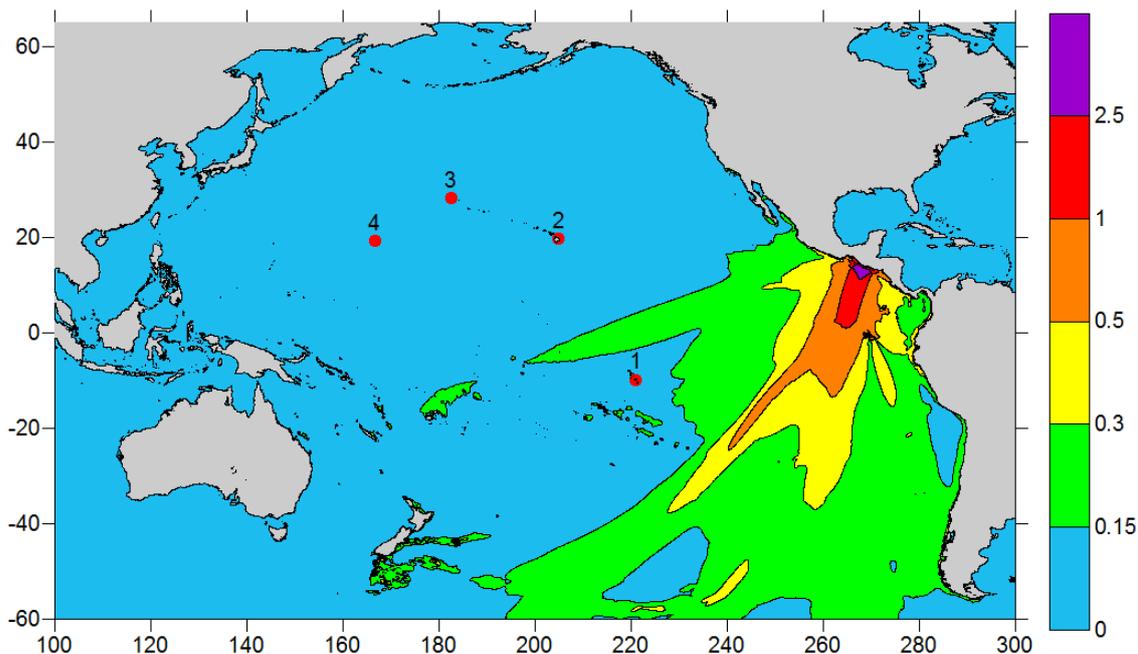


Рис. 5. То же для источника «26а», входящего в Центральноамериканскую сейсмическую зону.

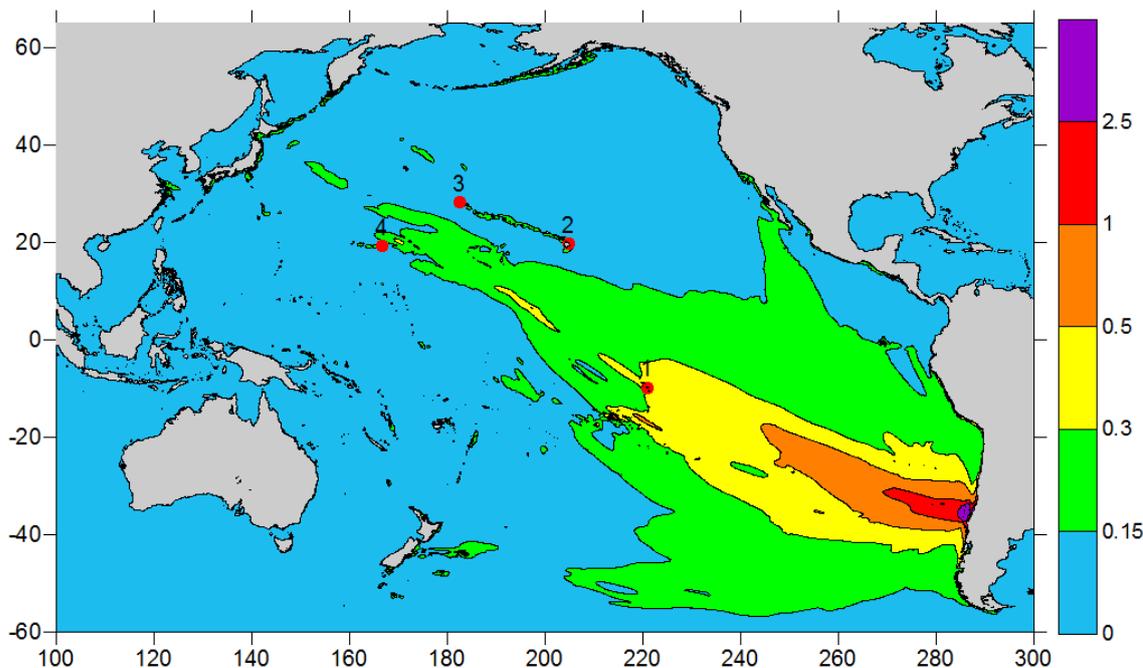


Рис. 6. То же для источника «42а», входящего в Южноамериканскую (Чили) сейсмическую зону.

Расчеты производились на 40 часов физического времени распространения на сетке с пространственным шагом 5 географических минут. Номера́ми отмечены мареографные пункты Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (Hiva (1), Hilo (2), Midway (3) и Wake (4), в которых производился вывод расчетных мареограмм (дополнительно к мареограммам вблизи защищаемых пунктов ДВ побережья РФ). Цветовая шкала справа показывает величину максимальных положительных смещений свободной поверхности океана в метрах.

Как показывают представленные на этих рисунках диаграммы направленности излучения цунами, наибольшую опасность для Дальневосточного побережья РФ, естественно, представляют волны цунами, порожденные одним из очагов Алеуто-Аляскинской зоны (Рис. 4), воздействию которого подвергается непосредственно примыкающее к очаговой зоне побережье о-ва Беринга, северная часть побережья Карагинского залива, Восточное побережье Камчатки и Северной части Курильского архипелага. Отмечаются также ощутимые волны и у Северного побережья Японии.

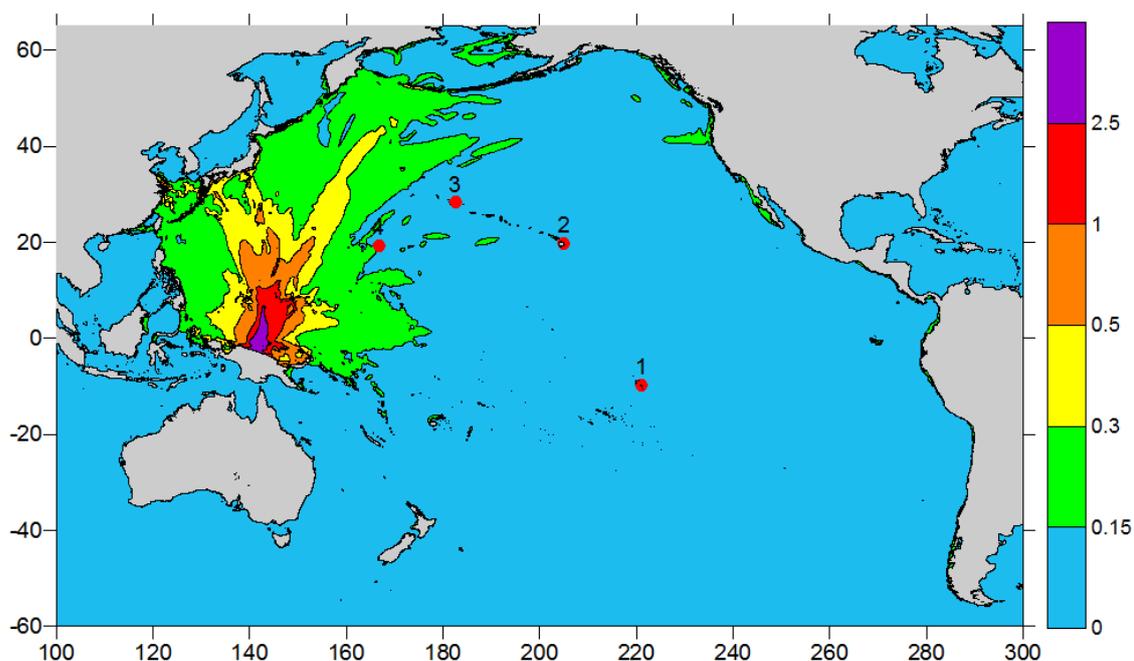


Рис. 7. То же для источника «71а», входящего в сейсмическую зону Новая Гвинея – Соломоновы острова.

Наименьшей степенью опасности характеризуется «Центральноамериканское цунами» (Рис. 5), направляющее свой энергетический поток к Юго-Западу.

Достаточно серьезную угрозу Дальневосточному побережью России могут представить «Южноамериканское – Чилийское» (Рис. 6) и «Новогвинейское» (Рис. 7) цунами. Достаточно подробное исследование гипотетических «Чилийских» цунами было выполнено исполнителями в 2008 – 2009 гг., и возможность трансконтинентального распространения соответствующих волн с заметным проявлением у берегов России подтверждается историческими сведениями и результатами упомянутого численного моделирования.

Значительный интерес вызвала четко выраженная направленность «Новогвинейского» (Рис. 7) цунами, распространяющего свою энергию к побережью Японии, Курильских островов, о-ва Сахалин. Обнаруженный эффект потребует дополнительного серьезного изучения особенностей распространения и трансформации волн цунами, порождаемых цунамигенными землетрясениями этой зоны и их проявления у защищаемого побережья.

Дополнительная информация о характере проявления упомянутых выше четырех модельных удаленных цунами может быть получена в ходе рассмотрения мареограмм, рассчитанных для четырех виртуальных мареографов, положение которых отмечено на картинах свечения (диаграммах направленности), представленных на предыдущей серии рисунков (Рис. 4 – Рис. 7). Эти мареографы были установлены в узлах пятиминутной сетки, наиболее близких к истинным точкам размещения датчиков Тихоокеанской службы предупреждения о цунами (PTWS). Невысокая разрешающая способность расчетной сетки, использовавшейся для предварительных расчетов, естественным образом привела к определенному несовпадению координат виртуальных и реальных мареографов (

Табл. 2).

Табл. 2. Перечень виртуальных мареографов, соответствующих датчикам, Тихоокеанской службы предупреждения о цунами (PTWS), использованных в ходе предварительного моделирования удаленных цунами.

Name	ID	Longitude exact	Latitude exact	Longitude - 5	Latitude - 5	$ \Delta $ Longitude - 5	$ \Delta $ Latitude - 5	Depth-5 (m)
<i>Hiva</i>	1	139.03° (W)	9.81° (S)	139° (W)	9.83333° (S)	-0.03	0.023333	155
<i>Hilo</i>	2	155.07° (W)	19.13° (N)	155.083° (W)	19.75° (N)	0.013333	-0.62	40
<i>Midway</i>	3	177.35° (W)	28.21° (N)	177.417° (W)	28.25° (N)	0.066667	-0.04	531
<i>Wake</i>	4	166.62° (E)	19.28° (N)	166.6666667° (E)	19.25° (N)	-0.046666667	0.03	1037

Мареограммы, рассчитанные для пункта «Нива» (Рис. 8), показывают, что ощутимые колебания с размахом, превышающим 2 м, порождают здесь исключительно сейсмические очаги, расположенные у побережья Южно Америки (42а), в то время как высоты волн, рассчитанные для трех других модельных очагов, оказываются пренебрежимо малыми.

Приведенная на следующем рисунке (Рис. 9) реальная мареограмма, зарегистрированная в том же пункте «Нива» от цунами, порожденного у берегов Чили 27.02.2010 землетрясением с магнитудой  $M_w = 8.8$ , позволяет выполнить качественное сопоставление результатов моделирования с реальным проявлением реальных событий. При этом следует отметить, что в ходе расчетов использовалась грубая пятиминутная сетка, а начальное возмущение рассчитывалось с помощью модельного сейсмического очага, всего лишь близкого по расположению и магнитуде происшедшему землетрясению. Реальная мареограмма не подвергалась каким-либо процедурам фильтрации. Тем не менее можно утверждать, что расчетная и реальная мареограммы в своей головной части весьма похожи как по форме, так и по амплитуде. В конце настоящего раздела будут приведены и другие результаты сравнения реальных и расчетных мареограмм.

Мареограммы, рассчитанные для пункта «Нило» (Рис. 10), значительно меньше по своим амплитудным характеристикам, здесь также преобладающим является «Южноамериканское» цунами, а волны, рассчитанные для трех других модельных событий, хоть и приходят в различное время, но имеют примерно одинаковые амплитуды. Первым в этот пункт приходит волны от «Алеутского» цунами, за ней с опозданием примерно в 5 часов – волны от «Центральноамериканского» и «Новогвинейского» цунами и опять с интервалом в 5 часов проявляется «Южноамериканское» цунами.

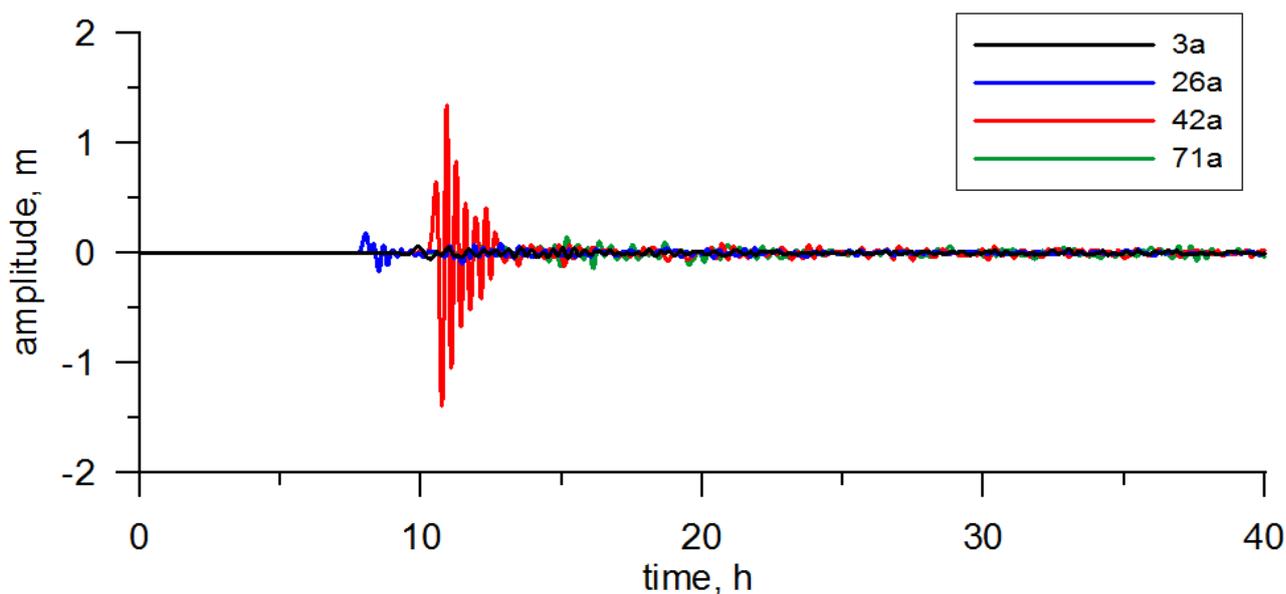


Рис. 8. Мареограммы, рассчитанные на пятиминутной расчетной сетке для мареографного пункта Нива(1) от различных очагов цунамигенных землетрясений (черный – «Алеутский – 3а», синий – «Центральноамериканский 26а», красный – «Южноамериканский (Чилийский) – 42а», зеленый – «Новозеландский – 71а»). Глубина под виртуальным мареографом – 155 м.

В пункте «Midway» (Рис. 11) близкие по величине, но относительно небольшие амплитуды оказываются у «Алеутского» (приходит первым) и «Южноамериканского» (приходит последним, через почти 10 часов после «Алеутского») цунами. Вторым по величине и по порядку прихода здесь является «Новогвинейское» цунами, а «Центральноамериканское» проявляется очень слабо.

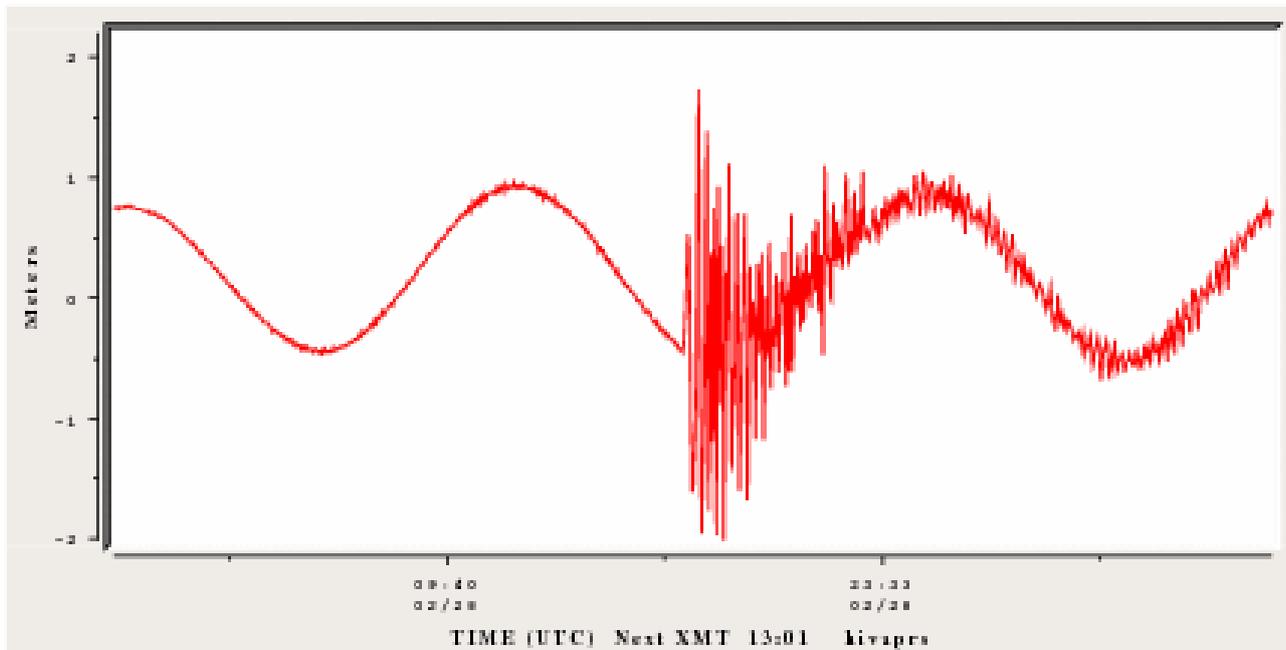


Рис. 9. Для сравнения – реальная мареограмма в пункте Niva (1) от Чилийского землетрясения 27.02.2010 с  $M_w = 8.8$ .

Наконец, представленные на заключительном в этой серии рисунке (Рис. 12) мареограммы, рассчитанные для пункта «Wake», показывают, что волны, пришедшие от «Алеутского» и «Новогвинейского» цунами, имеют противоположные фазы вступления головной волны, приходят почти одновременно, практически не различаются по амплитуде и весьма близки по этой характеристике «Южноамериканскому» цунами, отставшему почти на 15 часов. «Центральноамериканское» цунами опережает «Южноамериканское» почти на семь часов, а его амплитуда примерно в три раза меньше.

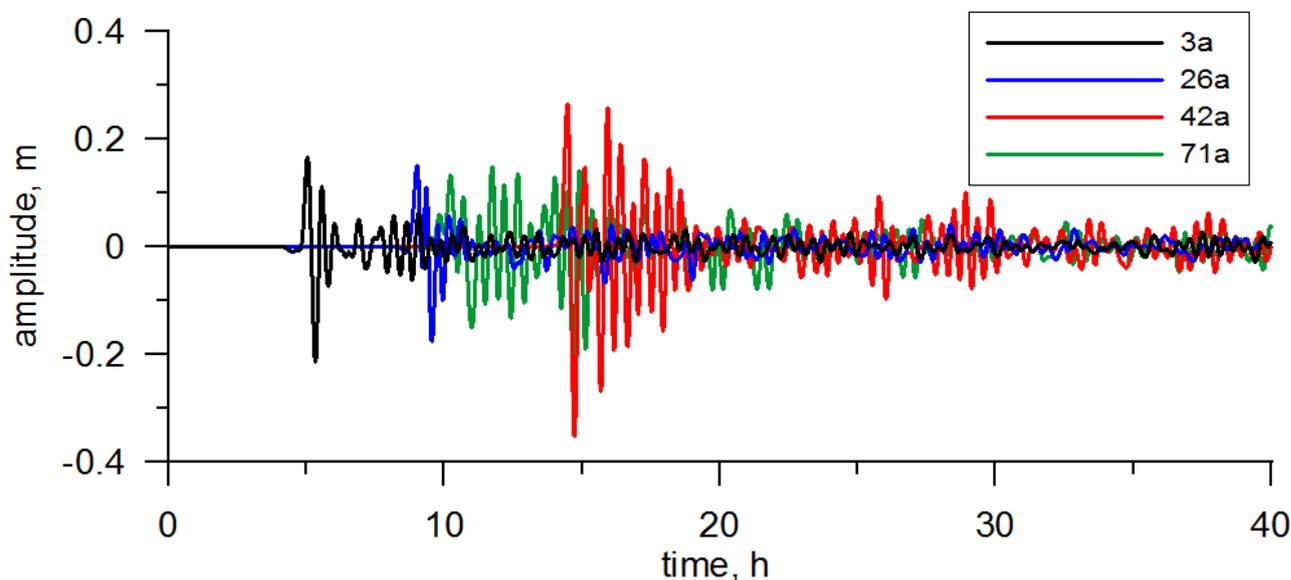


Рис. 10. То же, что и на Рис. 8 для мареографного пункта Nilo (2). Глубина под виртуальным мареографом – 40 м.

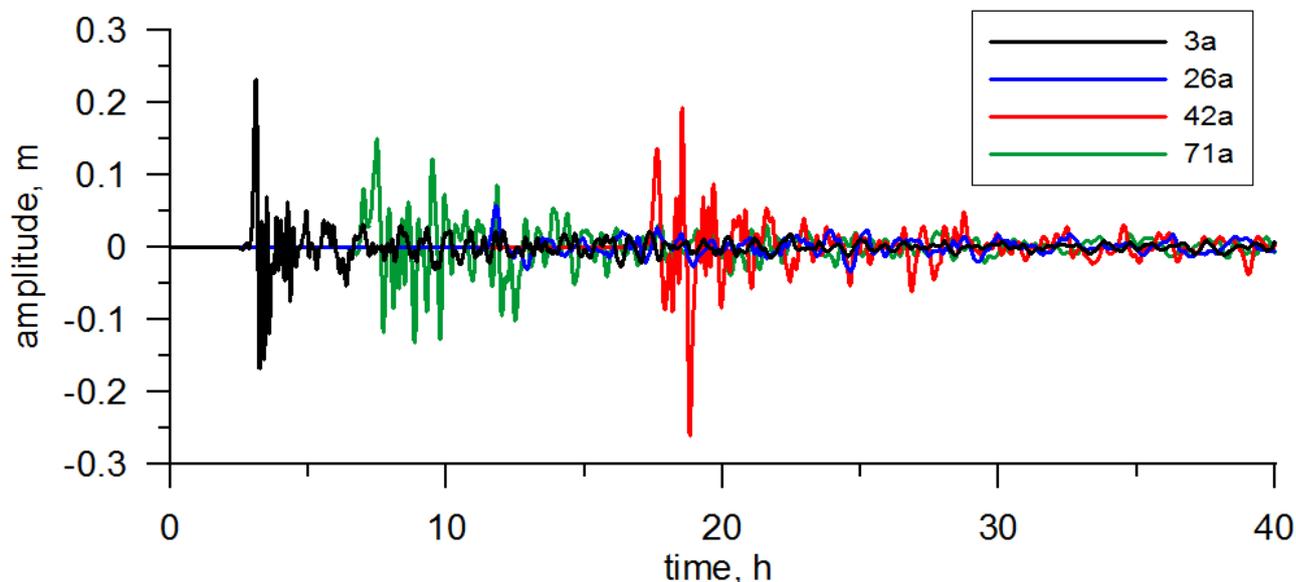


Рис. 11. То же для мареографного пункта Midway (3). Глубина под виртуальным мареографом – 531 м.

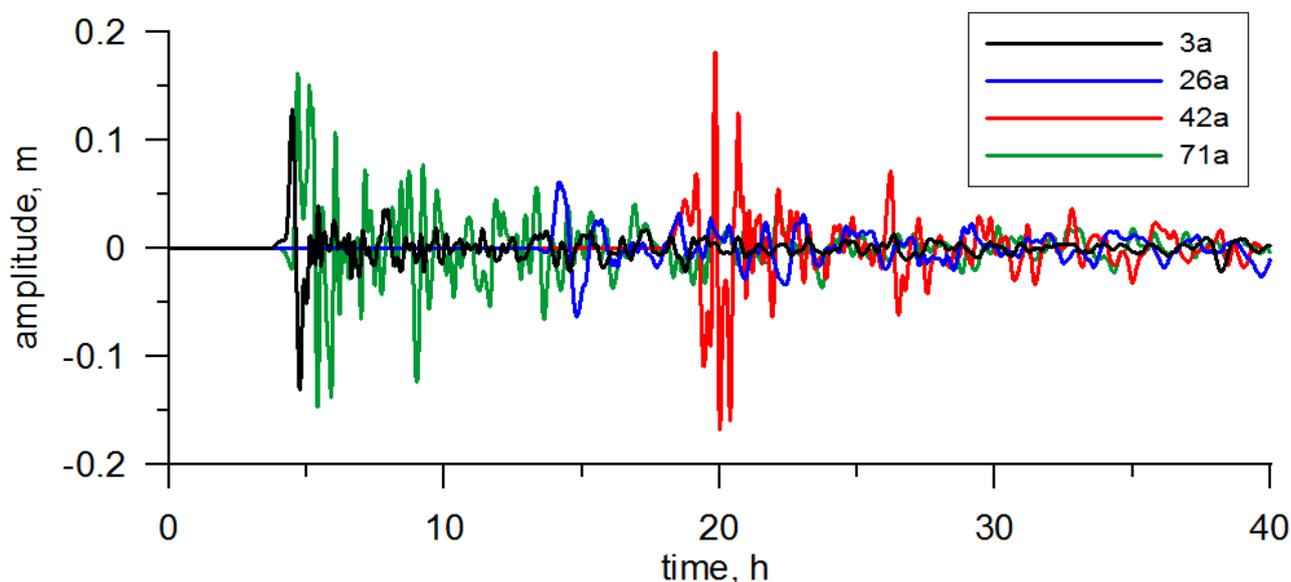


Рис. 12. То же для мареографного пункта Wake (4). Глубина под виртуальным мареографом – 1037 м.

Упомянутую выше возможность более детального сравнения рассчитанных и реальных мареограмм представляют следующие два рисунка, на которых изображены расчетные (черные кривые) и отфильтрованные реальные мареограммы (красные кривые) для пунктов «Midway» (Рис. 13) и «Wake» (Рис. 14). Расчетные мареограммы были получены в ходе моделирования цунами, порожденного модельным «Южноамериканским (42a)» очагом, а реальные были записаны при регистрации чилийского (27. 02. 2010 г.) цунами, порожденного сейсмическим очагом с магнитудой  $M_w = 8.8$ . На каждом из рисунков эти мареограммы совмещены по времени первого вступления, а реальные мареограммы (любезно предоставленные А.Б.Рабиновичем) претерпели двойную фильтрацию – сначала из них была удалена приливная долгопериодная составляющая, а затем они были подвергнуты высокочастотной фильтрации четырехчасовым фильтром с окном Кайзера-Бесселя.

Результаты этого сравнения представляются более чем удовлетворительными как по амплитудным характеристикам, так и по форме зарегистрированных колебаний и их частотным параметрам. Здесь также следует учесть недостаточную детальность расчетной сетки (пять географических минут) и несовпадение мест размещения виртуальных и реальных мареографов, характеризующееся значениями глубин в соответствующих узлах сетки (Рис. 15), а также весьма приблизительную близость модельного очага «42a» и очага чилийского землетрясения, задача моделирования которого в этих расчетах и не ставилась.

Общее представление о характере проявления четырех рассмотренных здесь удаленных модельных цунами у Дальневосточного побережья РФ может быть получено из анализа гистограмм распределений максимальных и минимальных высот волн цунами вдоль побережья (с шагом 20-30 км), рассчитанных на пятиминутной расчетной сетке. На этих гистограммах черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам, а стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский». Все 248 виртуальных мареографов пронумерованы с Юга на Север и с Запада на Восток. В Табл. 3 номера мареографов, соответствующих защищаемым пунктам, указаны справа от их названия, приведенного в латинской транскрипции.

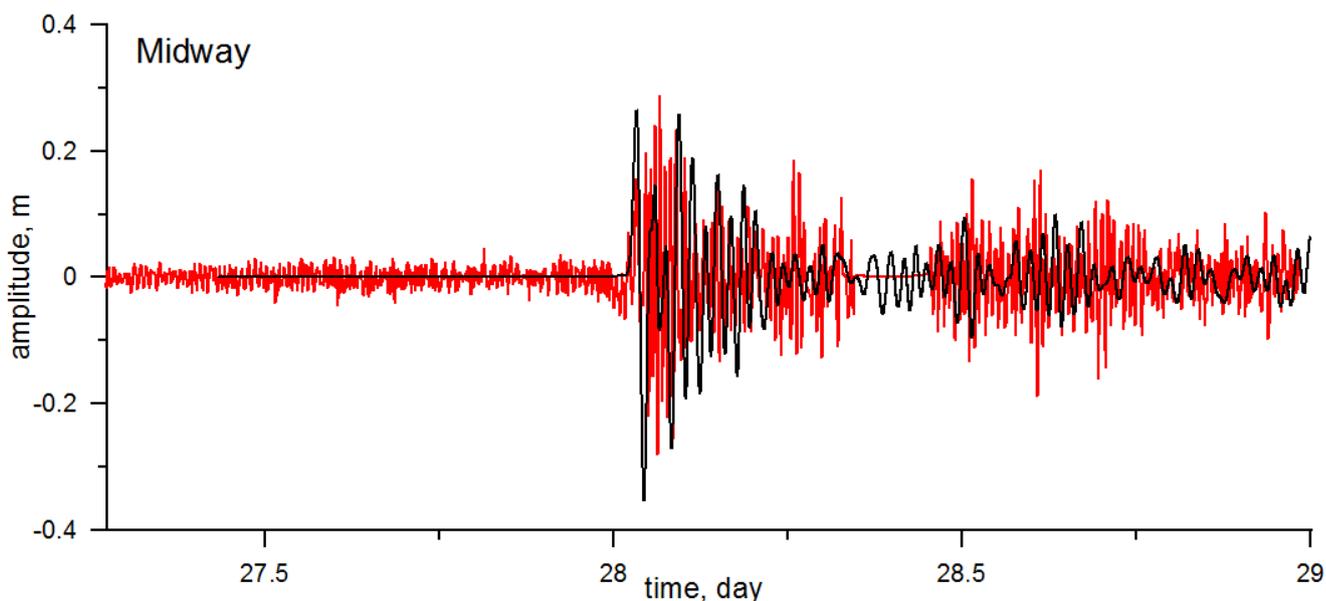


Рис. 13. Сравнение расчетной (черная кривая, модельный очаг «42а») и реальной (красная, чилийское 2010 г. цунами, порожденное сейсмическим очагом с магнитудой  $M_w = 8.8$ ) мареограмм для мареографного пункта Midway (3). Глубина под виртуальным мареографом – 531 м.

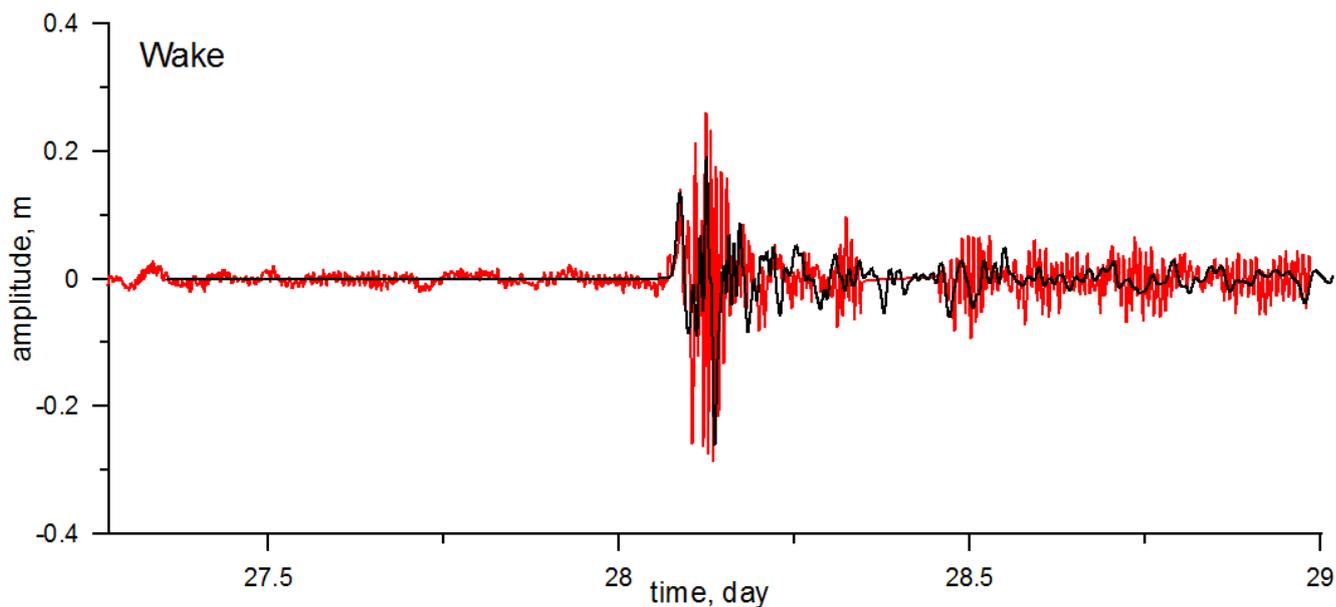


Рис. 14. То же для мареографного пункта Wake(4). Глубина под виртуальным мареографом – 1037 м.

Табл. 3. Нумерация виртуальных расчетных мареографов, соответствующих «защищаемым» пунктам Дальневосточного побережья РФ на пятиминутной расчетной сетке. Номера слева соответствуют гистограммам на рисунках (Рис. 16 – Рис. 18), а номера справа (красный цвет) – распределению глубин, изображенному на Рис. 15.

2	М. Kril'on	40	89	Kuril'sk	26	184	Ivashka	12
7	Korsakov	39	93	Urup	25	188	Karaga	11
10	Novikovo	38	96	Simushir	24	189	Kostroma	10
22	Starodubskoe	37	111	Severo-Kuril'sk	23	190	Ossora	9
24	Vzmor'e	36	113	Shumshu	22	194	Tymlat	8
27	Makarov	35	115	Lopatka	21	200	Il'pyrskoe	7
32	Poronaisk	34	121	Vodopadnaya	20	209	Vyvenka	6
40	М. Terpeniya	33	128	Petropavlovsk-Kamchatskii	19	212	Korf	5
49	Pogranichnoe	32	129	Petropavlovskii mayak	18	213	Tilichiki	4
52	Komrvo	31	140	Semyachiki	17	235	Pahachi	3
63	Odoptu	30	146	Kronoki	16	238	Apuka	2
71	Yuzhno-Kuril'sk	29	159	Ust'-Kamchatsk	15	245	Nicol'skoe	1
77	Malokuril'skoe	28	163	Afrika	14			
81	Burevestnik	27	173	Ozernaya	13			

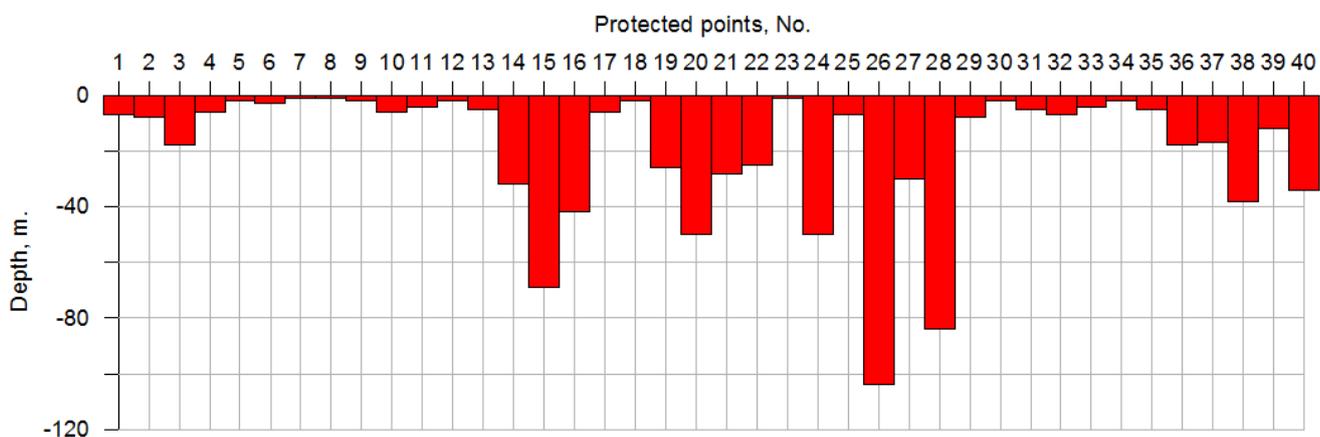


Рис. 15. Распределение глубин под виртуальными расчетными мареографами, соответствующими «защищаемым» пунктам Дальневосточного побережья РФ на глобальной пятиминутной расчетной сетке

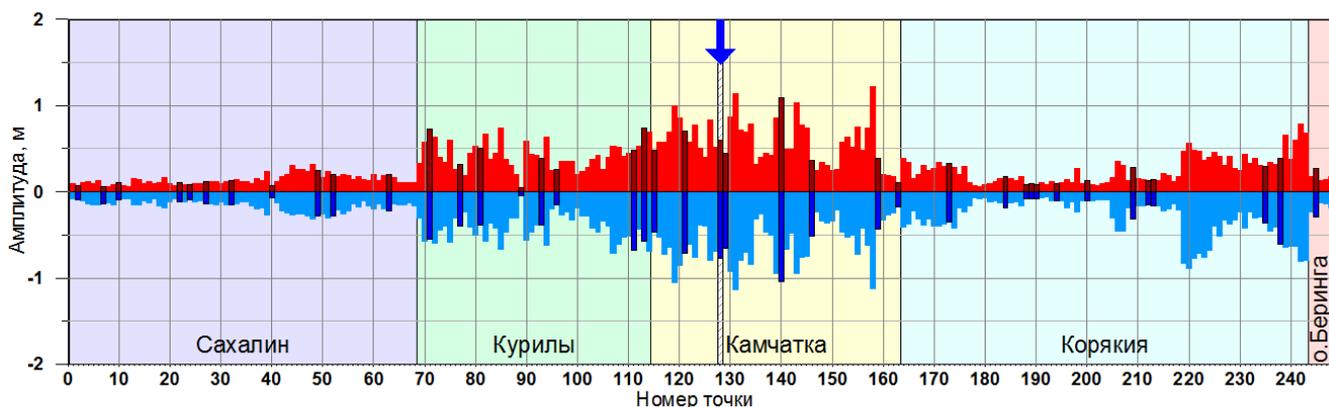


Рис. 16. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 20-30 км), рассчитанных для «Алеутского (За)» очага цунамигенного землетрясения на пятиминутной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам, стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

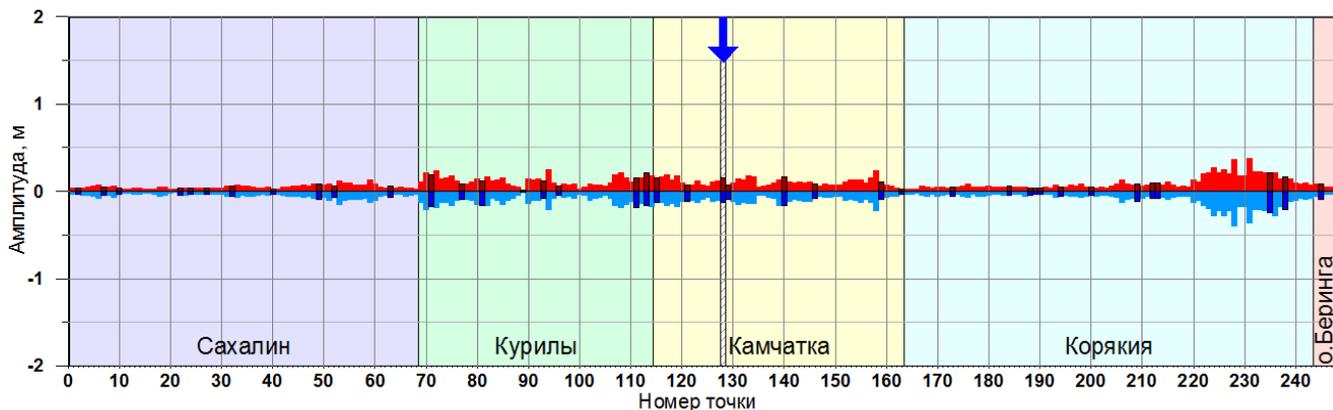


Рис. 17. То же для «Центральноамериканского (26а)» очага цунамигенного землетрясения.

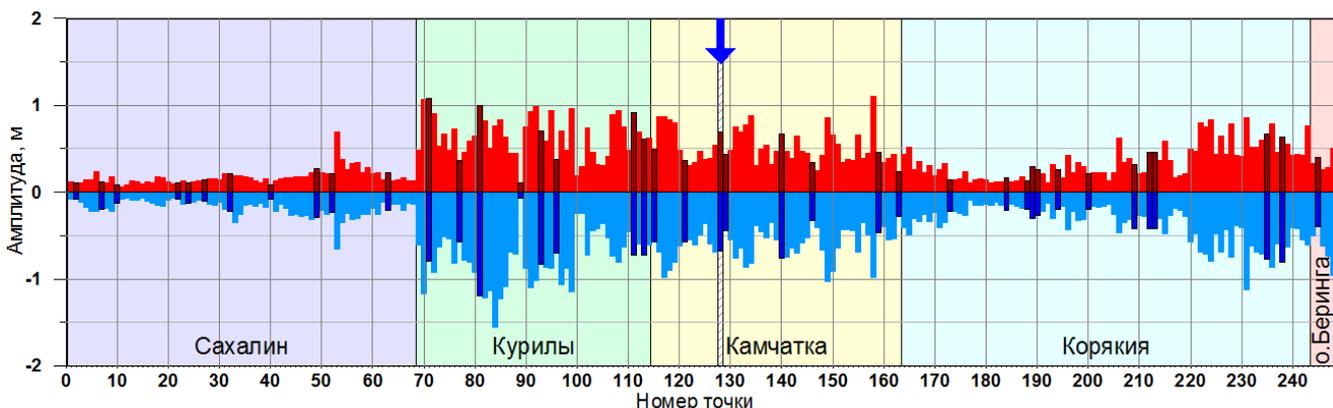


Рис. 18. То же для «Новогвинейского (71а)» очага цунамигенного землетрясения.



Рис. 19. То же для «Южноамериканского (42а)» очага цунамигенного землетрясения.

Анализ гистограмм показывает, что наиболее опасными для защищаемого побережья являются проявления «Новогвинейского» цунами (Рис. 18), при котором вдоль побережья Курильского архипелага, практически для всей Камчатки, а также для северной части побережья Карагинского залива размах колебания превышает 2 метра. Несколько меньшие амплитуды с преобладанием в тех же зонах порождаются значительно более географически близким «Алеутским» цунами (Рис. 16), наиболее ощутимо проявляющимся у берегов Камчатки. Волны от «Южноамериканского (Чилийского)» цунами (Рис. 19) достигают максимальных, но не превышающих по абсолютной величине 1 м, значений у побережья Курильских островов, постепенно уменьшаясь по мере продвижения к Югу и Северу. Наконец, практически неощущаемые значения смещения уровня океана у Дальневосточных берегов России демонстрируются «Центральноамериканским» цунами (Рис. 17). Здесь максимальные по модулю значения смещений уровня приближаются к значениям 0.5 м лишь на Северном побережье Карагинского залива.

Для получения более содержательных выводов о степени опасности для защищаемого побережья удаленных цунами, порождаемых в различных сейсмических зонах Тихого океана, наряду с амплитудными характеристиками необходимо рассматривать и временные, позво-

ляющие выяснить времена прихода экстремальных значений, близость по времени прихода относительных максимумов и минимумов смещений уровня океана.

На следующих рисунках (Рис. 20 – Рис. 23) представлены гистограммы распределения высот цунами и некоторые кинематические (временные) характеристики **исключительно** в защищаемых пунктах Дальневосточного побережья РФ для четырех рассмотренных удаленных источников (очаг землетрясения с магнитудой  $M_W = 9.0$ ). По горизонтальной оси на этих рисунках отложены номера защищаемых пунктов (Табл. 3, номер справа от названия). Вдоль **левой** вертикальной оси отложены – высоты волн в метрах (им соответствуют столбики), вдоль **правой** – время в секундах прихода:

- максимальной положительной фазы (розовые линии и маркеры),
- максимальной отрицательной фазы (голубые линии и маркеры),
- первой положительной волны (красные линии и маркеры),
- расчетное время прибытия цунами ETA (Expected Tsunami Arrival), полученное в рамках кинематических расчетов (желтая линия).

Прежде всего здесь следует отметить хорошее (можно даже сказать очень хорошее) совпадение времен ETA (Expected Tsunami Arrival) ожидаемого прихода цунами, рассчитанных по кинематической и динамической задаче (в последней временем ETA считается момент прихода максимума в первой (головной) волне). Обе задачи совершенно различны по своим алгоритмам и решаются на разных сетках, тем не менее результаты практически совпадают. Это означает, что быстрым алгоритмам расчета карт ТТТ (Tsunami Travel Time), реализованным в оболочке WinITDB, а также алгоритмам моделирования динамики волн цунами в используемом для расчетов комплексе MassGlobalCalcul можно доверять.

Вторым важным обнаруженным эффектом является то, что в некоторых случаях максимальные колебания уровня моря наступают много позже (на десятки часов!) прихода не только головной волны, но и энергетического максимума, ожидаемого с учетом дисперсии внутри волнового пакета.

Обнаруженные на обсуждаемых гистограммах максимальных высот в защищаемых пунктах ДВ побережья особенности совпадают с известным представлением о том, что в случае трансокеанских цунами имеют место достаточно различные по своей физике процессы. Первый – это процесс динамического распространения начального энергетического пакета, излученного очагом. Второй – процесс раскочки всего Тихого океана, как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при достаточно сильном вбросе энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. Третий связан с распространением систем краевых волн, порождаемых волнами цунами, вдоль побережья.

В случае «Центральноамериканского» очага (Рис. 20), который «светит» только на Юго-Восточную часть Тихого океана, максимальные колебания практически во всех пунктах Дальневосточного региона РФ обеспечиваются только такой раскочкой и наступают много позже ETA (на 24 – 48 часов). При этом моменты наступления максимальных приливных и отливных колебаний не совпадают по времени и могут отстоять друг от друга на десятки часов.

Очаги в районе Алеут и Новой Гвинеи (Рис. 21, Рис. 22) представляют некоторую промежуточную ситуацию. При таком положении и ориентации очагов часть защищаемого побережья оказывается в зоне влияния боковых лепестков диаграммы свечения источников, соответственно, в таких пунктах максимальный размах колебаний наступает вскоре после ETA, в остальных же обеспечивается последующей раскочкой бассейнов окраинных морей.

В случае «Южноамериканского» очага (Рис. 23), расположенного вблизи южного побережья Чили, который «светит» на Японию, Курильские острова и Камчатку, максимальные волны приходят именно туда и момент их наступления примерно соответствует расчетным временам ETA плюс 2 – 3 часа. При этом максимальные колебания на побережье Сахалина и Корякии наступают почти на сутки позже прибытия туда головной волны, что говорит о том, что в дело вовлекается резонансные процессы окраинных морей (Охотского и Берингова).

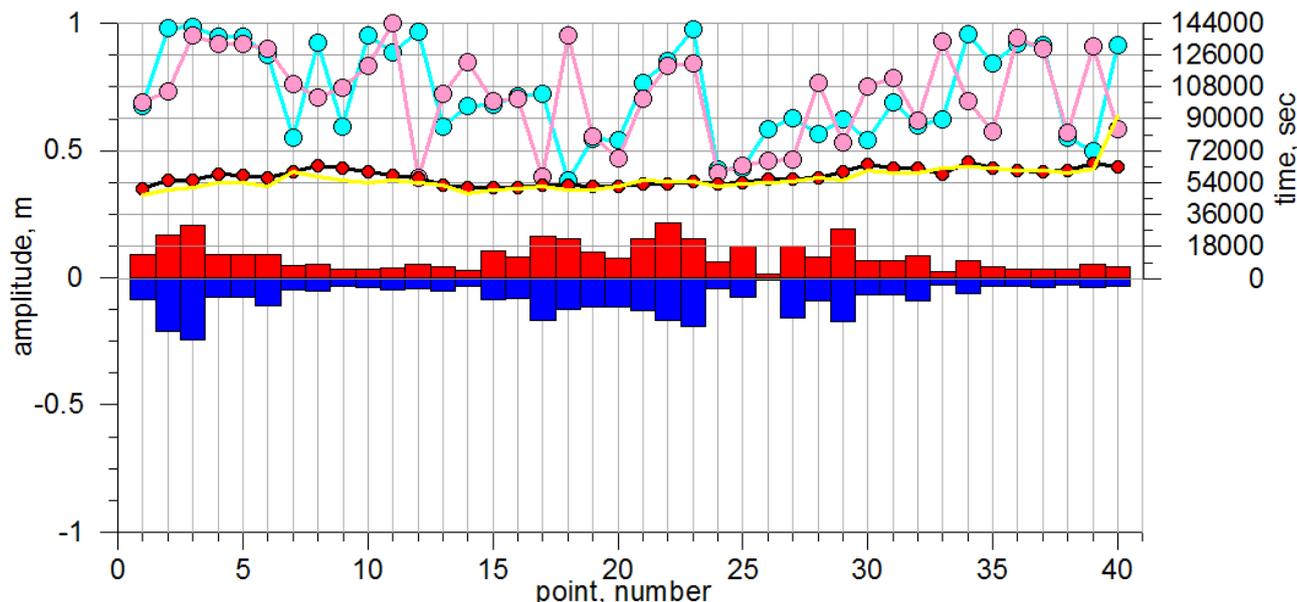


Рис. 20. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемых пунктов Дальневосточного побережья РФ (пронумерованных согласно столбцам 2, 4, 6 Табл. 3), рассчитанных для «Центральноамериканского – 26а» очага цунамигенного землетрясения на пятиминутной расчетной сетке. Голубыми линиями и маркерами отмечены времена прихода экстремального отрицательного значения в соответствующий защищаемый пункт, розовыми – экстремального положительного, черной линией с красными маркерами отмечено время прихода первого локального положительного экстремума, желтой линией – «ожидаемое время подхода волны цунами», рассчитанное с помощью алгоритмов информационно-вычислительной системы WinITDB.

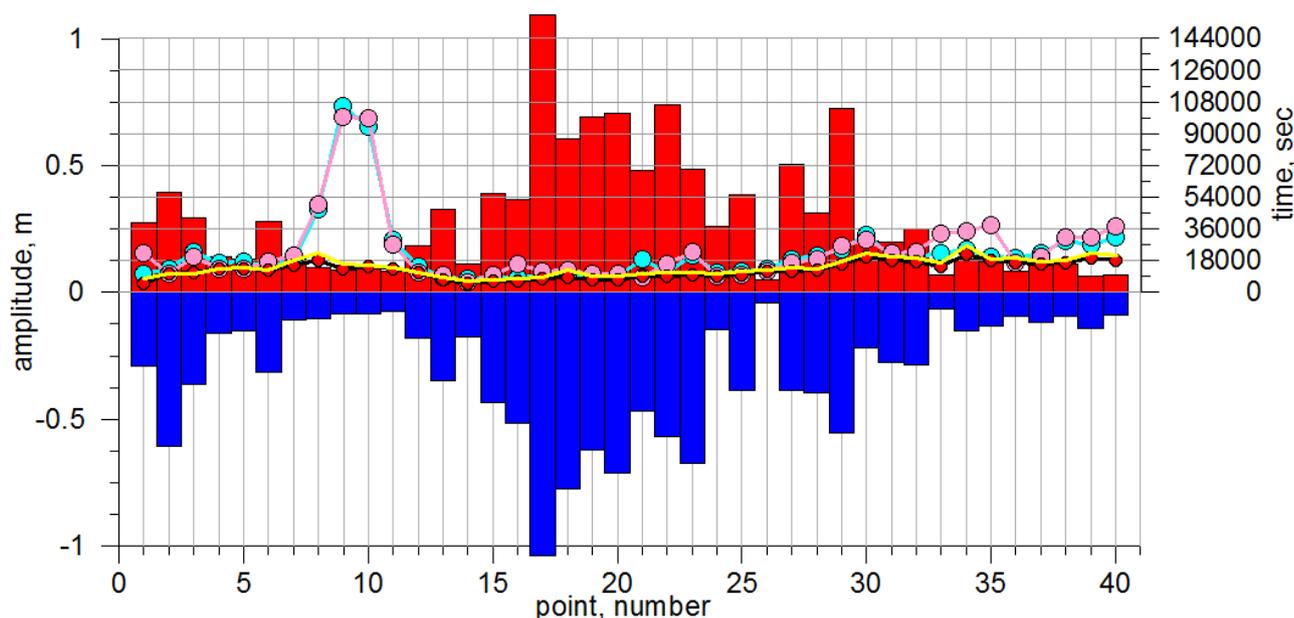


Рис. 21. То же для «Алеутского – 3а» очага цунамигенного землетрясения.

Указанные обстоятельства сильно осложняют регламентацию рационального выбора времен объявления и, в особенности, отмены тревоги цунами по удаленным событиям, а также влияет на выбор пороговых магнитуд. Здесь можно надеяться на то, что полный анализ (по завершению планируемого на 2011 – 2012 гг. всей серии расчетов) покажет, что максимально возможные в Дальневосточном регионе РФ высоты волн от большинства удаленных очагов наступают все же в районе ожидаемого прихода энергетического максимума. Если это окажется не так, то для удаленных очагов реальный прогноз следует строить не на пороговых магнитудах, а на предвычислениях ожидаемых высот цунами на основе поступающих данных от тихоокеанской мареографной сети (в первую очередь, от островных станций типа Wake, Midway, Guam, Johnston и др).

Возможность практического использования системы буев DART сможет быть реализована только, если они будут установлены непосредственно перед Курило-Камчатским побережьем.

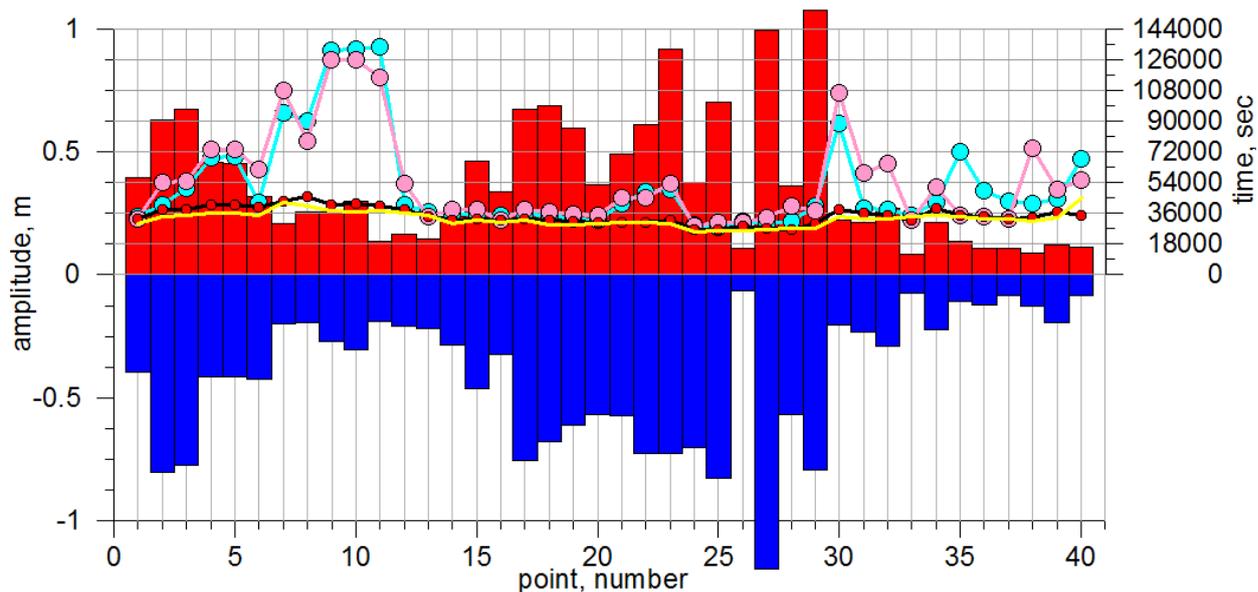


Рис. 22. То же для «Новогвинейского – 71а» очага цунамигенного землетрясения.

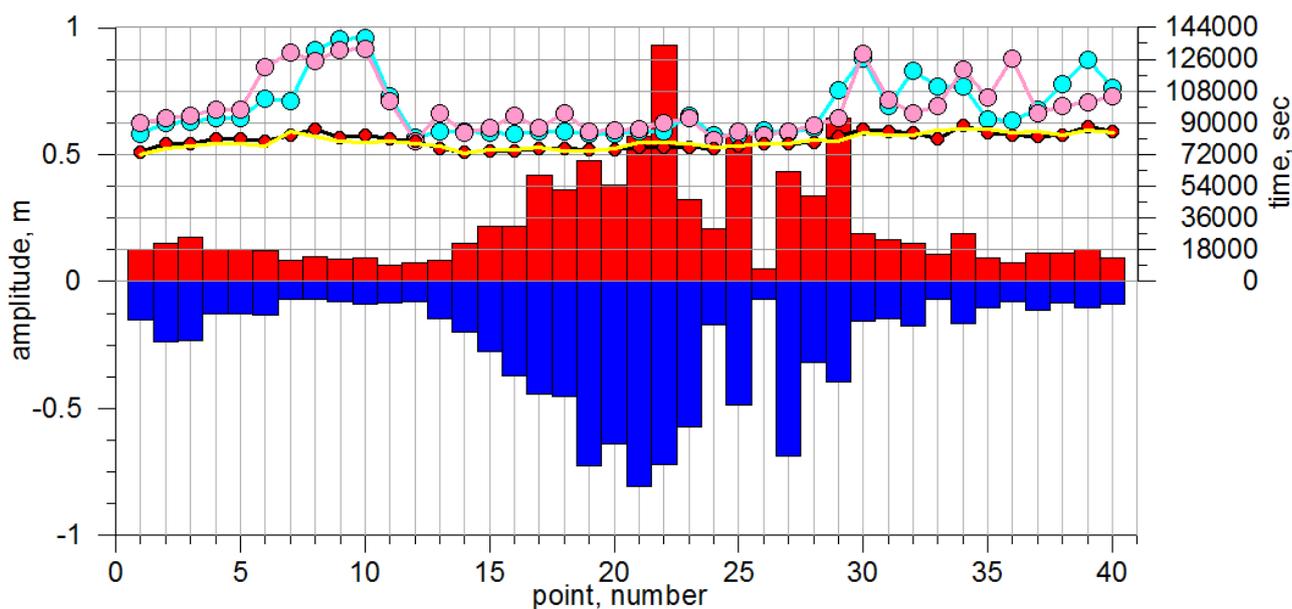


Рис. 23. То же для «Южноамериканского (Чили)– 42а» очага цунамигенного землетрясения.

При землетрясении в ближней (по отношению к защищаемому побережью России) зоне принципиальная схема протекающих в океане процессов остается той же, но диапазон возможных времен наступления максимальных колебаний существенно сокращается (до 1 – 10 часов). Хотя в случаях землетрясения внутри окраинного моря (например, Японского) его раскочка может продолжаться сутки и более. Такие случаи имели место в прошлом – например, при землетрясении 21.06.1983 с  $M_W = 7.1$  вблизи западного берега о.Хоккайдо, когда максимальные колебания уровня в районе г.Владивостока наблюдались спустя сутки после главного толчка.

## **ЦУНАМИ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ**

Предусмотренные Техническим заданием на 2010 г. работы в направлении исследования цунами ближней по отношению к Дальневосточному побережью РФ зоны первоначально предусматривали определение характеристик этих волн, порожденных набором потенциально опасных цунамигенных землетрясений с магнитудами  $M_w = 7.8$ ,  $M_w = 8.1$ ,  $M_w = 8.4$ ,  $M_w = 9.0$ . Этот набор был разработан в ходе работ по плану контракта 2007 г., параметры этих очагов были детально изложены в соответствующих отчетах. Заданием на 2010 г. предусматривалось моделирование соответствующих волн цунами на детальной пятнадцатисекундной сетке, в то время как в 2007 г. расчеты проводились на относительно грубой одноминутной сетке. Предусматривалось также выполнить расчет порождаемых этими цунами диаграмм направленности (картин свечения) с передачей Заказчику соответствующих цифровых массивов (в 2007 г. были переданы только визуальные образы упомянутых картин свечения только для Карагинского залива).

На первом этапе работ 2010 г. требуемые расчеты были выполнены и переданы в виде баз данных, сопровождаемых содержательным отчетом. Эти расчеты проводились с использованием методологии «малых подобластей», которая предусматривает разделение глобальной расчетной области на часть пересекающихся подобластей выбранных так, чтобы каждая из них содержала некоторый набор очагов модельных цунами и защищаемых пунктов, в которых заметно проявляются порождаемые этими очагами волны цунами. При этом, естественно такие подобласти частично пересекаются. Применение указанной методологии позволяет существенно снизить требования к необходимым вычислительным ресурсам и повысить эффективность и экономичность работ.

Продолжение работ по ближним цунами на заключительном этапе 2010 г. изначально было направлено на получение методических результатов, ориентированных на оценку точности характеристик, определенных в малых подобластях путем сопоставления с соответствующими результатами, рассчитанным в глобальной области на сетке с той же разрешающей способностью (15 географических секунд).

Однако уже на этапе постановки задач стало ясно, что, скорее всего, полученные результаты будут иметь самостоятельное достаточно серьезное значение. Оказалось, что моделирование в глобальной области с использованием детальной сетки, во-первых, позволит улучшить соответствие между виртуальными мареографами и защищаемыми пунктами и, во-вторых, облегчит интерпретацию результатов за счет обеспечения возможности единого анализа проявления волн цунами вдоль всего защищаемого побережья без его искусственного разделения на фрагменты, соответствующие малым подобластям.

Более того, естественным образом формулируется рекомендация проведения близких по характеру работ для защищаемых пунктов Приморья и Западного побережья о.Сахалин с использованием соответствующего набора потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений, предложенного в ходе работ по плану 2008 г.

Предусмотренные планом работ вычислительные эксперименты выполнялись на высокопроизводительном вычислительном кластере Новосибирского государственного университета и потребовали около 25 суток машинного времени в многопроцессорном режиме. Соответствующее время, потребовавшееся для расчета на одном процессоре, составило бы более 642 суток (почти 2 года).

### **6. Уточненная база данных модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны**

Углубленный анализ набора очагов, предложенных исполнителями в 2007 г., привел к необходимости частичной модификации соответствующего набора параметров, перечисленных в Табл. 4. Эта модификация коснулась уточнения пространственной ориентации очагов (угол ТЕ). В таблице для сравнения указаны новые (столбец «ТЕ») и старые (столбец «oldТЕ») значения.

Табл. 4. Таблица уточненных параметров модельных очагов цунамигенных землетрясений ближней зоны.

ID	$M_w$	Latitude (N)	Longitude (E)	L (km)	W (km)	DE (grad)	LA (grad)	TE (grad)	oldTE (grad)	D0 (m)	H_top (km)
78-1a	7.8	46.75	153.35	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-1b	7.8	46.93	152.85	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-1c	7.8	47.1	152.35	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-1d	7.8	47.3	152	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-2a	7.8	47.55	154.38	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-2b	7.8	47.7	153.95	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-2c	7.8	47.9	153.55	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-2d	7.8	48.1	153.1	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-3a	7.8	48.35	155.45	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-3b	7.8	48.55	155.05	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-3c	7.8	48.73	154.63	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-3d	7.8	48.9	154.2	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-4a	7.8	49.15	156.58	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-4b	7.8	49.35	156.18	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-4c	7.8	49.55	155.75	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-4d	7.8	49.7	155.3	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-5a	7.8	49.93	157.7	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-5b	7.8	50.1	157.28	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-5c	7.8	50.3	156.85	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-5d	7.8	50.45	156.4	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-6a	7.8	50.75	158.7	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-6b	7.8	50.9	158.25	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-6c	7.8	51.1	157.9	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-6d	7.8	51.3	157.55	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-7a	7.8	51.55	159.7	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-7b	7.8	51.7	159.25	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-7c	7.8	51.9	158.9	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-7d	7.8	52.1	158.5	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-8a	7.8	52.4	160.85	108	38	15	90	35	<del>58</del>	3.42	5
78-8b	7.8	52.55	160.4	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	15
78-8c	7.8	52.75	160	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	25
78-8d	7.8	52.95	159.55	108	38	15	90	35	<del>58</del>	2.74	35
78-9a	7.8	53.25	161.7	108	38	15	90	33	<del>50</del>	3.42	5
78-9b	7.8	53.4	161.25	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	15
78-9c	7.8	53.55	160.8	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	25
78-9d	7.8	53.75	160.4	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	35
78-10a	7.8	54.05	162.45	108	38	15	90	33	<del>50</del>	3.42	5
78-10b	7.8	54.25	162	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	15
78-10c	7.8	54.4	161.55	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	25
78-10d	7.8	54.6	161.2	108	38	15	90	33	<del>50</del>	2.74	35
78-11a	7.8	54.88	163.3	108	38	15	90	30	<del>50</del>	3.42	5
78-11b	7.8	55	162.85	108	38	15	90	30	<del>50</del>	2.74	15
78-11c	7.8	55.25	162.35	108	38	15	90	30	<del>50</del>	2.74	25
78-11d	7.8	55.4	162	108	38	15	90	30	<del>50</del>	2.74	35
78-12a	7.8	55.75	164.15	108	38	15	90	30	<del>50</del>	3.42	5
78-12b	7.8	55.9	163.7	108	38	15	90	30	<del>50</del>	2.74	15
78-12c	7.8	56.05	163.2	108	38	15	90	30	<del>50</del>	2.74	25
78-12d	7.8	56.2	162.75	108	38	15	90	30	<del>58</del>	2.74	35
78-13d	7.8	55.3	164.75	108	38	10	170	125	140	3.42	5

78-14d	7.8	54.75	166.23	108	38	10	170	125	440	3.42	5
78-15d	7.8	54.1	167.63	108	38	10	170	120	440	3.42	5
78-16d	7.8	53.5	169.05	108	38	10	170	120	440	3.42	5
78-17d	7.8	52.95	170.5	108	38	10	170	115	440	3.42	5
78-18d	7.8	52.5	171.95	108	38	10	170	110	440	3.42	5
78-19d	7.8	52.05	173.55	108	38	10	170	110	400	3.42	5
78-20d	7.8	51.6	175.6	108	38	10	170	105	400	3.42	5
78-21c	7.8	57.25	163.75	108	38	35	90	-5	0	3.42	5
78-21d	7.8	57.25	163.23	108	38	125	90	-5	0	3.42	5
78-22c	7.8	58.13	163.65	108	38	35	90	-10	0	3.42	5
78-22d	7.8	58.15	163.18	108	38	125	90	-10	0	3.42	5
78-23c	7.8	59.05	163.9	108	38	35	90	30	45	3.42	5
78-23d	7.8	59.25	163.5	108	38	125	90	30	45	3.42	5
78-24c	7.8	59.55	164.45	108	38	35	90	30	45	3.42	5
78-24d	7.8	59.8	164.05	108	38	125	90	30	45	3.42	5
78-25c	7.8	57.95	164.1	108	38	35	90	30	50	3.42	5
78-25d	7.8	58.2	163.75	108	38	125	90	30	50	3.42	5
78-26c	7.8	58.7	165.15	108	38	35	90	40	60	3.42	5
78-26d	7.8	58.95	164.8	108	38	125	90	40	60	3.42	5
78-27c	7.8	59.33	166.4	108	38	35	90	50	65	3.42	5
78-27d	7.8	59.55	166.1	108	38	125	90	50	65	3.42	5
78-28c	7.8	59.75	167.75	108	38	35	90	60	70	3.42	5
78-28d	7.8	60.08	167.65	108	38	125	90	60	70	3.42	5
81-1e	8.1	47.13	155.45	150	52	135	90	35	58	5.1	5
81-1f	8.1	47.38	154.8	150	52	45	90	35	58	5.1	5
81-2e	8.1	48.25	157	150	52	135	90	35	58	5.1	5
81-2f	8.1	48.5	156.43	150	52	45	90	35	58	5.1	5
81-3e	8.1	49.4	158.6	150	52	135	90	35	58	5.1	5
81-3f	8.1	49.65	158	150	52	45	90	35	58	5.1	5
81-4e	8.1	50.6	160.25	150	52	135	90	35	58	5.1	5
81-4f	8.1	50.85	159.6	150	52	45	90	35	58	5.1	5
81-5e	8.1	51.75	161.65	150	52	135	90	30	58	5.1	5
81-5f	8.1	52.05	161.03	150	52	45	90	30	58	5.1	5
81-6e	8.1	53.05	162.95	150	52	135	90	30	50	5.1	5
81-6f	8.1	53.25	162.25	150	52	45	90	30	50	5.1	5
81-7e	8.1	54.3	164.18	150	52	135	90	30	50	5.1	5
81-7f	8.1	54.5	163.45	150	52	45	90	30	50	5.1	5
84-1b	8.4	47.33	153.45	215	75	15	90	35	58	6.1	5
84-1d	8.4	47.68	152.55	215	75	15	90	35	58	5.5	25
84-2b	8.4	48.95	155.58	215	75	15	90	35	58	6.1	5
84-2d	8.4	49.3	154.75	215	75	15	90	35	58	5.5	25
84-3b	8.4	50.5	157.75	215	75	15	90	35	58	6.1	5
84-3d	8.4	50.85	156.95	215	75	15	90	35	58	5.5	25
84-4b	8.4	52.13	159.83	215	75	15	90	35	58	6.1	5
84-4d	8.4	52.5	158.98	215	75	15	90	35	58	5.5	25
84-5b	8.4	53.78	161.63	215	75	15	90	35	50	6.1	5
84-5d	8.4	54.1	160.65	215	75	15	90	35	50	5.5	25
84-6b	8.4	55.45	163.3	215	75	15	90	30	50	6.1	5
84-6d	8.4	55.7	162.3	215	75	15	90	30	50	5.5	25
84-7d	8.4	55.55	166.5	215	75	10	170	125	440	6.1	5
84-8d	8.4	54.4	169.5	215	75	10	170	120	440	6.1	5
84-9d	8.4	53.43	172.25	215	75	10	170	115	405	6.1	5

84-10d	8.4	52.45	175.4	215	75	10	170	110	400	6.1	5
90-1d	9.0	48.5	153.65	430	150	15	90	35	90	11.6	5
90-2d	9.0	51.65	157.9	430	150	15	90	35	90	11.6	5
90-3d	9.0	54.9	161.5	430	150	15	90	35	90	11.6	5
90-4d	9.0	55	167.95	430	150	10	170	125	170	11.6	5
90-5d	9.0	52.9	173.83	430	150	10	170	110	170	11.6	5

Расположение защищаемых пунктов и гипоцентров модельных потенциально опасных цунамигенных землетрясений ближней зоны различной магнитуды представлены на следующих двух рисунках (Рис. 24, Рис. 25).

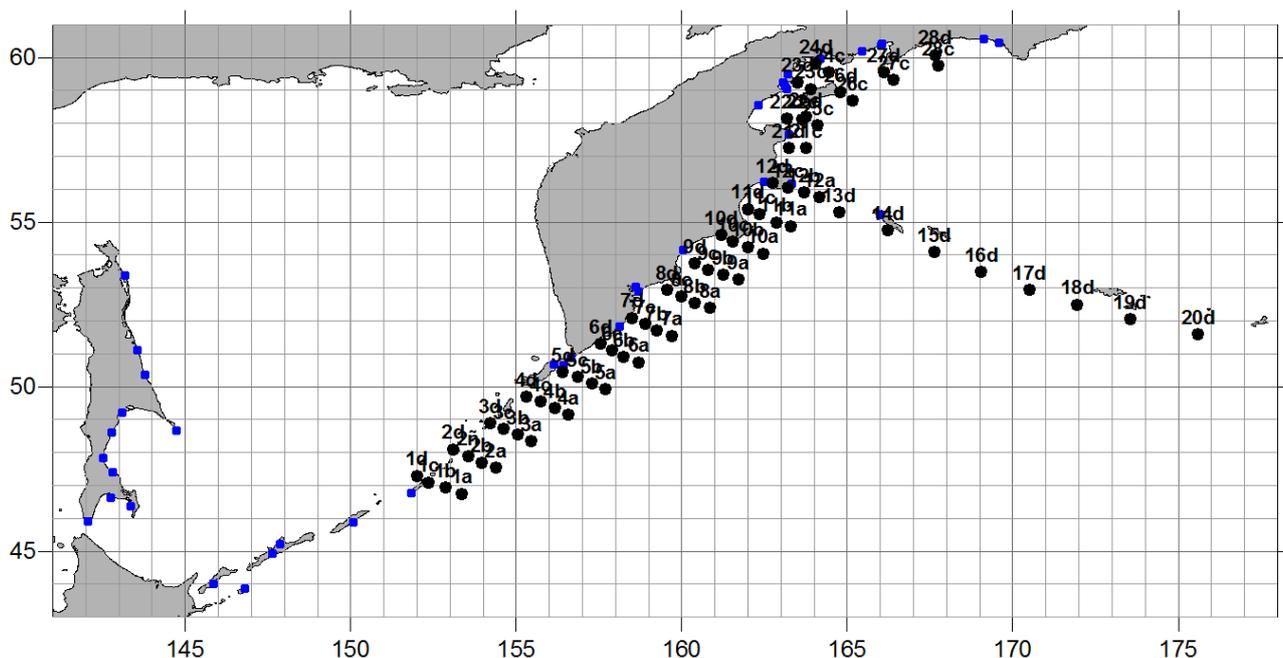


Рис. 24. Схема размещения очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M_w=7.8$ . Синими кружочками указаны защищаемые пункты.

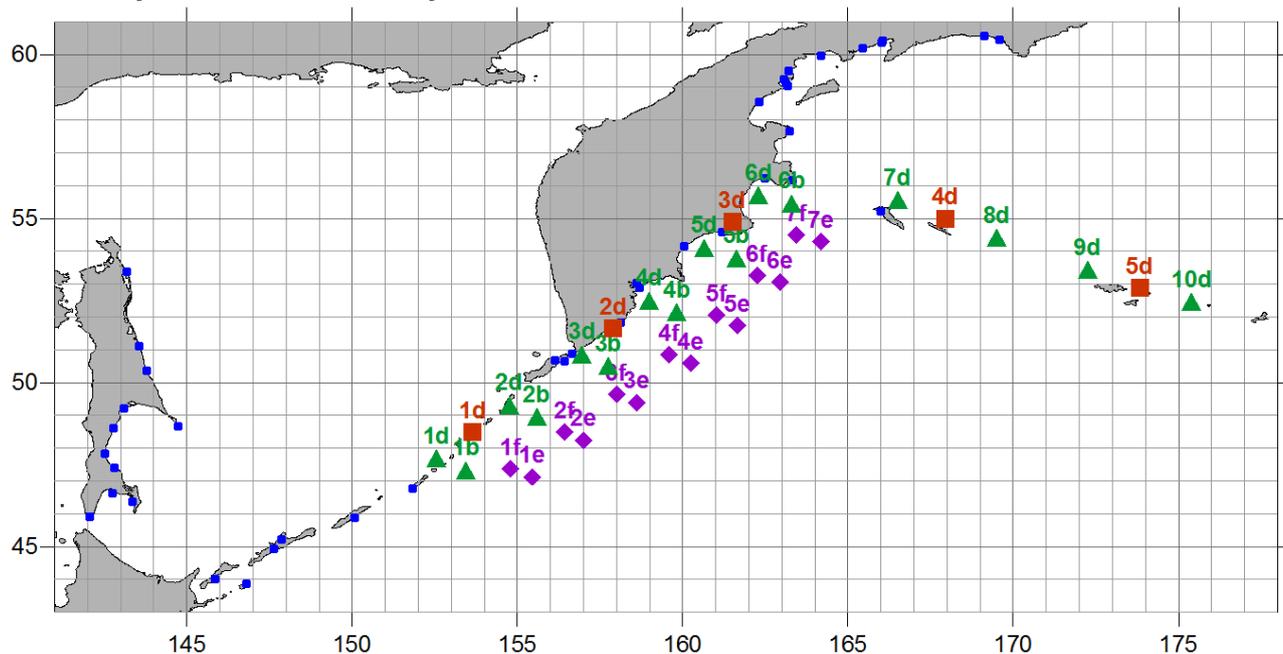


Рис. 25. Схема размещения очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами  $M_w=8.1$  (сиреневые ромбики),  $M_w=8.4$  (зеленые треугольники),  $M_w=9.0$  (оранжевые квадраты). Синим цветом отмечены защищаемые пункты.

## 7. Защищаемые пункты

Все заданные Заказчиком защищаемые пункты изначально были разделены на 7 частично пересекающихся групп, из которых Техническим заданием на 2010 г. были выделены пункты, входящие в четыре группы:

- 1 – Камчатского УГМС;
- 2 – ГМС Камчатского УГМС;
- 3 – Сахалинского УГМС, схема 1;
- 5 – Сахалинского УГМС, схема 3;

В приведенной ниже таблице (Табл. 5) перечислены:

- названия указанных Заказчиком защищаемых пунктов четырех групп;
- индексы, определяющие их принадлежность одной из групп;
- «исходные» географические координаты защищаемых пунктов;
- их целочисленные координаты в терминах номеров узлов выбранного Исполнителем фрагмента пятнадцатисекундной сетки;
- соответствующие им физические координаты;
- отклонение этих значений от «исходных» и
- значения глубин.

Рельеф дна «глобальной» расчетной области изображен на Рис. 26. Иллюстрация распределения глубин под «защищаемыми пунктами» из Табл. 6 на пятнадцатисекундной сетке приведена на Рис. 27. Без учета этих значений входных параметров невозможна адекватная интерпретация результатов вычислительных экспериментов. Как видно из этого рисунка, в двух точках (Кострома (№ 10), Семячки (№ 17) и Мыс Терпения (№ 33)) глубины превосходят отметку 25 м, что связано с погрешностью цифровой батиметрии и естественной неопределенностью в указании координат соответствующих пунктов. Эту характеристику используемых батиметрических данных удалось существенно улучшить при переходе на расчетную сетку высокого пространственного разрешения – на одноминутной сетке в некоторых защищаемых пунктах соответствующие глубины превышали 45 м (см. отчет по первому этапу работ 2010 г.). Следует отметить, что в ходе расчетов значения глубин, меньшие 10 м, заменялись на это «стандартное» значение. Так что в соответствии с Техническим заданием, высоты волн определялись на десятиметровой изобате. Отметим также, что использованная исполнителями пятнадцатисекундная цифровая батиметрия была получена путем билинейной интерполяции тридцатисекундной батиметрии «ГЕВСО-2008» в пределах от 43° до 61° Северной широты и от 141° до 178° Восточной долготы.

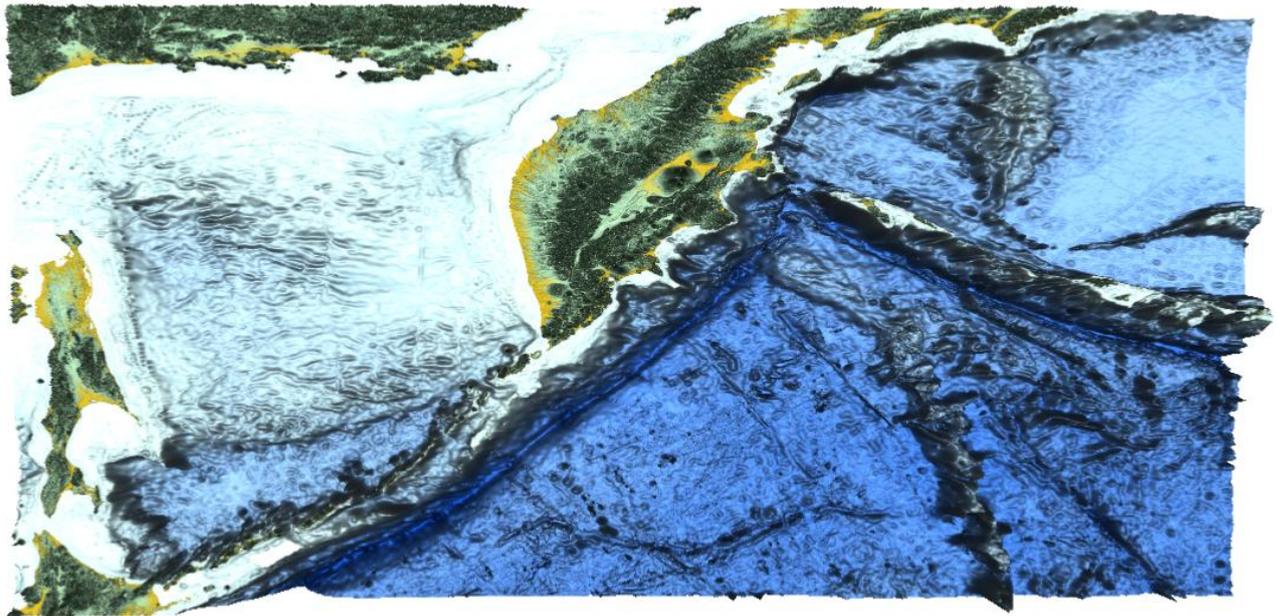


Рис. 26. Рельеф дна «глобальной» расчетной области, использованной для уточняющих расчетов трансформации волн цунами, порожденных потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений ближней относительно Дальневосточного побережья РФ зоны. Изображение построено по батиметрическим данным с разрешением 15 географических секунд. Область расположена в границах по широте от 43° до 61° С.Ш. и по долготе от 141° до 178° В.Д.

Табл. 5. Защищаемые пункты, особенности их привязки к пятнадцатисекундной сетке, а также глубины в соответствующих узлах.

Name	Zone	N	E	J-15	I-15	N-15	E-15	Δ N-15	Δ E-15	Depth-15
Il'pyrskoe	1	59.96	164.18	4070	5565	59.95416667	164.1833333	-0.005833333	0.003333333	9
Ivashka	1	58.57	162.3	3735	5117	58.55833333	162.3166667	-0.011666667	0.016666667	3
Karaga	1	59.11	163.12	3870	5312	59.12083333	163.1291667	0.010833333	0.009166667	0.75
Kostroma	1	59.04	163.18	3850	5325	59.0375	163.1833333	-0.0025	0.003333333	33.5
Pahachi	1	60.56	169.14	4215	6754	60.55833333	169.1375	-0.001666667	-0.0025	0.25
Petropavlovsk-Kamchatskii	1	53.05	158.63	2410	4229	53.0375	158.6166667	-0.0125	-0.013333333	5.25
Tilichiki	1	60.43	163.18	4180	6013	60.4125	166.05	-0.0175	2.87	3
Tymlat	1	59.5	163.18	3960	5330	59.49583333	163.2041667	-0.004166667	0.024166667	1
Ust'-Kamchatsk	1	56.24	162.5	3176	5161	56.22916667	162.5	-0.010833333	0	10.5
Vyvenka	1	60.19	165.45	4125	5871	60.18333333	165.4583333	-0.006666667	0.008333333	2.5
Apuka	1, 2	60.46	169.58	4188	6859	60.44583333	169.575	-0.014166667	-0.005	4.75
Korf	1, 2	60.37	166.01	4170	6003	60.37083333	166.0083333	0.000833333	-0.001666667	2
Nikol'skoe	1, 2	55.2	166.02	2931	5999	55.20833333	165.9916667	0.008333333	-0.028333333	2
Ossora	1, 2	59.25	163.07	3900	5298	59.24583333	163.0708333	-0.004166667	0.000833333	1.25
Afrika	2	56.18	163.3	3161	5356	56.16666667	163.3125	-0.013333333	0.0125	13
Kronoki	2	54.58	161.21	2780	4848	54.57916667	161.1958333	-0.000833333	-0.014166667	22.75
Lopatka	2	50.87	156.67	1889	3759	50.86666667	156.6583333	-0.003333333	-0.011666667	2
Ozernaya	2	57.65	163.23	3517	5335	57.65	163.225	0	-0.005	16.5
Petropavlovskii mayak	2	52.88	158.72	2373	4250	52.88333333	158.7041667	0.003333333	-0.015833333	2.5
Semyachiki	2	54.2	159.98	2676	4569	54.14583333	160.0333333	-0.054166667	0.053333333	28.25
Vodopadnaya	2	51.82	158.1	2117	4107	51.81666667	158.1083333	-0.003333333	0.008333333	18
Burevestnik	3	44.92	147.61	465	1591	44.93333333	147.625	0.013333333	0.015	1
Malokuril'skoe	3	43.87	146.82	212	1396	43.87916667	146.8125	0.009166667	-0.0075	5
Shumshu	3	50.74	156.31	1837	3701	50.65	156.4166667	-0.09	0.106666667	4.5
Simushir	3	46.82	151.78	908	2602	46.77916667	151.8375	-0.040833333	0.0575	2.875
Urup	3	45.96	149.99	689	2181	45.86666667	150.0833333	-0.093333333	0.093333333	2.5
Yuzhno-Kuril'sk	3	44.04	145.85	246	1165	44.02083333	145.85	-0.019166667	0	2.5
Severo-Kuril'sk	3, 5	50.68	156.12	1841	3633	50.66666667	156.1333333	-0.013333333	0.013333333	1.5
M.Kril'on	4	45.9	142.08	696	259	45.89583333	142.075	-0.004166667	-0.005	1.25
Komrvo	5	51.12	143.57	1949	617	51.11666667	143.5666667	-0.003333333	-0.003333333	1
Korsakov	5	46.64	142.78	872	423	46.62916667	142.7583333	-0.010833333	-0.021666667	1.75

Kuril'sk	5	45.23	147.88	537	1648	45.23333333	147.8625	0.003333333	-0.0175	3.5
M.Terpeniya	5	48.65	144.73	1358	896	48.65416667	144.7291667	0.004166667	-0.000833333	27.75
Makarov	5	48.63	142.77	1350	431	48.62083333	142.7916667	-0.009166667	0.021666667	1.5
Novikovo	5	46.37	143.35	809	564	46.36666667	143.3458333	-0.003333333	-0.004166667	0.75
Odoptu	5	53.37	143.17	2491	524	53.375	143.1791667	0.005	0.009166667	2.75
Pogranichnoe	5	50.37	143.76	1771	666	50.375	143.7708333	0.005	0.010833333	4
Poronaisk	5	49.22	143.09	1493	504	49.21666667	143.0958333	-0.003333333	0.005833333	5.25
Starodubskoe	5	47.41	142.82	1061	437	47.41666667	142.8166667	0.006666667	-0.003333333	8
Vzmor'e	5	47.85	142.51	1163	368	47.84166667	142.5291667	-0.008333333	0.019166667	2.25

Табл. 6. Нумерация защищаемых пунктов, соответствующая распределению глубин на Рис. 26, Рис. 29 – Рис. 32 и представлению в Базе данных.

1 Nikol'skoe	11 Karaga	21 Lopatka	31 Komrvo
2 Apuka	12 Ivashka	22 Shumshu	32 Pogranichnoe
3 Pahachi	13 Ozernaya	23 Severo-Kuril'sk	33 M.Terpeniya
4 Tilichiki	14 Afrika	24 Simushir	34 Poronaisk
5 Korf	15 Ust'-Kamchatsk	25 Urup	35 Makarov
6 Vyvenka	16 Kronoki	26 Kuril'sk	36 Vzmor'e
7 Il'pyrskoe	17 Semyachiki	27 Burevestnik	37 Starodubskoe
8 Tymlat	18 Petropavlovskii mayak	28 Malokuril'skoe	38 Novikovo
9 Ossora	19 Petropavlovsk-Kamchatskii	29 Yuzhno-Kuril'sk	39 Korsakov
10 Kostroma	20 Vodopadnaya	30 Odoptu	40 M.Kril'on

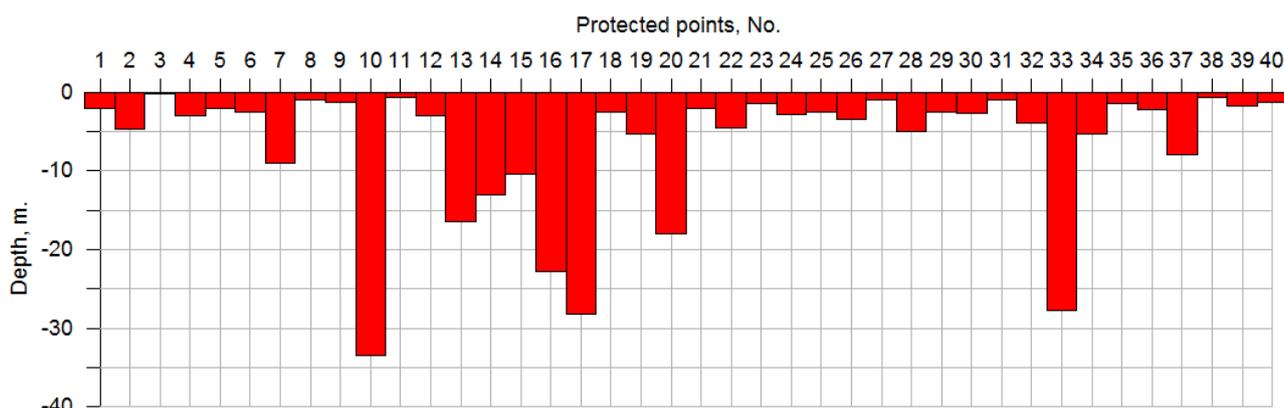


Рис. 27. Распределение глубин под виртуальными расчетными мареографами, соответствующими «защищаемым» пунктам Дальневосточного побережья РФ на глобальной пятнадцатисекундной расчетной сетке

## 8. Сравнение результатов моделирования ближних цунами в малых подобластях и в глобальной расчетной области

Расчеты, выполненные на первом этапе работ, предусмотренных Техническим заданием контракта 2010 г., проводились в «малых подобластях», изображенных на Рис. 28, на котором указано распределение по подобластям очагов модельных цунамиопасных очагов ближней зоны и защищаемых пунктов.

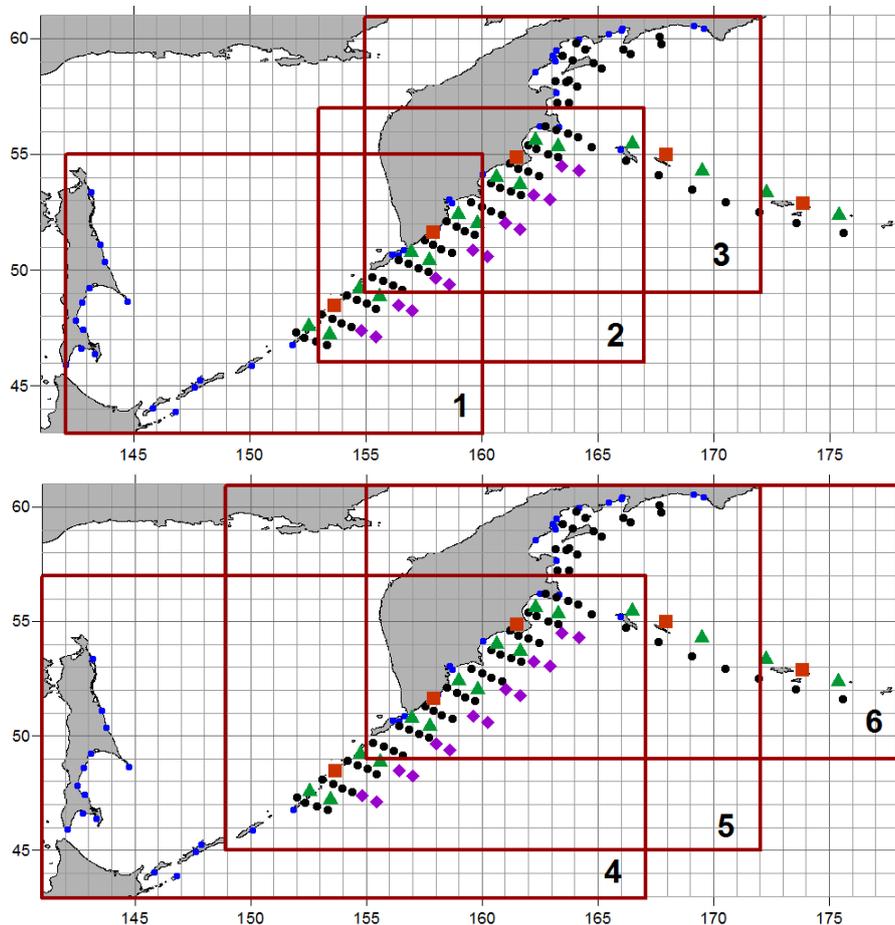


Рис. 28. Схематическое изображение малых расчетных подобластей, размещения очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами  $M_w = 7.8$  (черные кружочки),  $M_w = 8.1$  (сиреневые ромбики),  $M_w = 8.4$  (зеленые треугольники),  $M_w = 9.0$  (оранжевые квадраты). Синими кружочками отмечены защищаемые пункты.

Изображенные на следующей серии рисунков (Рис. 29 – Рис. 32) гистограммы распределения экстремальных высот волн наглядно демонстрируют более чем удовлетворительное совпадение результатов, полученных с использованием методики «малых подобластей», с результатами, рассчитанными в глобальной области. Некоторые несущественные различия, скорее всего, связаны с использованием для расчета начальных возмущений «старых» (без коррекции ориентации) модельных источников. Некоторые представления о влиянии ориентации источника на проявление волн цунами вдоль побережья дают результаты решения модельной тестовой задачи, представленные исполнителями на уже упоминавшемся июньском (2010 г.) Совещании в г. Южно-Сахалинске (см. также Приложение 3).

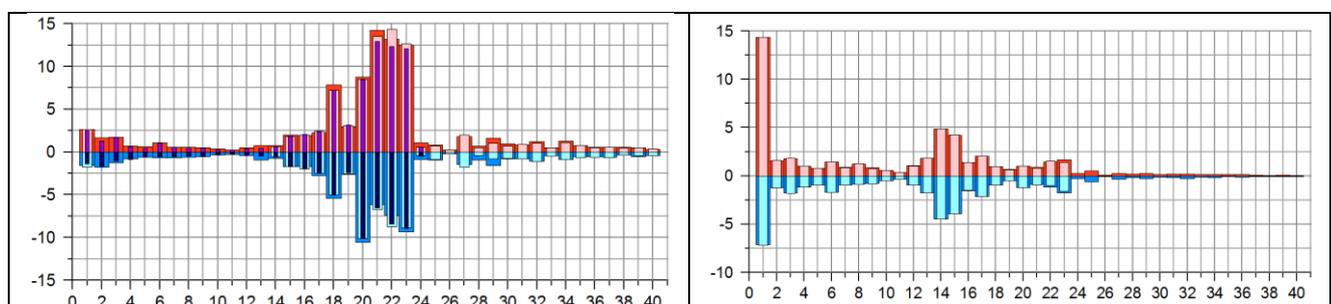


Рис. 29. Сравнение экстремальных значений высот волн в «защищаемых пунктах», рассчитанных на пятнадцатисекундной сетке в глобальной области (широкие столбцы) и в малых подобластях. Слева – для источника с магнитудой  $M_w = 9.0(2d)$  расчеты проводились в подобласти 4 (столбцы средней толщины) и 5 (узкие), справа – для источника 9.0(4d) расчеты проводились в подобласти 6 (столбцы средней толщины). По вертикальной оси отложены высоты волн в метрах, по горизонтальной – номера «защищаемых пунктов» согласно Табл. 6.

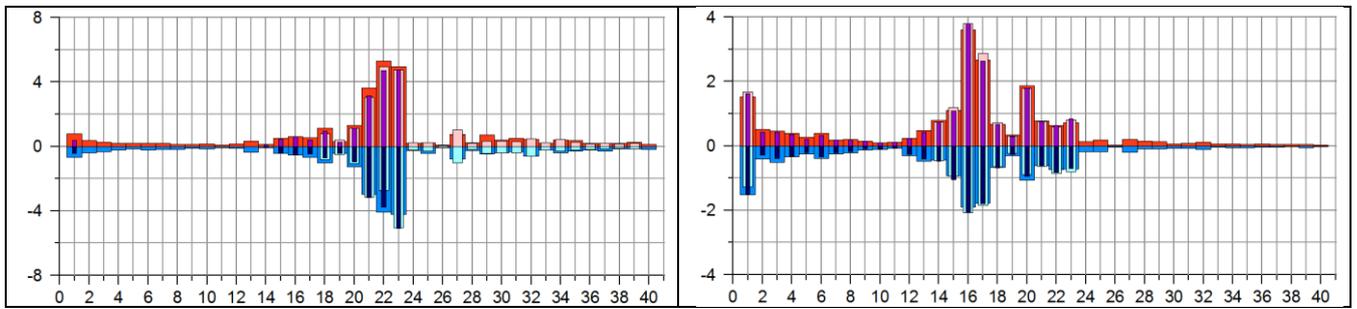


Рис. 30. То же для источника с магнитудой  $M_w = 8.4(3d)$  – слева (подобласть 1 – столбцы средней толщины и 2 – узкие), для источника 8.4(5b) – справа (подобласть 2 – столбцы средней толщины и 3 – узкие).

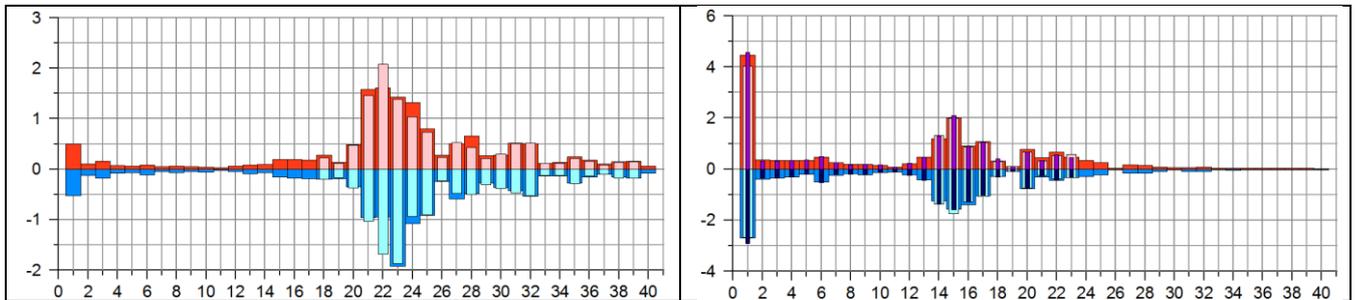


Рис. 31. То же для источника с магнитудой  $M_w = 8.1(2f)$  – слева (подобласть 1 – столбцы средней толщины), для источника 8.1(7e) – справа (подобласти 2 – столбцы средней толщины и 3 – узкие).

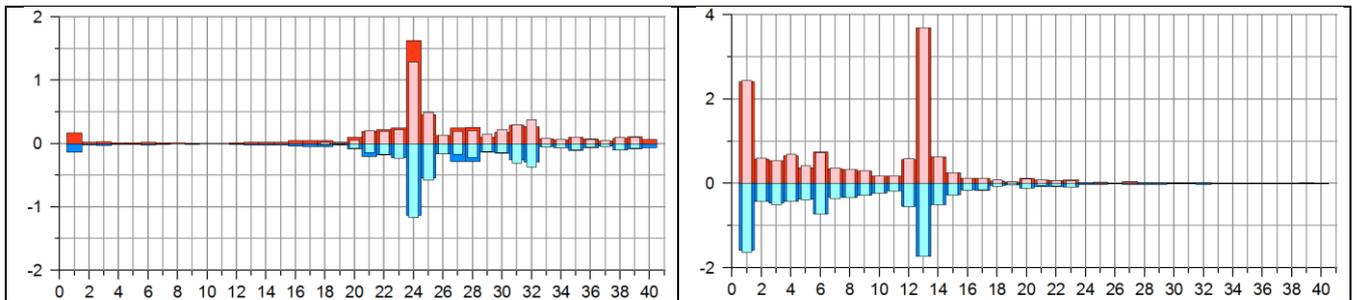


Рис. 32. То же для источника с магнитудой  $M_w = 7.8(1a)$  – слева (подобласть 1 – столбцы средней толщины), для источника 7.8(21b) – справа (подобласть 3 – столбцы средней толщины).

## 9. Результаты моделирования ближних цунами на детальной пятнадцатисекундной сетке

Наиболее содержательным материалом для интерпретации результатов моделирования с целью определения зон влияния потенциально опасных цунамигенных землетрясений и последующего возможного уточнения базовых положений регламента национальной системы предупреждения о цунами являются экстремальные высоты волн, рассчитанные в виртуальных мареографах, соответствующих защищаемым пунктам. Существенным повышением информативности этих распределений является их расширение за счет включения в число виртуальных мареографов «дополнительных» мареографов, размещенных вдоль всего защищаемого побережья с достаточным пространственным шагом (здесь такой шаг равнялся 10 – 15 километрам). Схема расстановки всех виртуальных мареографов указана на Рис. 33, а номера, соответствующие защищаемым пунктам, – в Табл. 7.

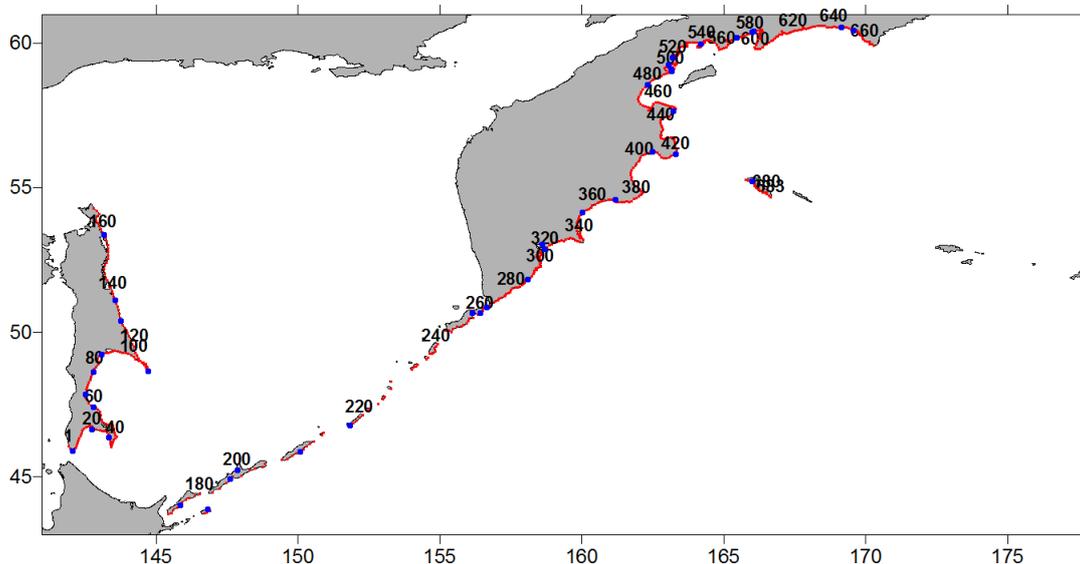


Рис. 33. Схема размещения виртуальных мареографов в глобальной области. Синими кружочками указаны защищаемые пункты (нумерация соответствует Табл. 7.), красными – остальные.

Табл. 7. Нумерация защищаемых пунктов в общем перечне виртуальных мареографов на пятнадцатисекундной сетке.

4	M.Kril'on	290 Vodopadnaya
21	Korsakov	316 Petropavlovsk-Kamchatskii
31	Novikovo	319 Petropavlovskii mayak
59	Starodubskoe	354 Semyachiki
67	Vzmor'e	370 Kronoki
78	Makarov	407 Ust'-Kamchatsk
87	Poronaisk	419 Afrika
108	M.Terpeniya	450 Ozernaya
129	Pogranichnoe	481 Ivashka
137	Komrvo	499 Karaga
158	Odoptu	503 Kostroma
174	Yuzhno-Kuril'sk	509 Ossora
185	Malokuril'skoe	519 Tymlat
191	Burevestnik	548 Il'pyrskoe
200	Kuril'sk	574 Vyvenka
207	Urup	582 Korf
216	Simushir	585 Tilichiki
255	Severo-Kuril'sk	644 Pahachi
261	Shumshu	651 Apuka
266	Lopatka	670 Nikol'skoe

Следующая серия рисунков представляет характерные расчетные гистограммы для источников различной магнитуды и соответствующие им картины свечений. Вспомогательные штриховые горизонтальные линии на уровне 0.5 м (мелкий пунктир) и 2 м (крупный пунктир) разделяют слабые ( $\leq 0.5$  м), ощутимые ( $> 0.5$  м и  $\leq 2$  м) и сильные ( $> 2$  м) цунами. Для облегчения интерпретации в непосредственной близости к гистограммам изображены схемы размещения соответствующих очагов потенциально опасных цунамигенных землетрясений.

Так, Рис. 34 показывает, что мощное землетрясение 90-1d очаг которого расположен напротив одного из Курильских проливов очень сильно (с амплитудами около 10 м) проявляется на Курильских островах, проникает к Восточному побережью о-ва Сахалин и порождает волны с амплитудами около 5 м на юге Камчатки.

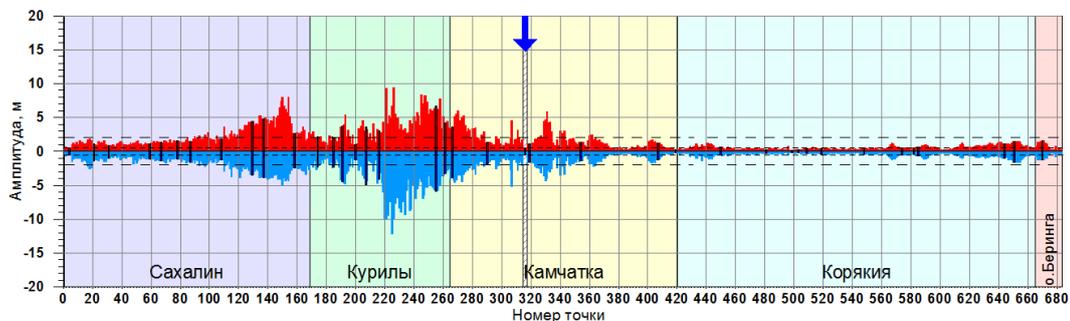


Рис. 34. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 90-1d с магнитудой  $M_w = 9.0$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

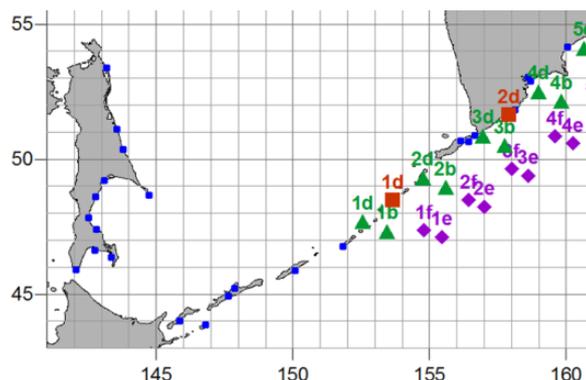


Рис. 35. Размещение очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 90-1d с магнитудой  $M_w = 9.0$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке.

Размещенный у Северной оконечности Камчатки источник 84-6b с магнитудой  $M_w = 8.4$  (Рис. 36, Рис. 37) совершенно безопасен для Восточного побережья о-ва Сахалин и Курильских островов. Волны с амплитудами до 10 м порождаются этим источником на Севере Камчатки и на побережье о-ва Беринга. Двухметровые колебания уровня океана регистрируются в Южной части побережья Карагинского залива. (около 2м).

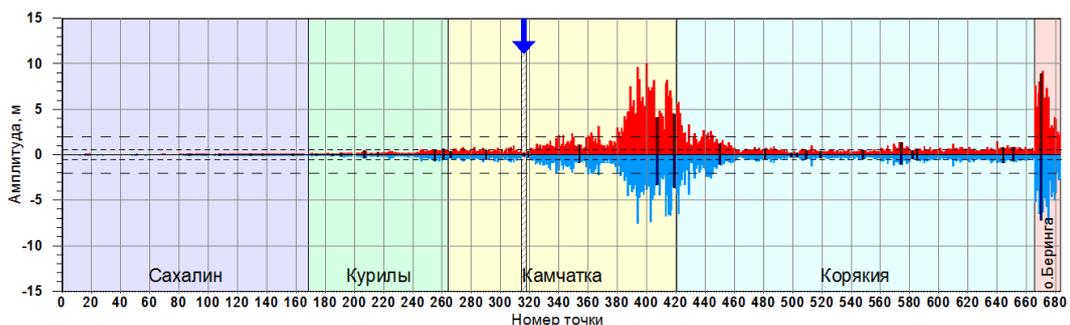


Рис. 36. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 84-6b с магнитудой  $M_w = 8.4$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

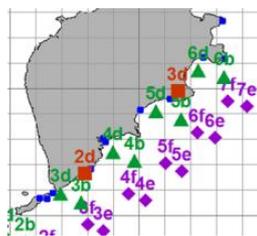


Рис. 37. Размещение очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 84-6b с магнитудой  $M_w = 8.4$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке.

Цунамигенное землетрясение ближней зоны 81-2е с магнитудой  $M_w = 8.1$  демонстрирует узкую направленность, проявляясь в Северной части побережья Курильских островов, части побережья Карагинского залива (около 2м), оставаясь практически незамеченным для оставшейся части защищаемого побережья.

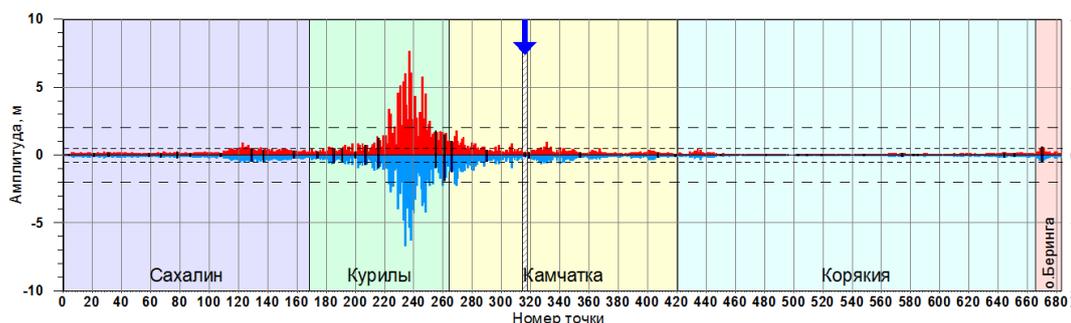


Рис. 38. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 81-2е с магнитудой  $M_w = 8.1$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

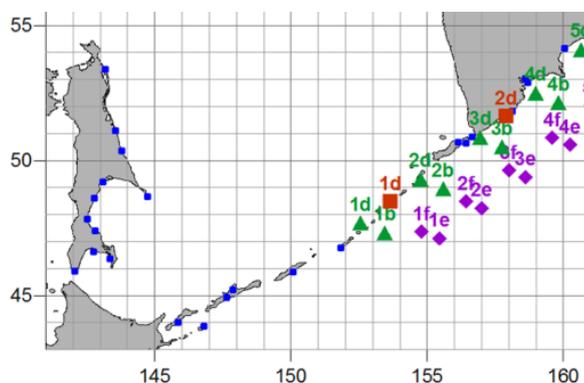


Рис. 39. Размещение очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 81-2е с магнитудой  $M_w = 8.1$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке.

Наконец, последний из рассматриваемых здесь модельных источников (78-28с) с наименьшей магнитудой  $M_w = 7.8$  расположен непосредственно в северной части акватории Карагинского залива (Рис. 40, Рис. 41). Влияние порождаемого соответствующим землетрясением цунами оказывается локализованным в Северной части побережья этого залива, почти не выходит за пределы полуметровой границы вдоль остальной части побережья Корякского автономного округа и, уж тем более, за его пределы.

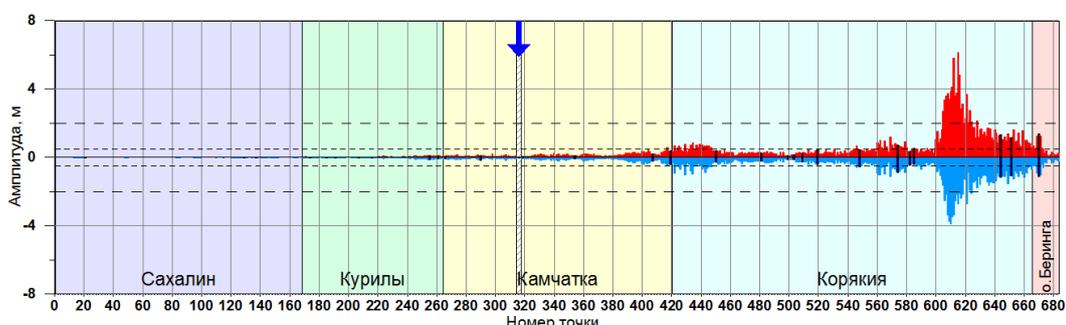


Рис. 40. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 78-28с с магнитудой  $M_w = 7.8$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

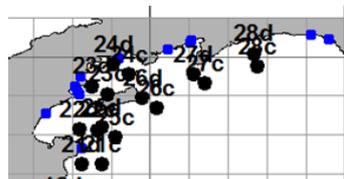


Рис. 41. Размещение очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 78-28с с магнитудой  $M_w = 7.8$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке.

Серия рисунков (Рис. 42 – Рис. 45) позволяет расширить представление, полученное с помощью анализа гистограмм. Изображенные здесь диаграммы направленности (картины свечения) демонстрируют воздействие волн цунами за пределами набора виртуальных мареографов, в частности, вдоль западного побережья Охотского моря.

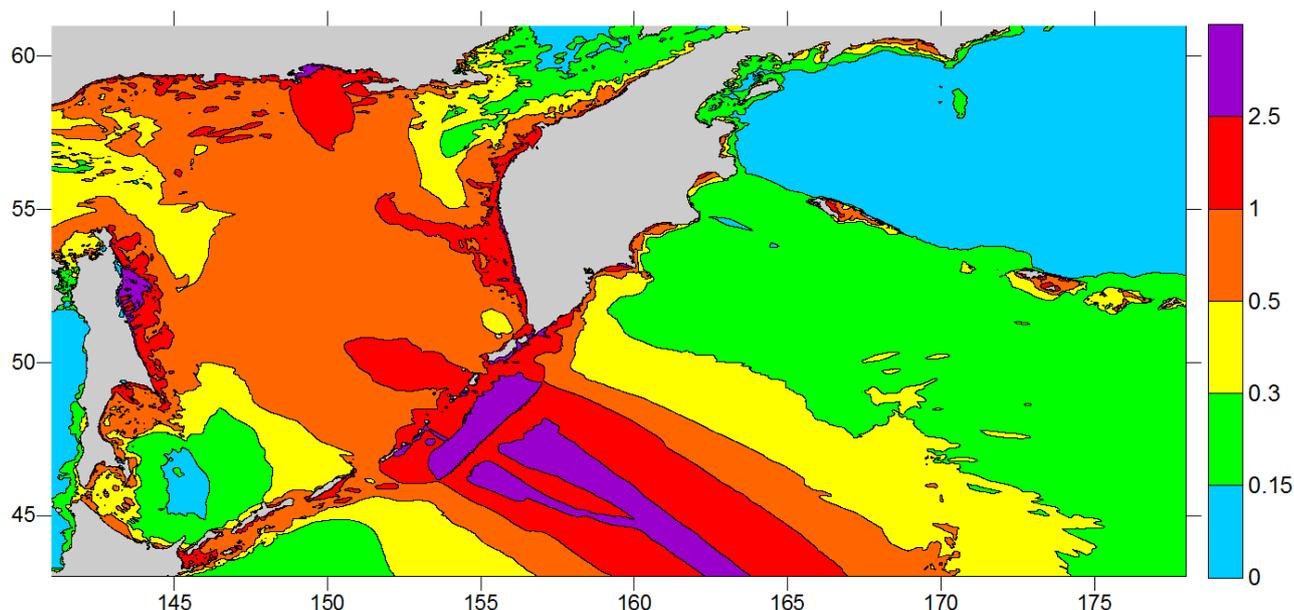


Рис. 42. Распределение максимальных высот волн цунами в глобальной расчетной области после 17.5 часов трансформации волны цунами, рассчитанное для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 90-1d с магнитудой  $M_w = 9.0$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Справа – цветовая шкала высот волн в метрах.

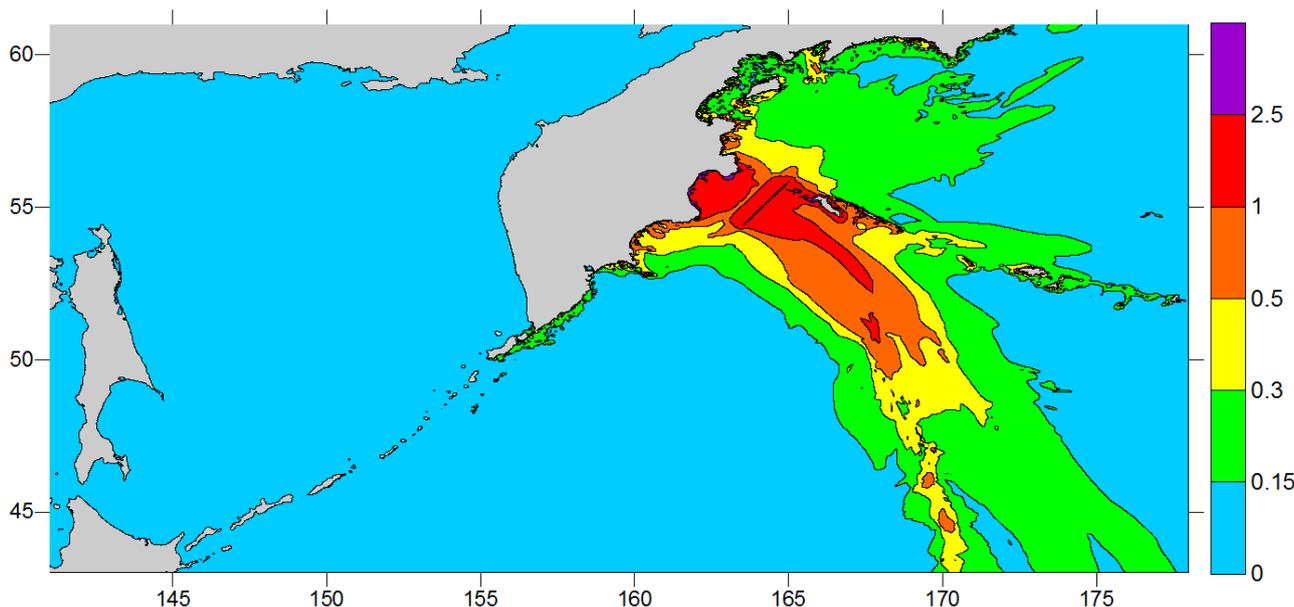


Рис. 43. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 84-6b с магнитудой  $M_w = 8.4$ .

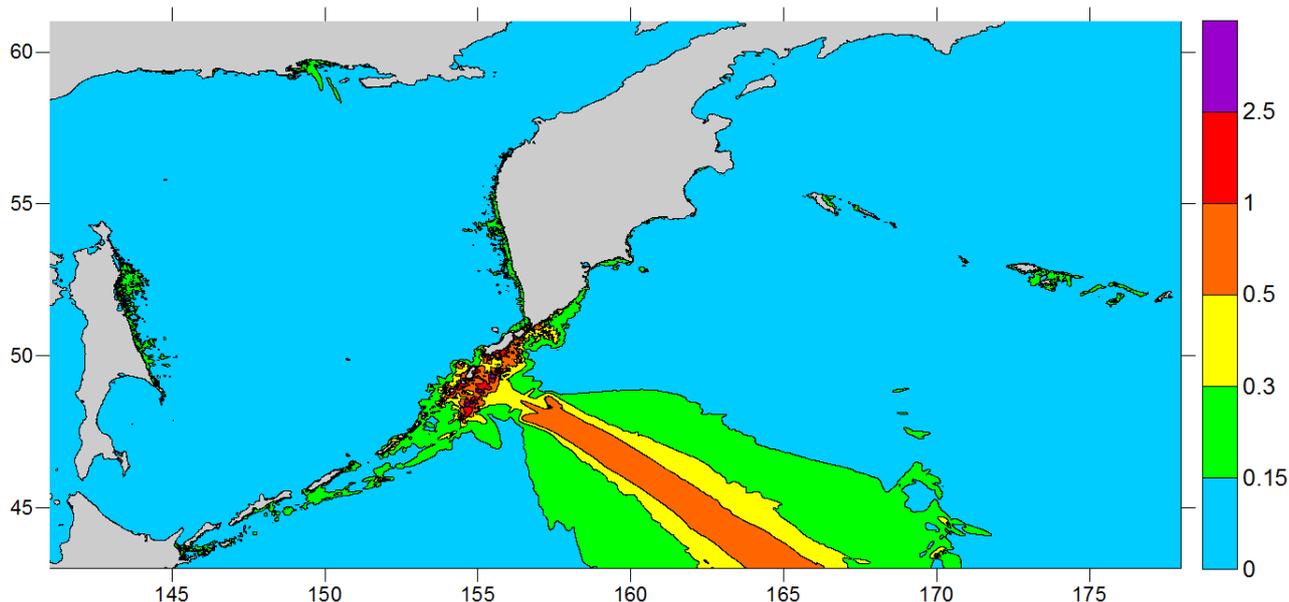


Рис. 44. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 81-2с с магнитудой  $M_w = 8.1$ .

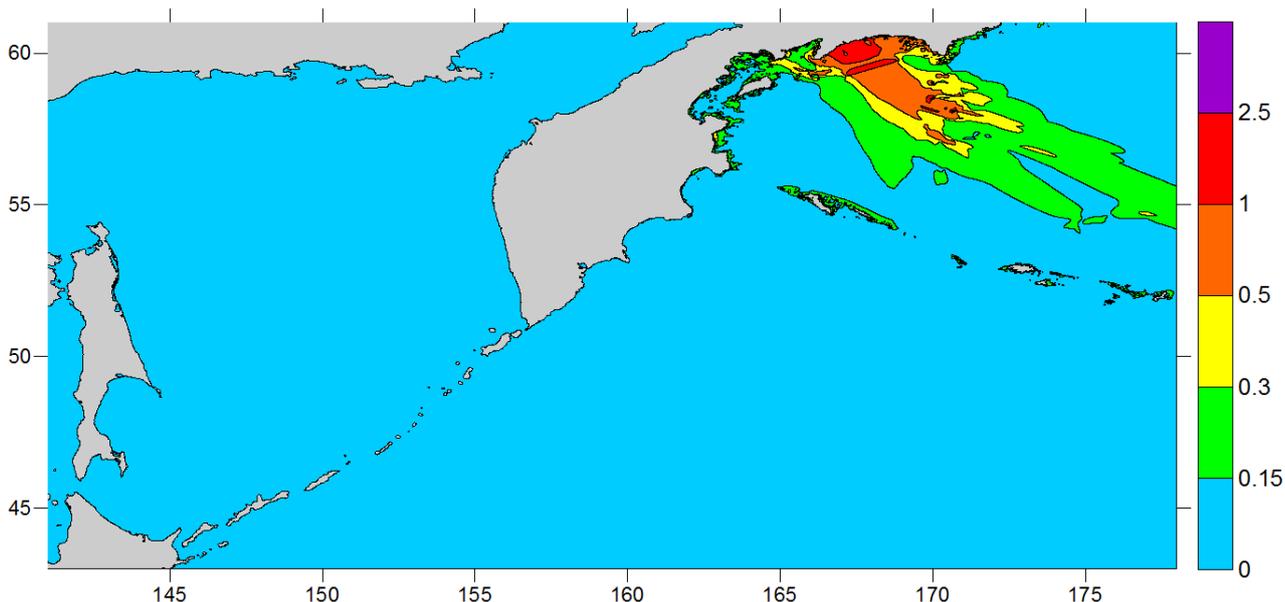


Рис. 45. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 78-28с с магнитудой  $M_w = 7.8$ .

Результаты, представленные в настоящем отчете, позволяют сформулировать следующие предварительные выводы в отношении положения и размеров «зон влияния» рассмотренных модельных источников потенциально опасных цунамигенных землетрясений ближней зоны.

Так, протяженность зоны «значительных» (более 0.5–1.0 м) высот волн цунами вдоль побережья в первую очередь определяется магнитудой подводного землетрясения. Для магнитуды  $M_w = 7.8$  это 450 – 500 км, для магнитуды  $M_w = 8.4$  – около 700 км, для магнитуды  $M_w = 9.0$  – 900-1000 км. При этом в силу сеймотектонических особенностей региона (ориентация очагов вдоль побережья) зона максимальных высот располагается практически всегда против центра очаговой области.

На абсолютную высоту волн цунами на берегу значительное влияние оказывает удаленность очага от побережья. Для источника с землетрясениями с магнитудами  $M_w = 7.8$  уменьшение эпицентрального расстояния со 110 до 10 км приводит к уменьшению средних высот волн на берегу в 2.5 – 3 раза (Рис. 46, а – д). Здесь главным фактором, по-видимому, является средняя глубина воды в очаговой области – чем она больше, тем выше оказывается начальная энергия волн цунами. На это впервые было указано в работе К.Ииды [Iida, 1970], в которой на материале японских землетрясений продемонстрировано влияние глубины воды над очагом подводного

землетрясения на итоговую интенсивность цунами. То есть землетрясение, происходящее в глубоком океане, приводит в движение большой объем воды, что увеличивает начальную энергию цунами.

Весьма важным аспектом проблемы является возможность проникновения опасного цунами в другую защищаемую зону, например, из Курило-Камчатской зоны в Охотское море. Результаты численного моделирования показывают, что такое проникновение может иметь место только для предельно сильных землетрясений с магнитудами 8.5 – 9.0 (Рис. 47). При этом важную роль играет фактическое расположение очага на континентальном склоне. Если для очага 90-1d с магнитудой  $M_w = 9.0$ , расположенного в северной части Курильской гряды, имеющей крупные проливы (Крузенштерна, Креницына, Четвертый Курильский), максимальные высоты волн на восточном побережье Сахалина могут достигать 5-6 метров, то для аналогичного очага 90-2d, когда его влияние экранируется островом Парамушир и южной оконечностью Камчатки, они снижаются до 1 – 2 метров.

С другой стороны, очаги с магнитудами  $M_w = 7.8$  (Рис. 46) практически при любом их положении относительно проливов не создают опасного цунами на Сахалине. Более детальное изучение этого вопроса требует проведения дополнительной серии расчетов для очагов промежуточных магнитуд (8.1-8.6) при их различных положениях относительно крупных Курильских проливов.

Аналогичные соображения можно высказать по отношению в беринговоморскому побережью Корякского автономного округа (КАО). Для него опасность возникает также только при очагах с предельно возможной магнитудой  $M_w = 9.0$  (90-2d, 90-3d и 90-4d), при которых возможны высоты до 2 – 3 метров. При уменьшении магнитуды до  $M_w = 8.4$  (Рис. 48) возможные максимальные высоты падают до 0.5 – 1м даже при наиболее близком (к территории КАО) расположении очага в районе Камчатского мыса (очаги 84-6b, 84-6d, 84-7d).

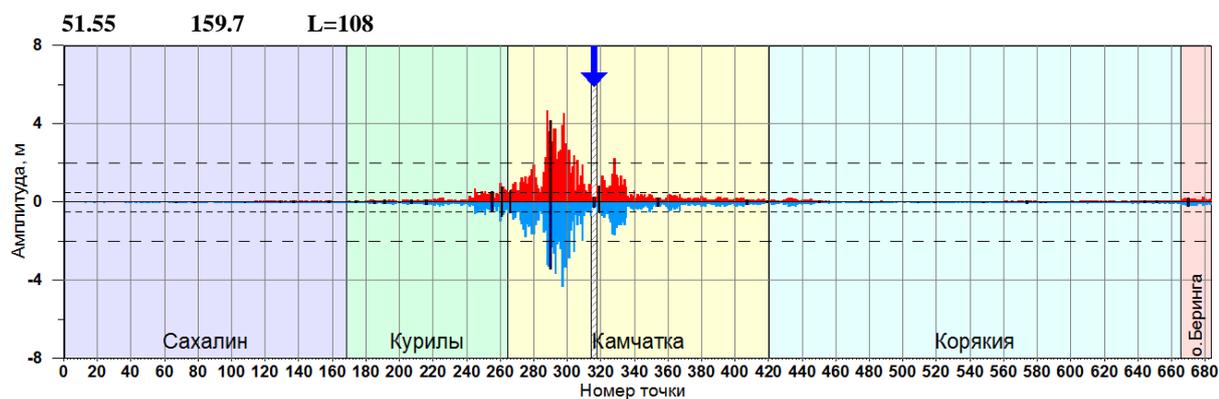
## **10. Заключение**

Результаты расчетов передаются Заказчику в виде Баз данных, структура и содержание которых подробно изложены в отчетах по контрактам 2007 – 2010 гг. Для каждой расчетной подобласти сформирована отдельная база данных. Численные представления картин свечения – максимальные и минимальные распределения высот волн за все время расчета – находятся в соответствующих разделах баз данных.

## **11. Литература**

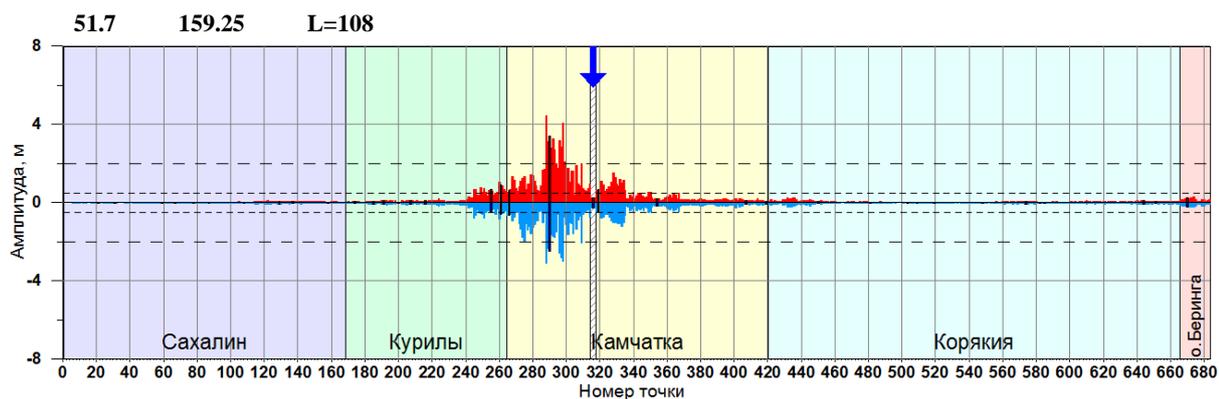
1. Iida K. The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes // Tsunamis in the Pacific ocean, Honolulu, East-West Center Press, 1970, P.3-18.
2. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // J. Geoph. Res., 1977, 82, P. 2981 – 2987.
3. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978а, С.23-51.

### Источник 7.8-7а



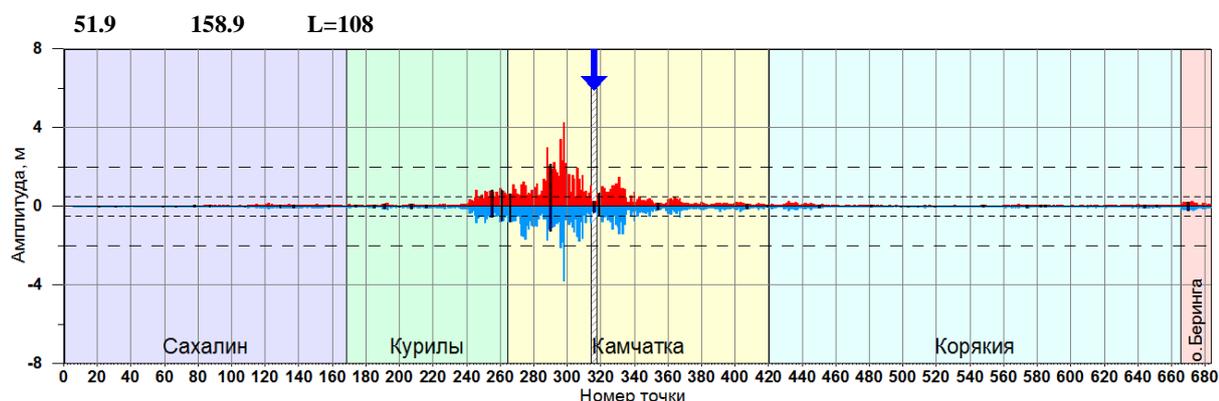
(a)

### Источник 7.8-7б



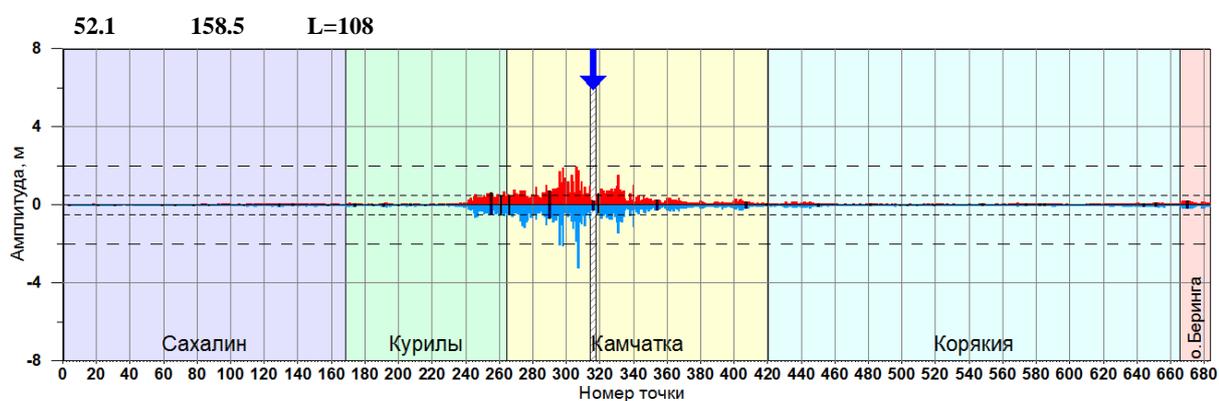
(b)

### Источник 7.8-7с



(c)

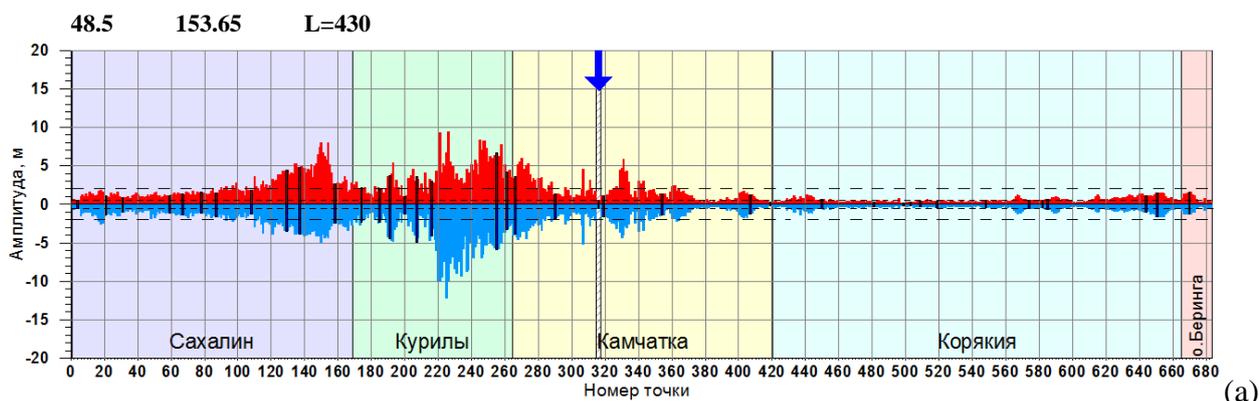
### Источник 7.8-7д



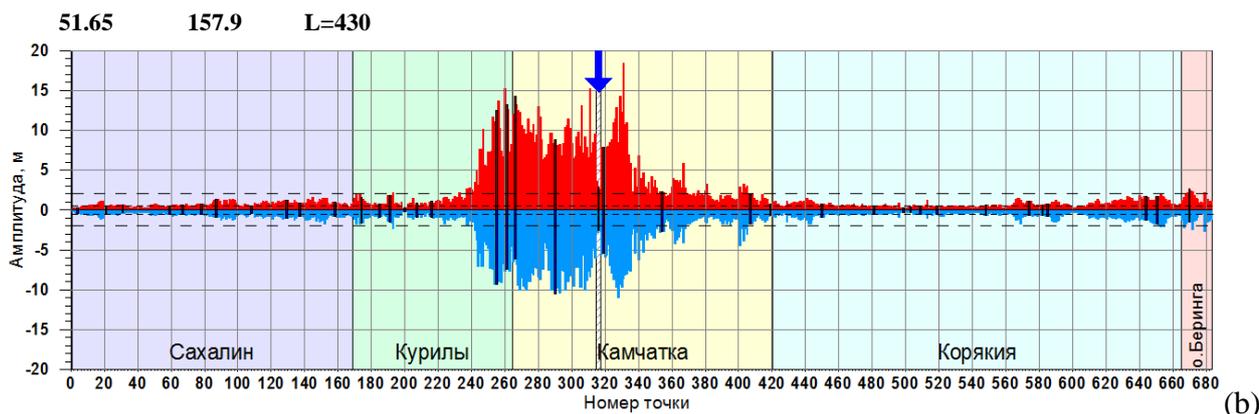
(d)

Рис. 46. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очагов цунамигенного землетрясений ближней зоны 78-7а (а), 78-7б (б), 78-7с (с), 78-7д (д) с магнитудой  $M_w = 7.8$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

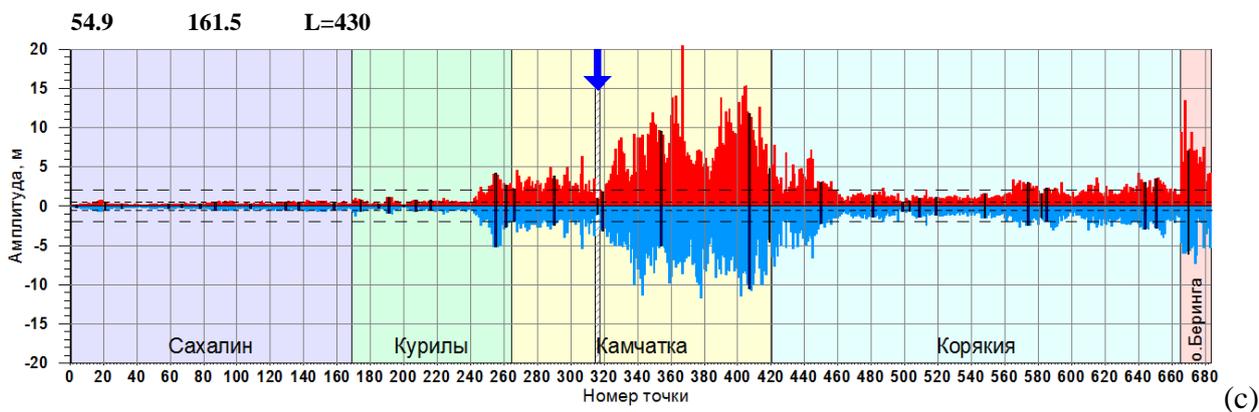
### Источник 9.0-1d



### Источник 9.0-2d



### Источник 9.0-3d



### Источник 9.0-4d

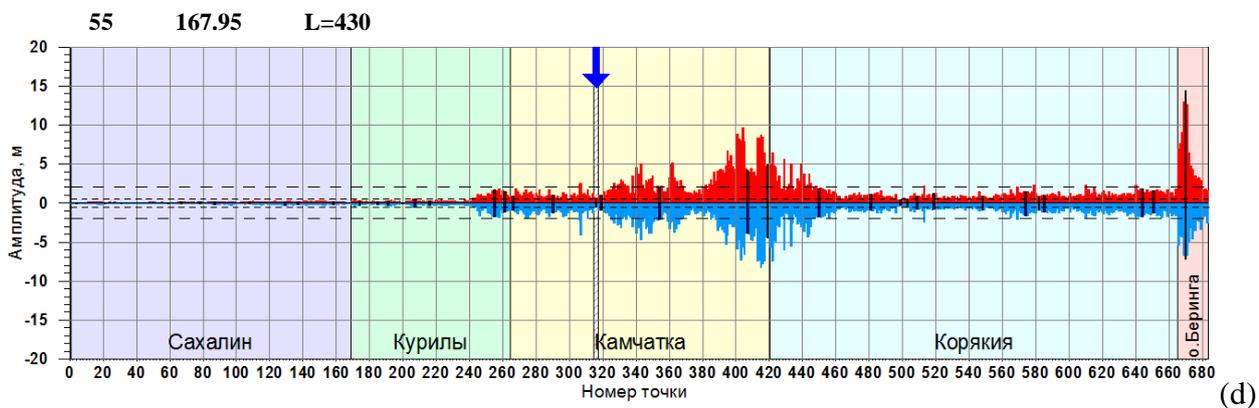
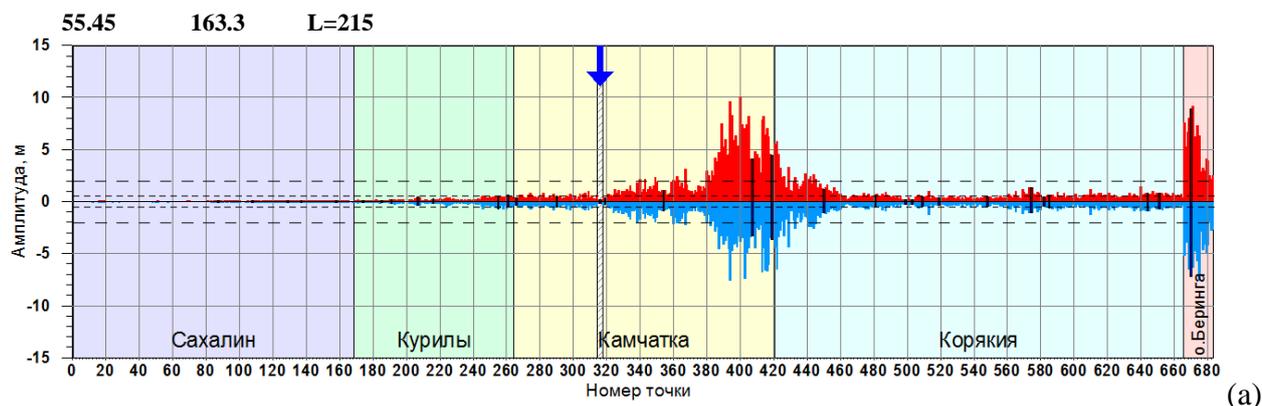
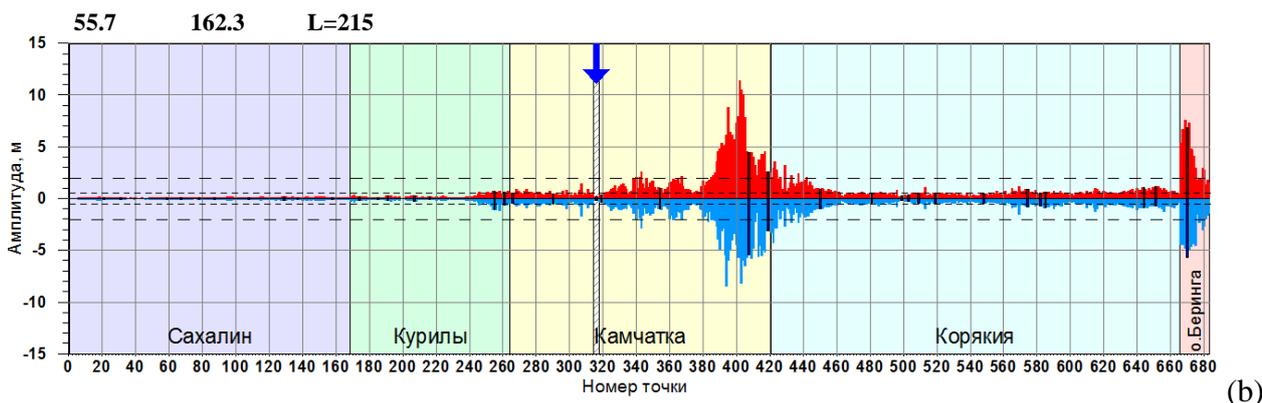


Рис. 47. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очагов цунамигенного землетрясений ближней зоны 90-1d (a), 90-2d (b), 90-3d (c), 90-4d (d) с магнитудой  $M_w = 9.0$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

### Источник 8.4-6b



### Источник 8.4-6d



### Источник 8.4-7d

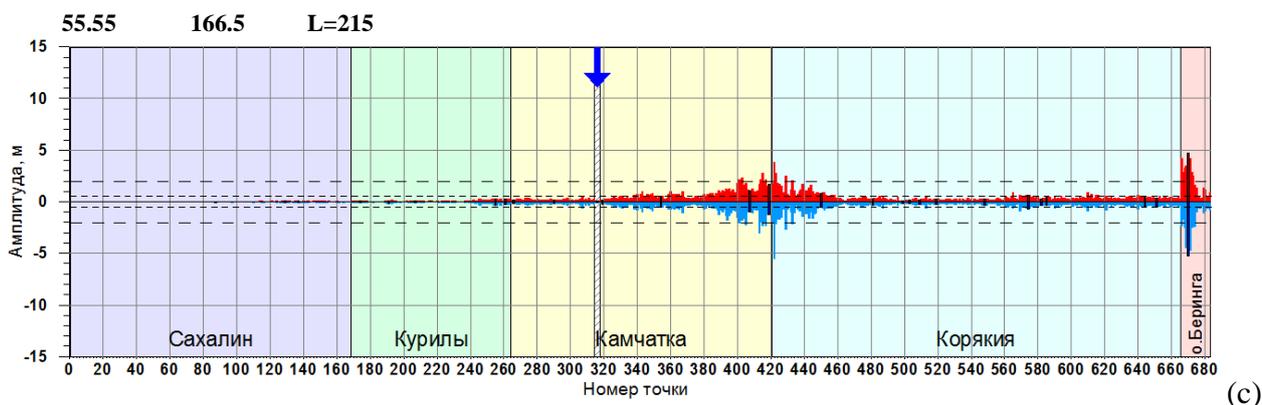
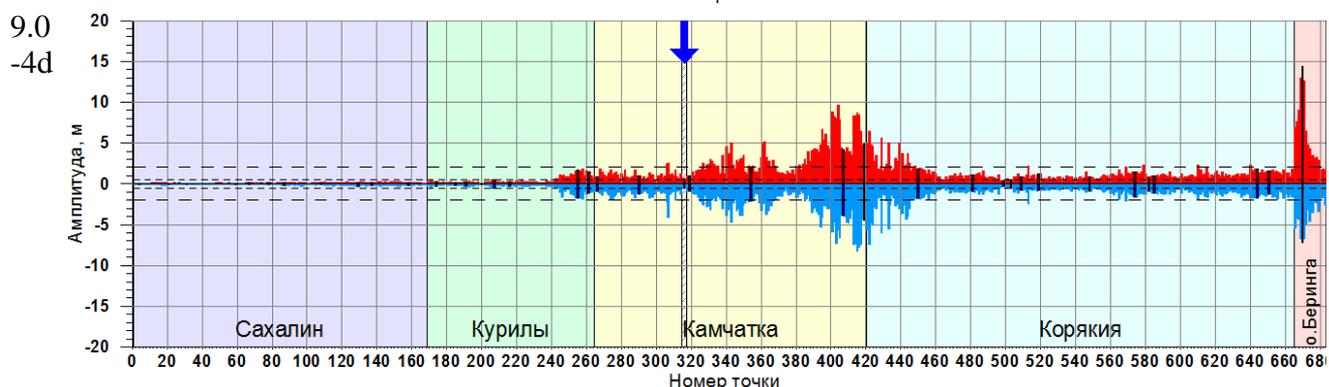
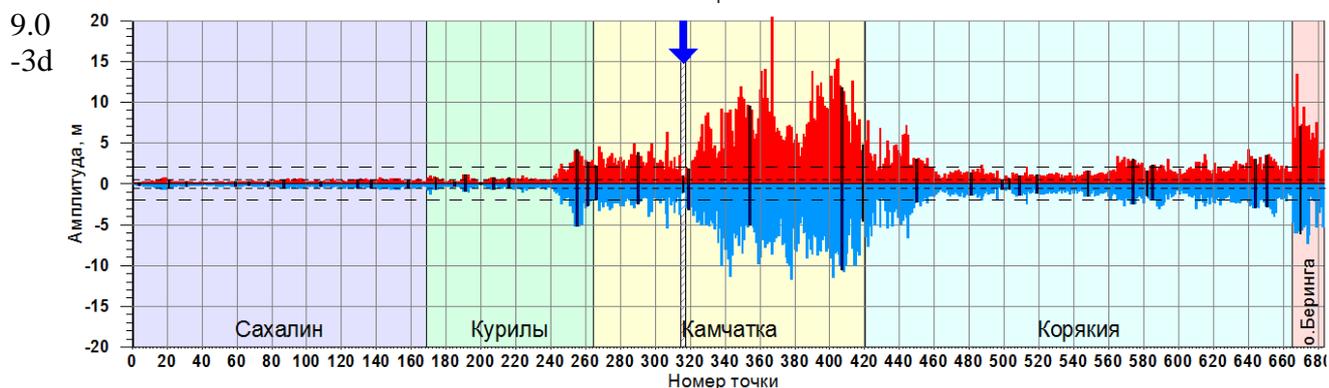
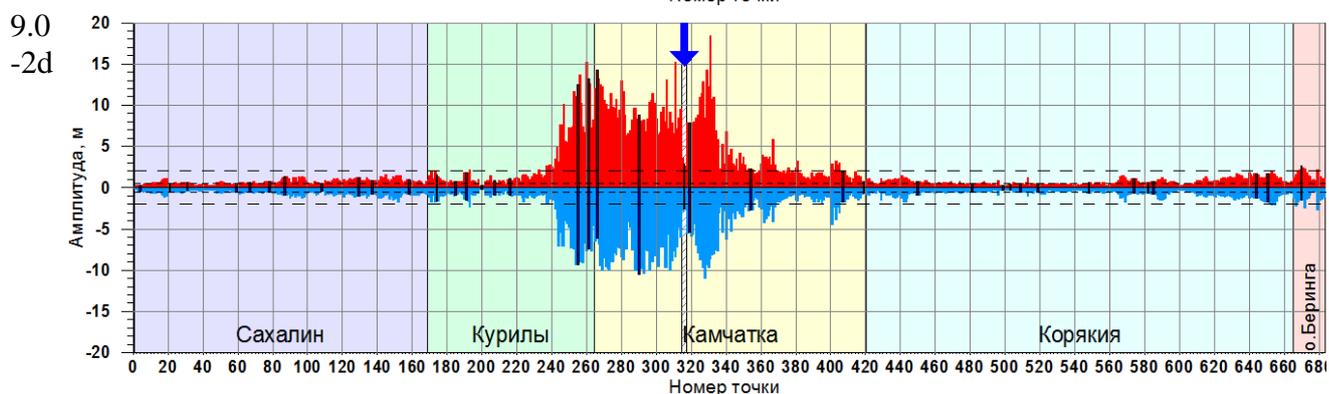
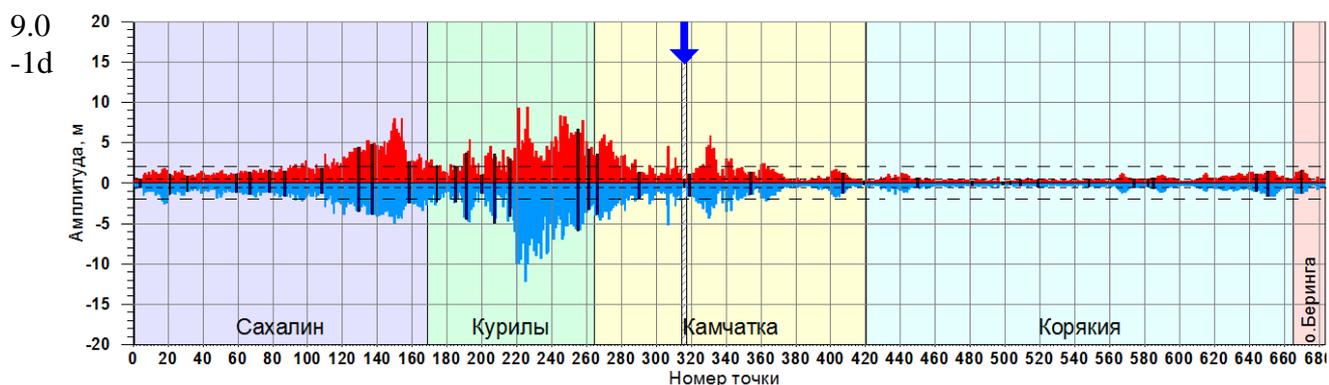
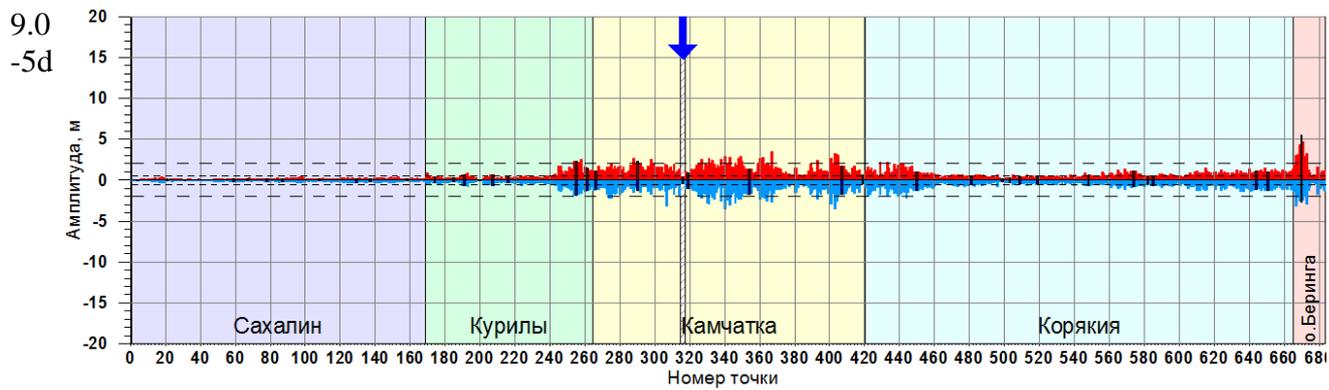


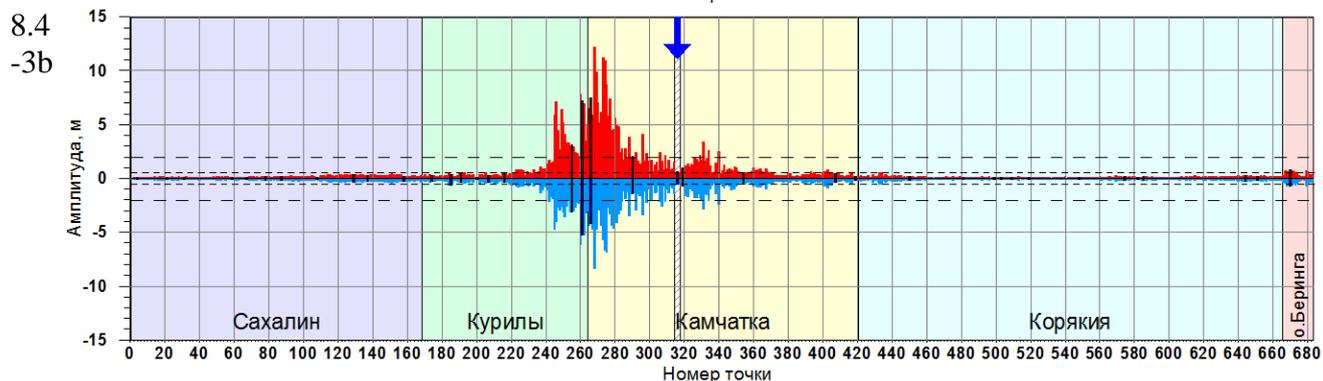
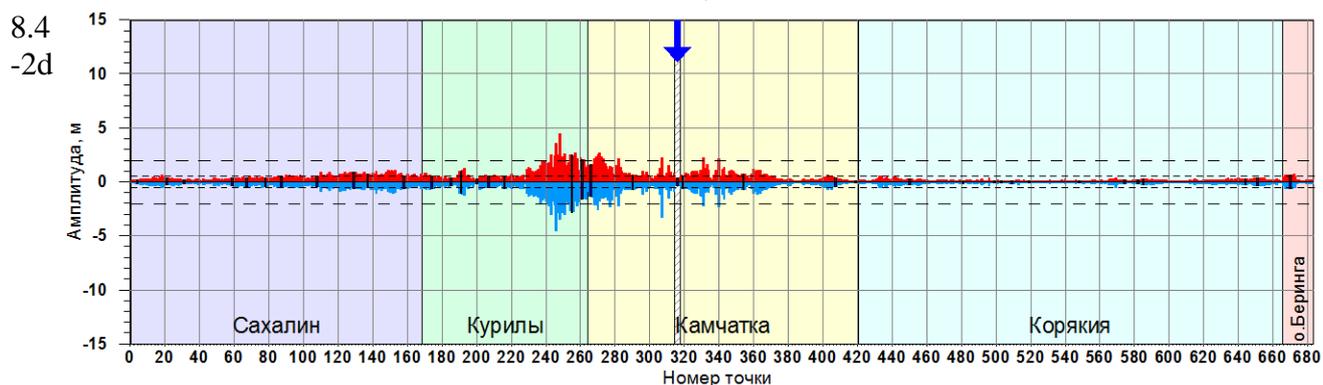
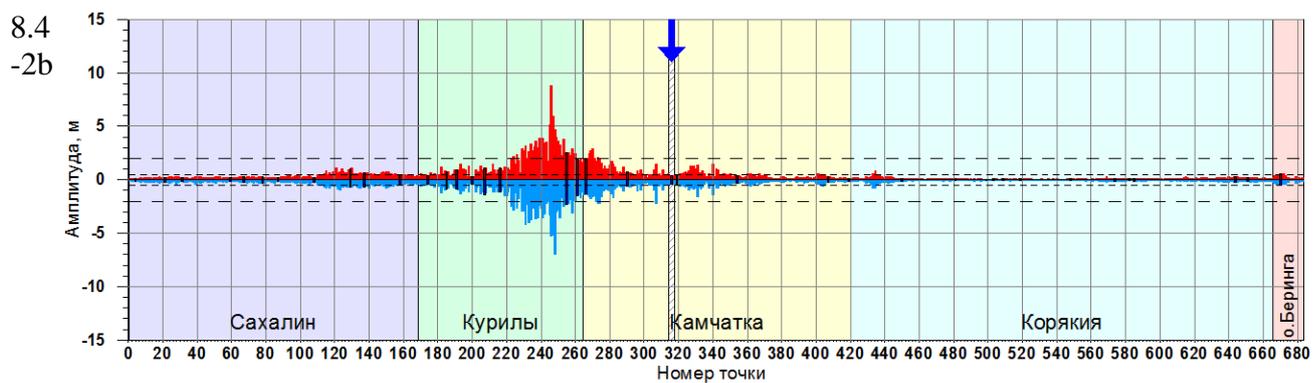
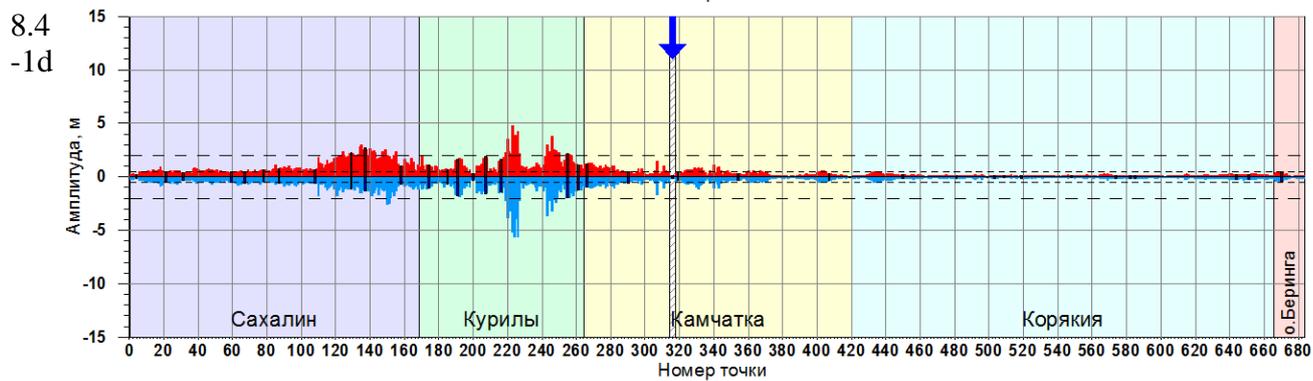
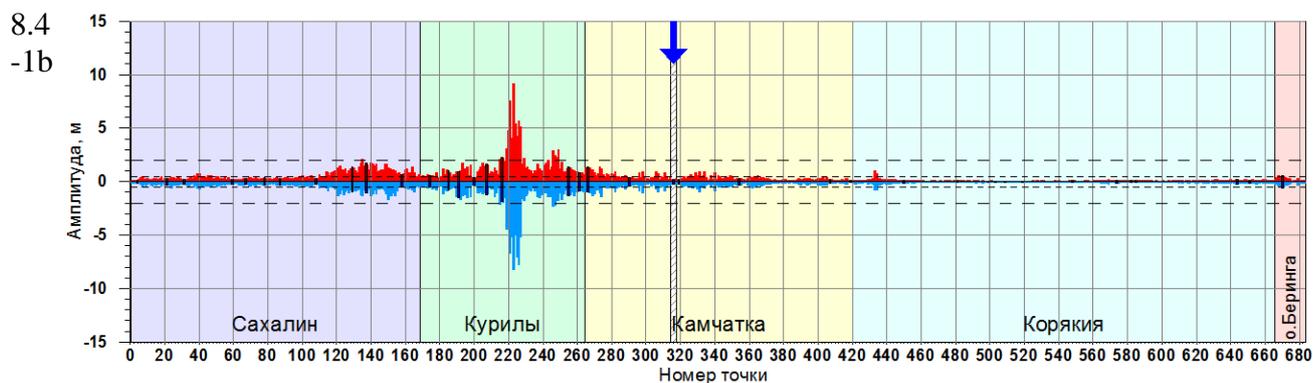
Рис. 48. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очагов цунамигенного землетрясений ближней зоны 84-6b (a), 84-6d (b), 84-7d (c) с магнитудой  $M_w = 8.4$  на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Черным цветом выделены столбцы, соответствующие защищаемым пунктам (нумерация согласно Табл. 7.), стрелкой отмечены результаты, полученные для пункта «Петропавловск-Камчатский».

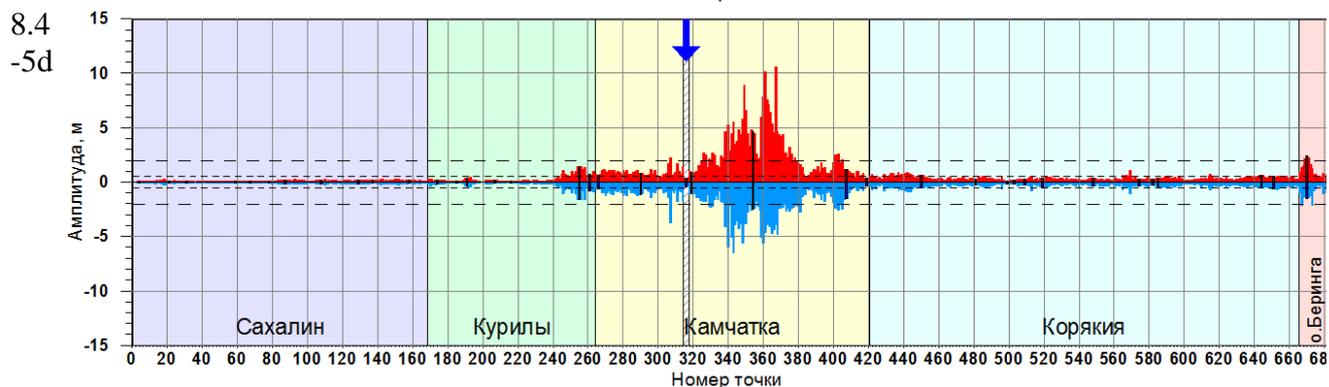
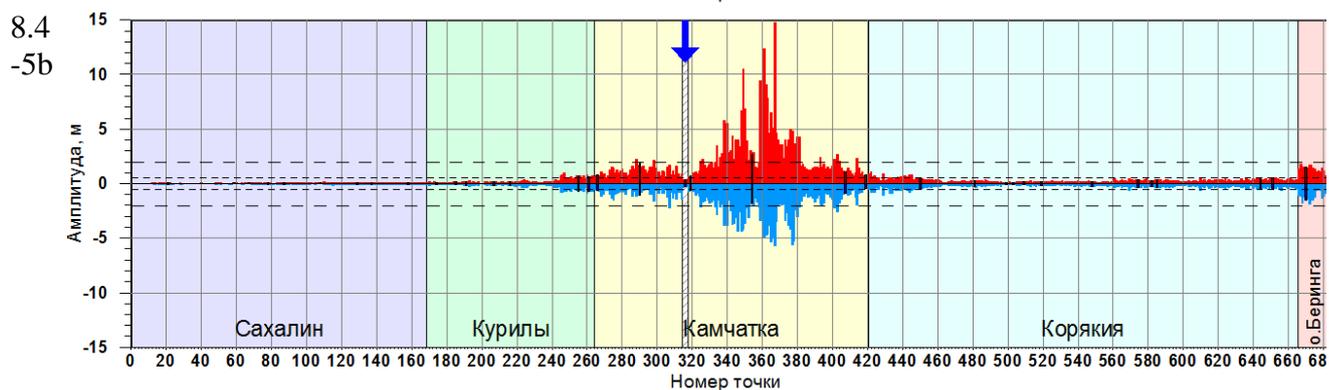
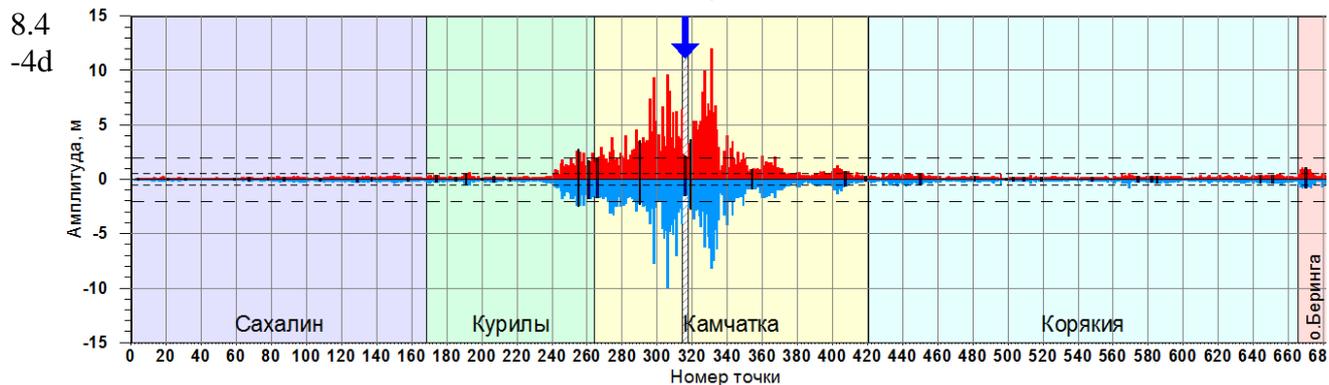
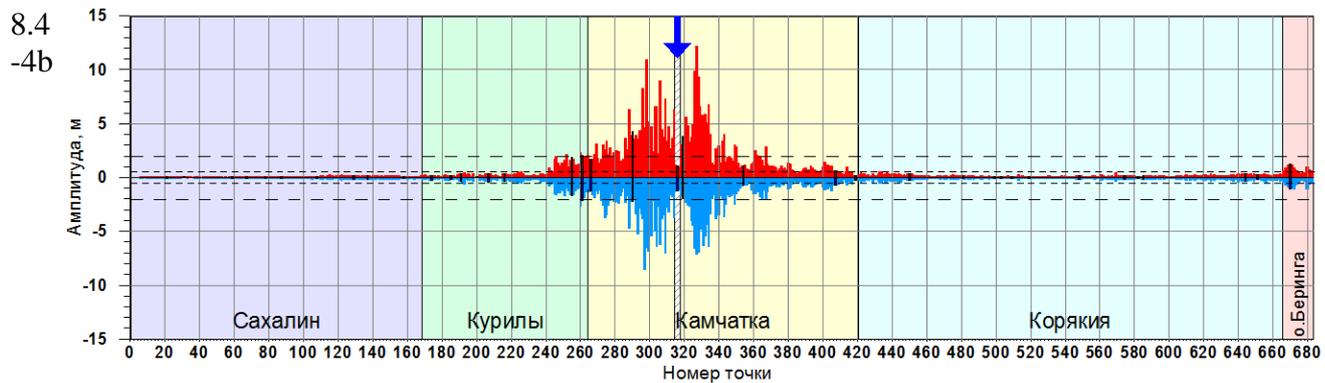
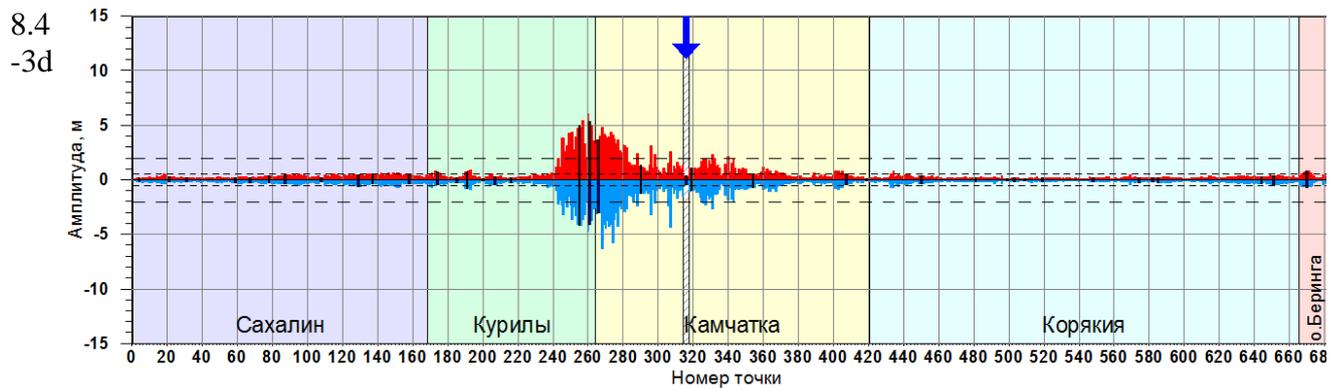
## 12. Приложение 1.

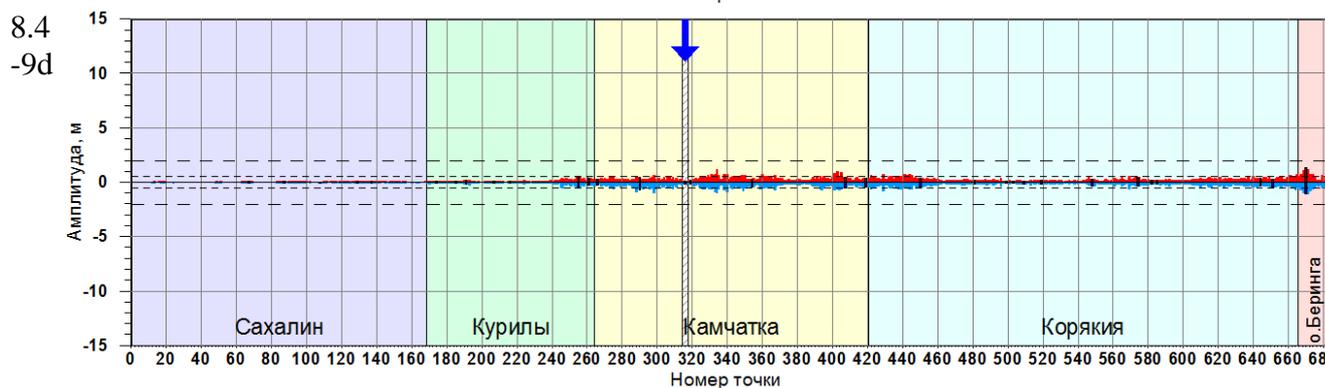
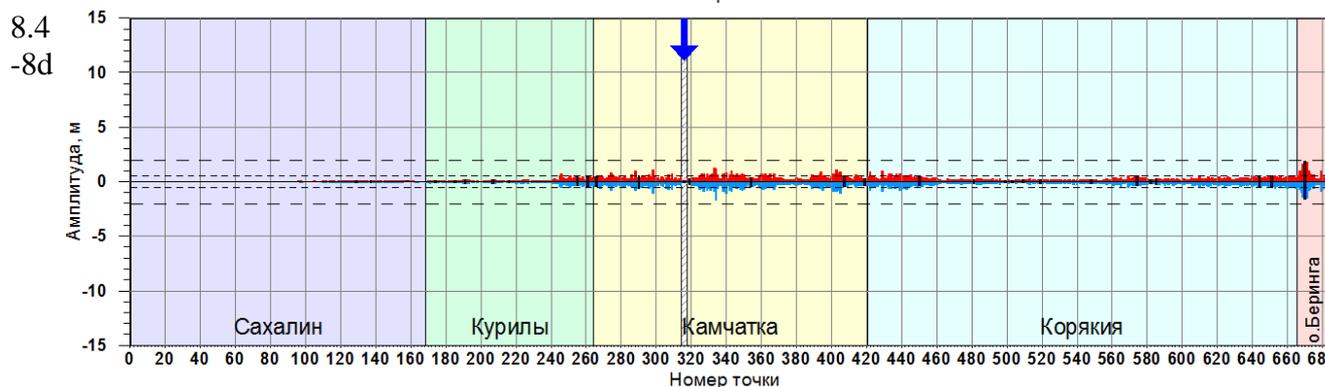
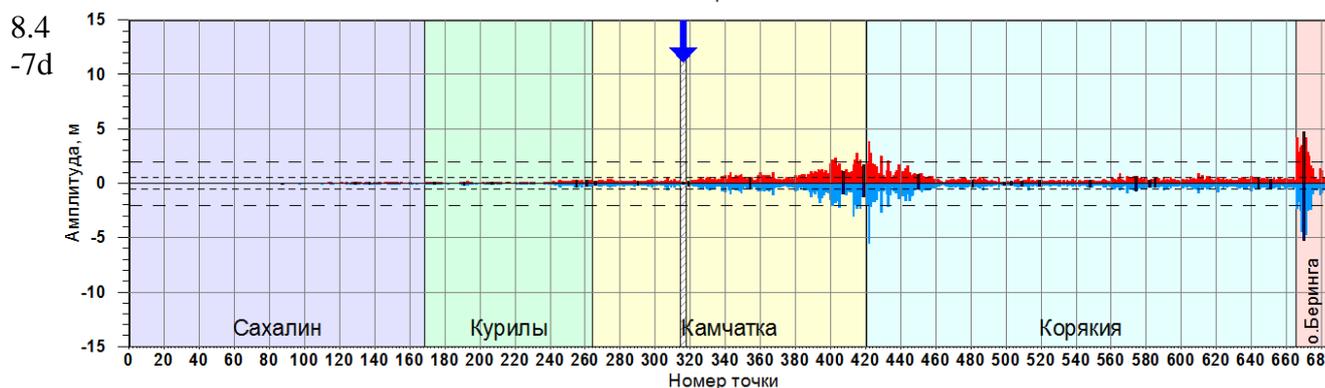
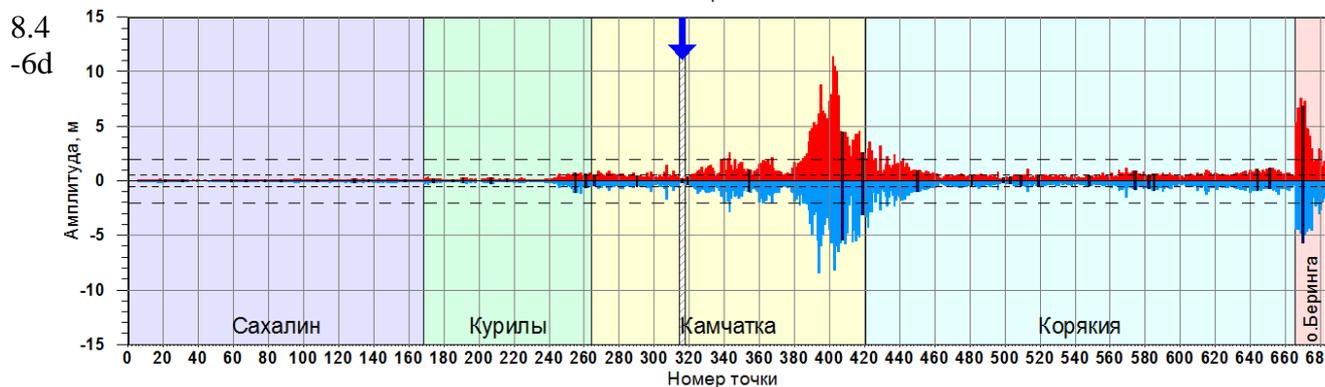
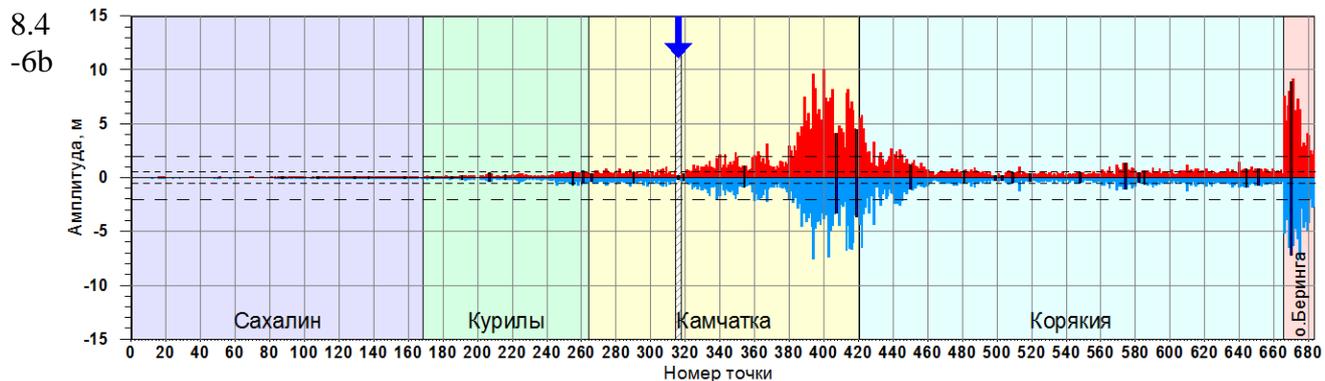
**Гистограммы распределения экстремальных значений высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ по материалам уточненных расчетов в глобальной области на сетке с пространственным разрешением 15 географических секунд**

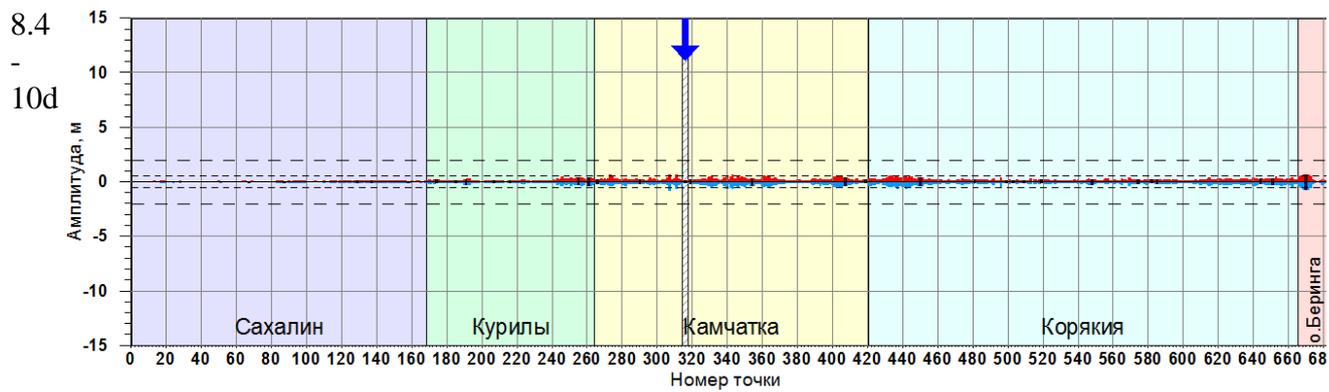


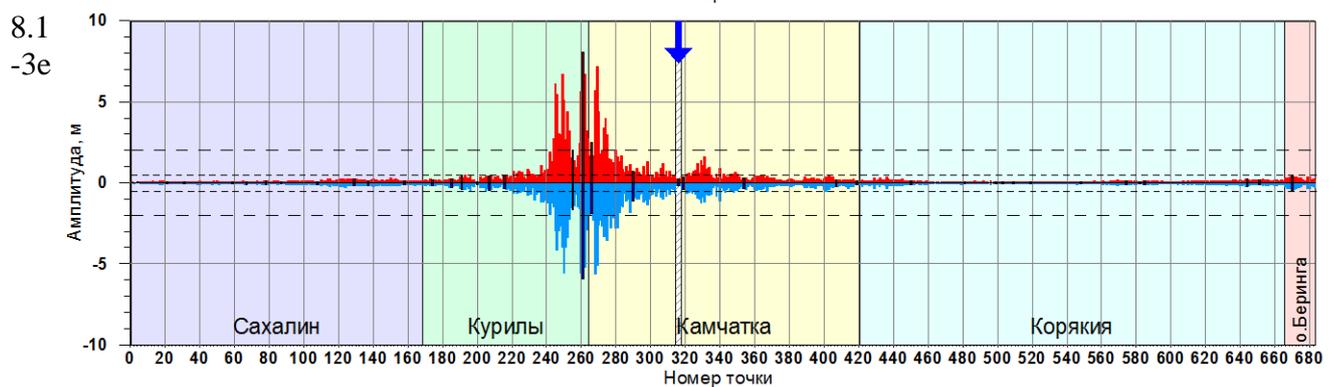
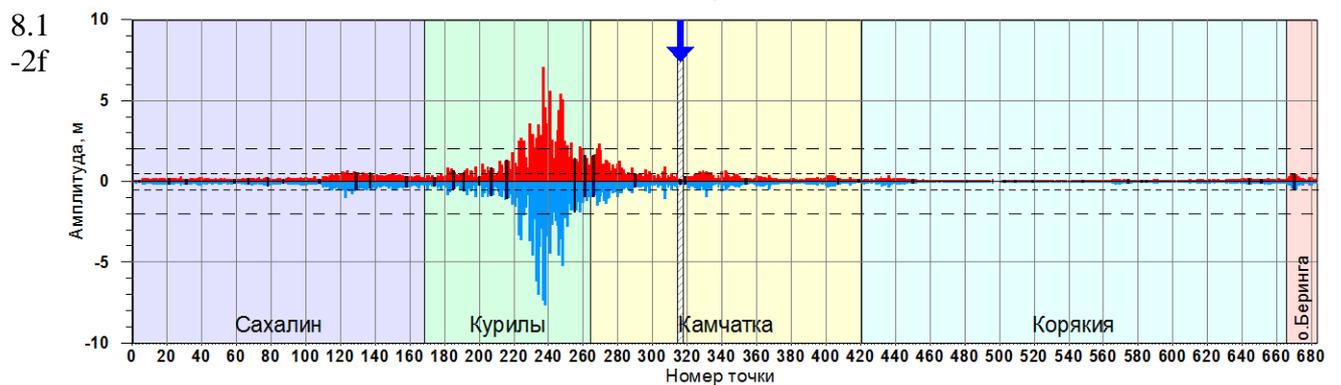
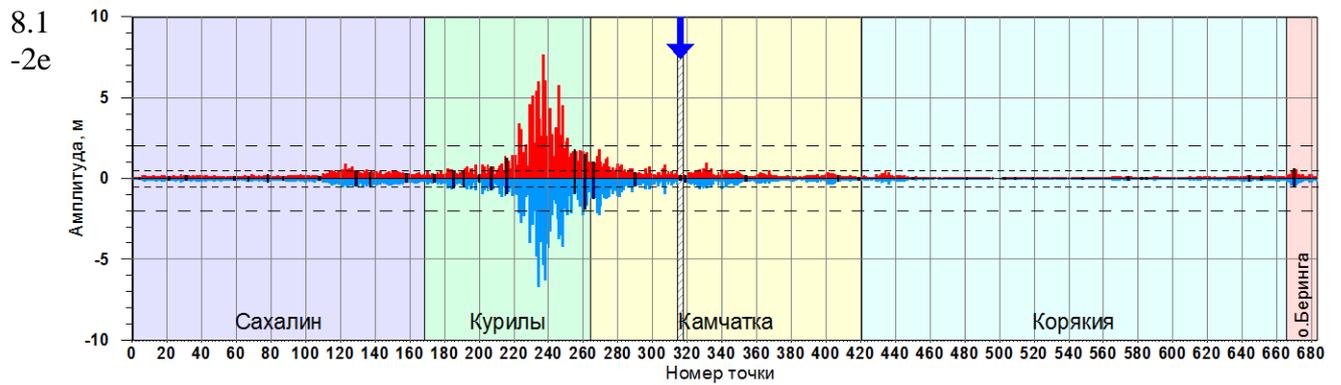
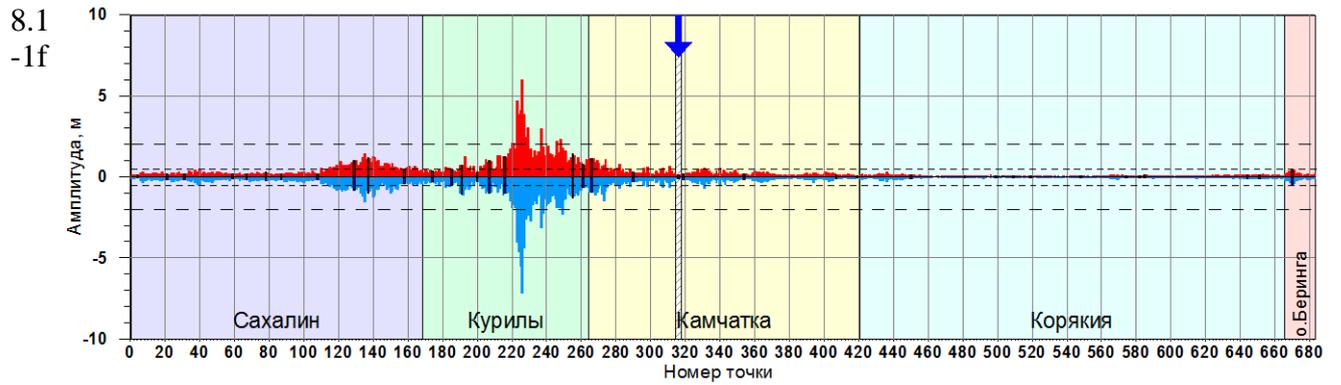
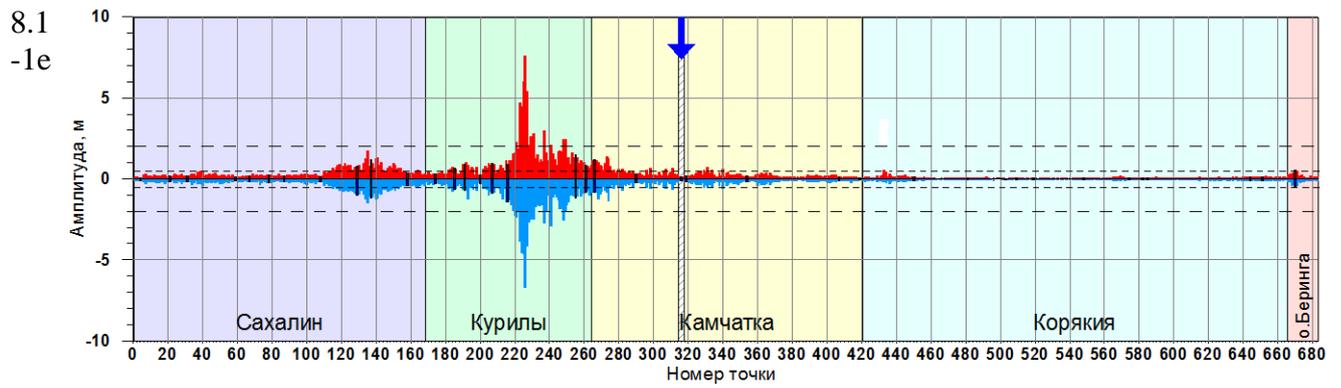


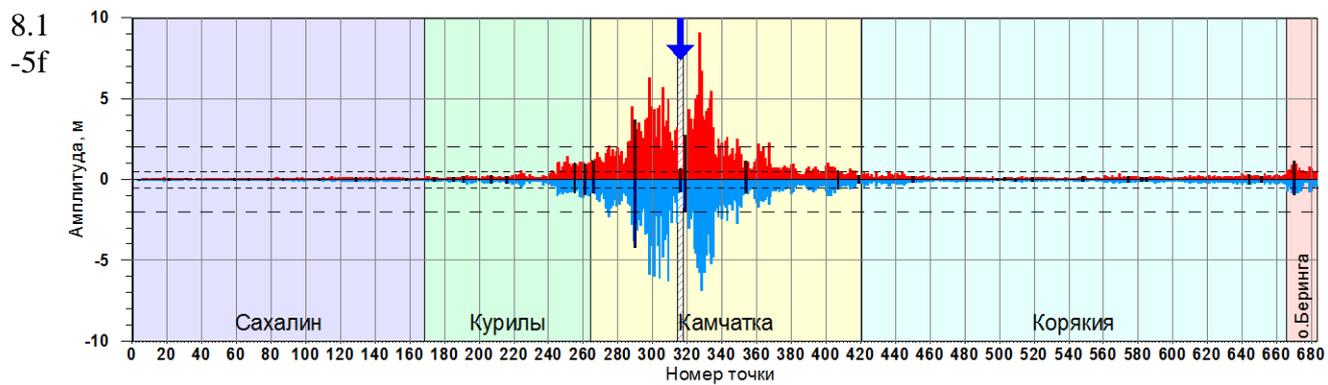
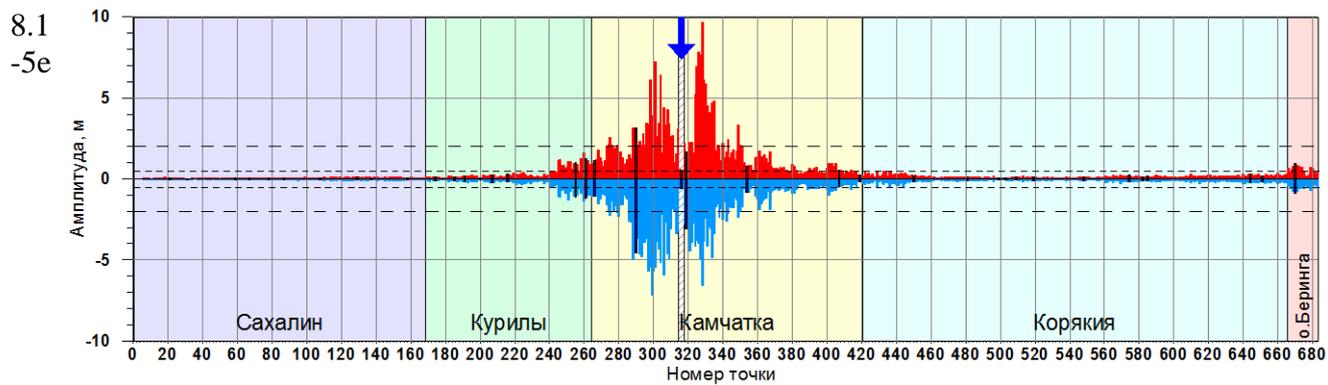
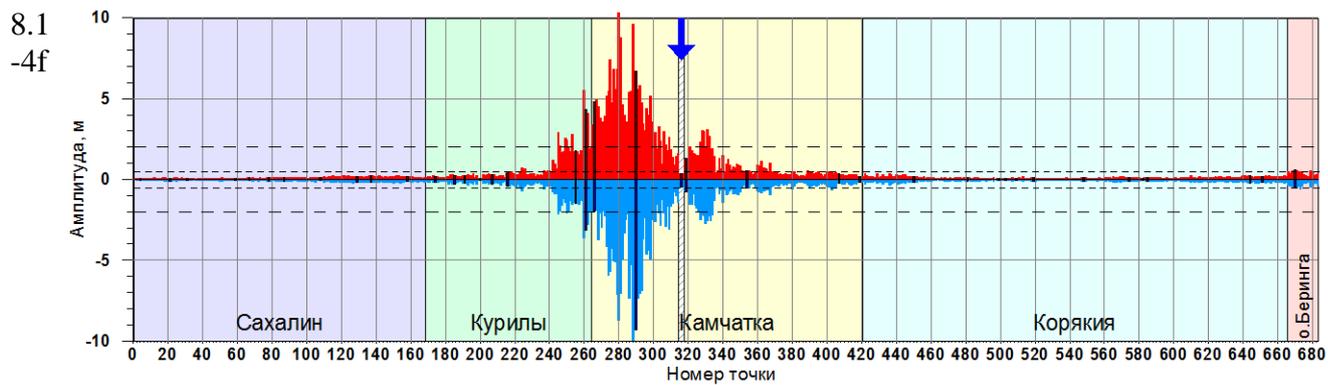
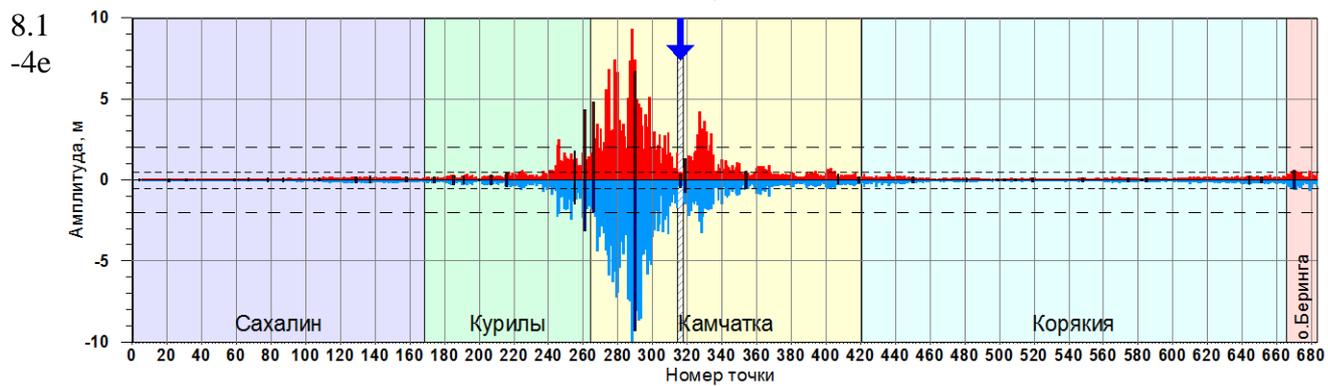
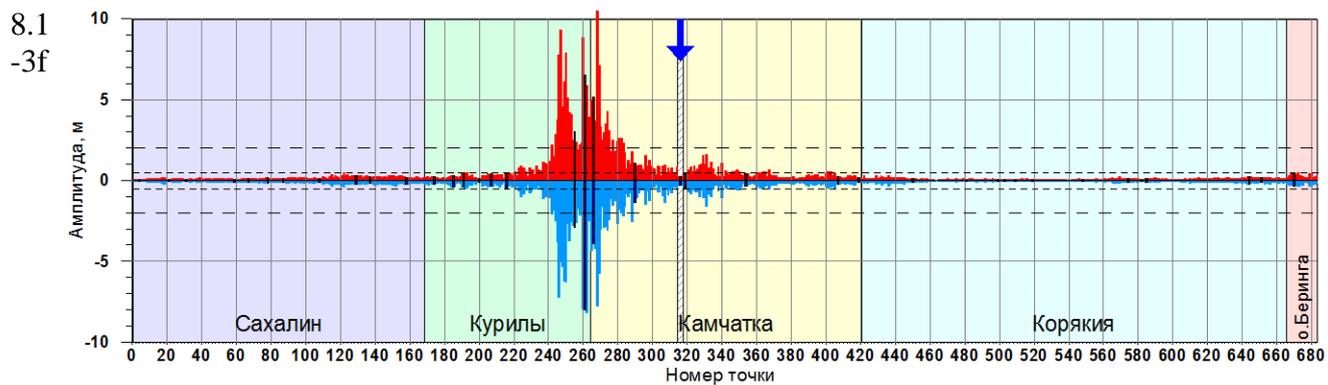


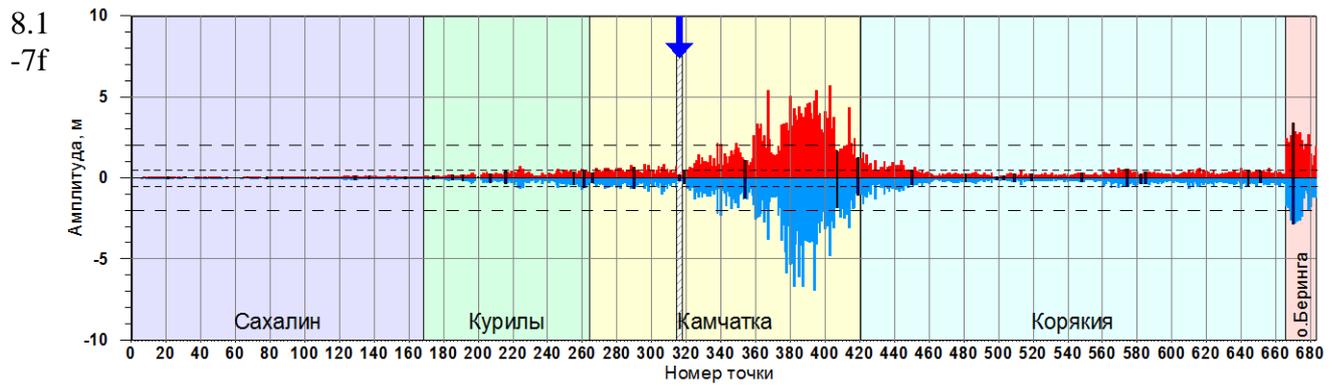
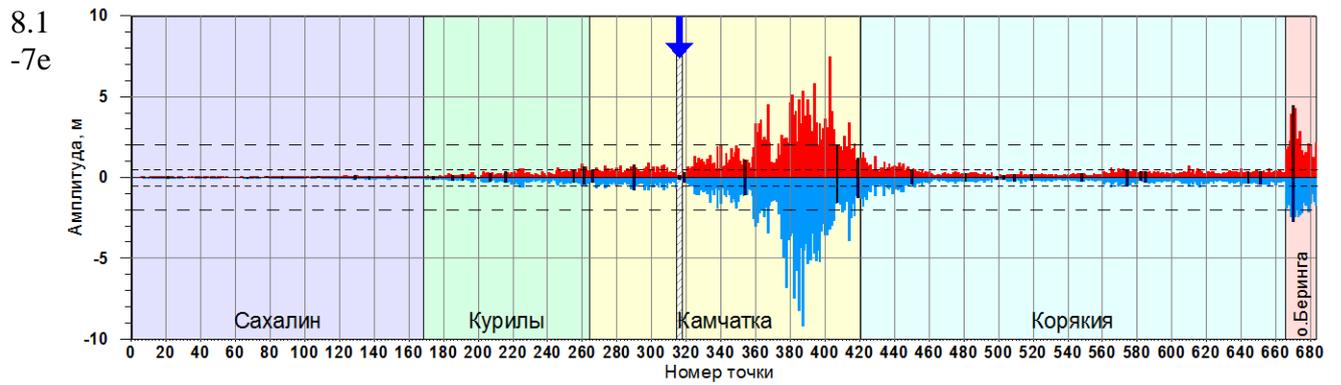
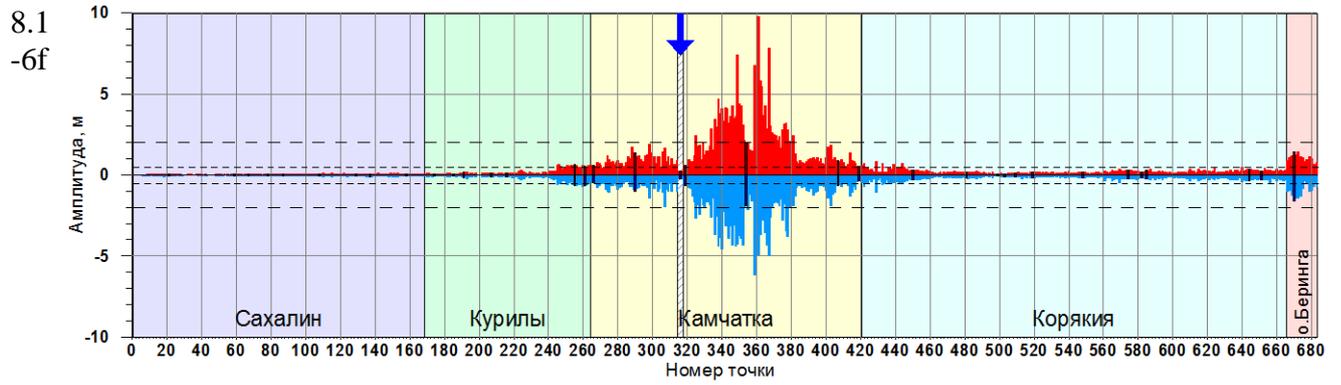
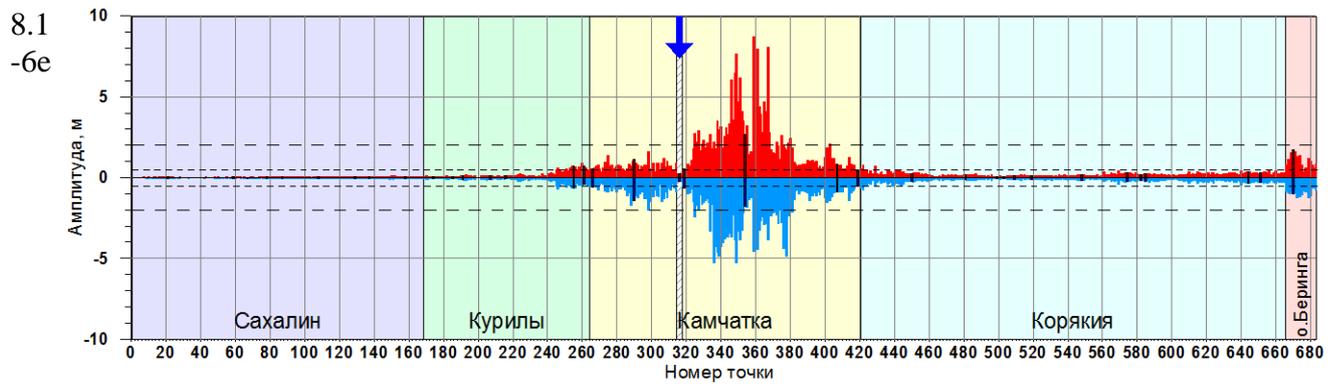


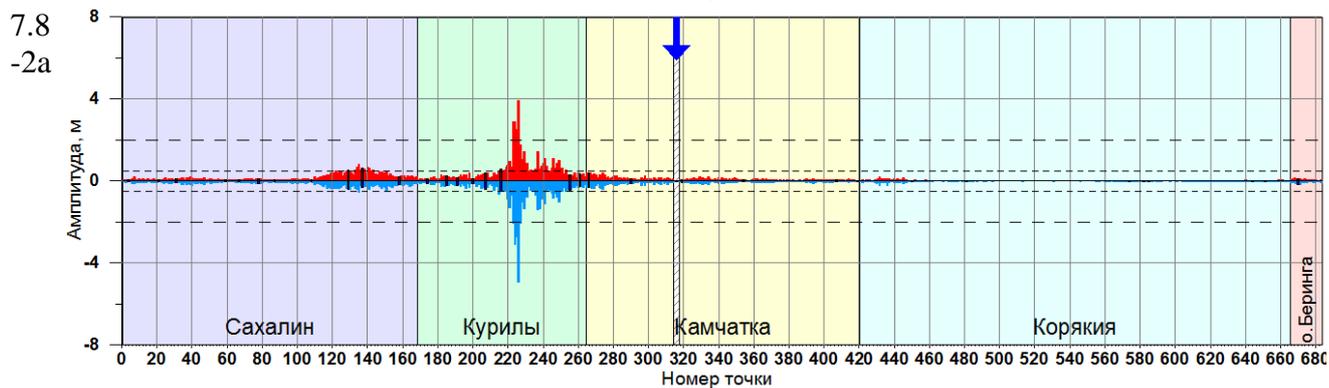
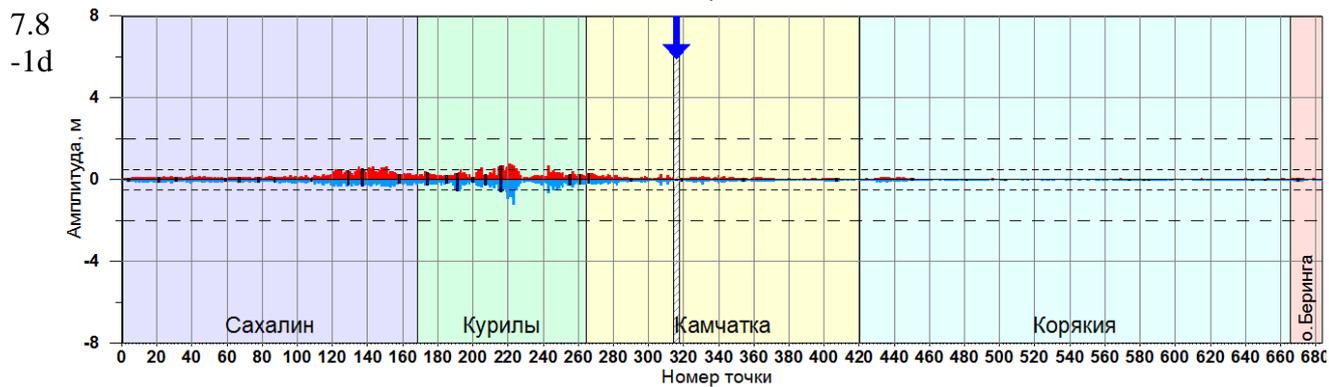
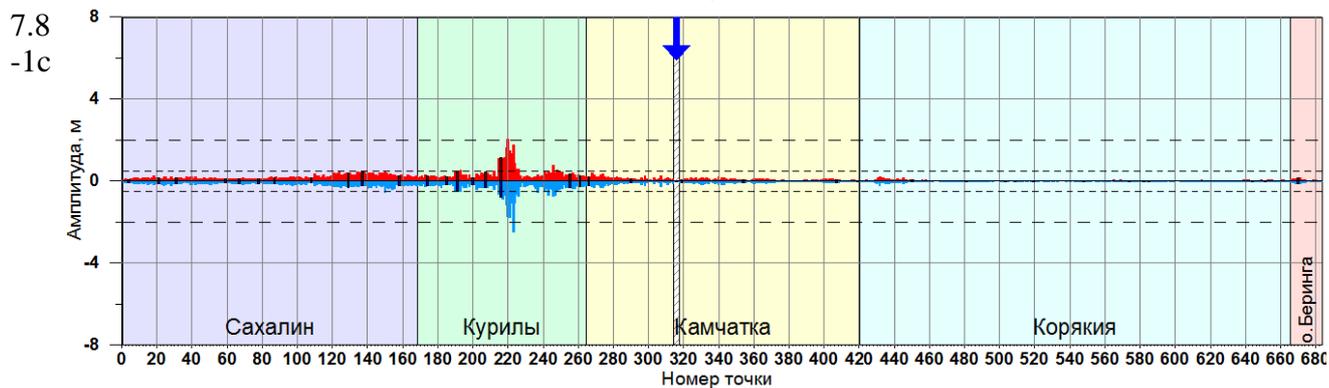
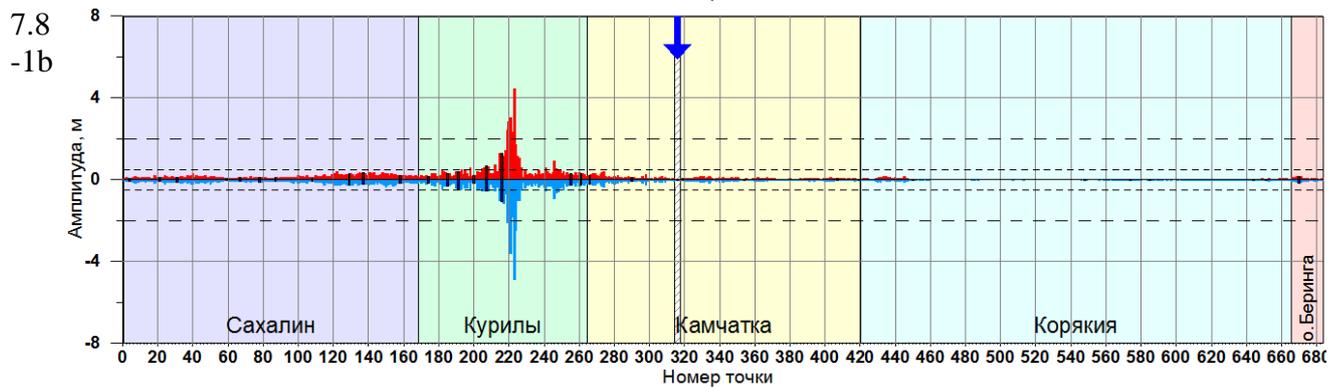
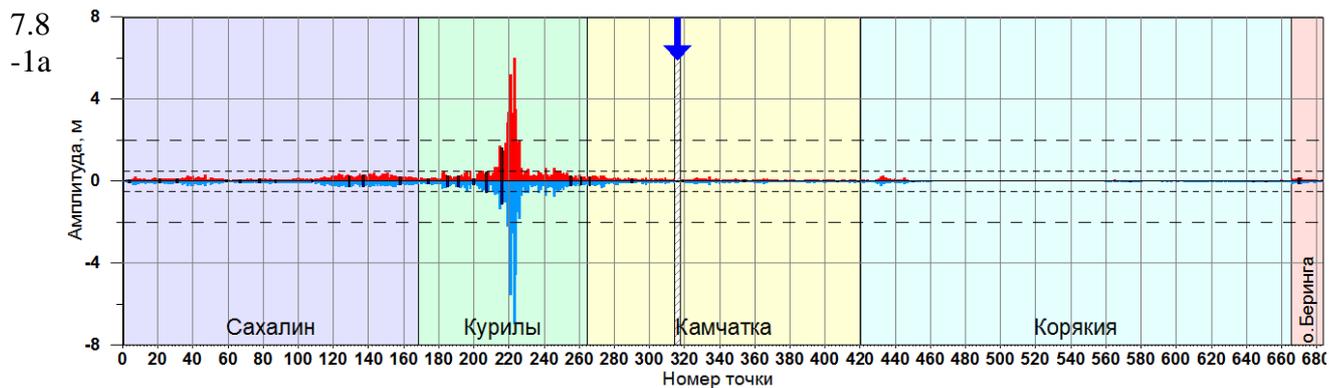


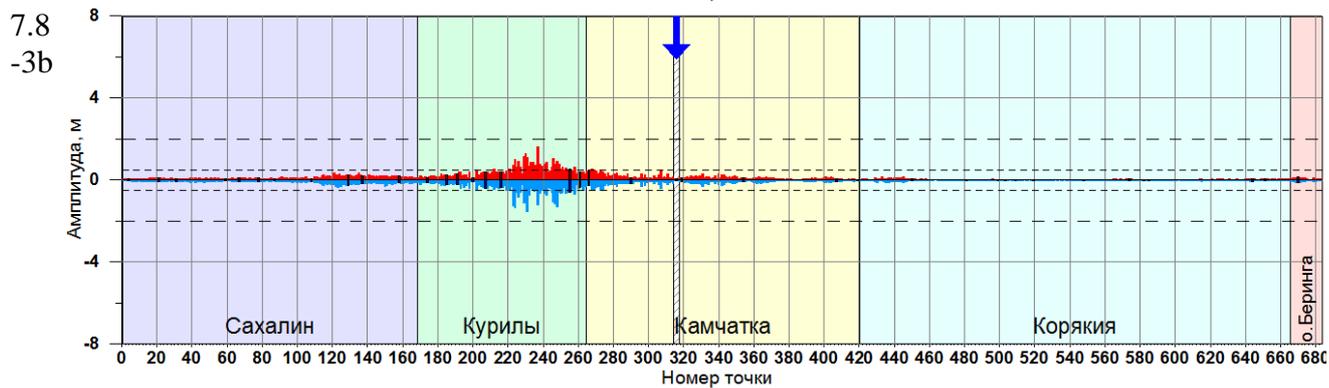
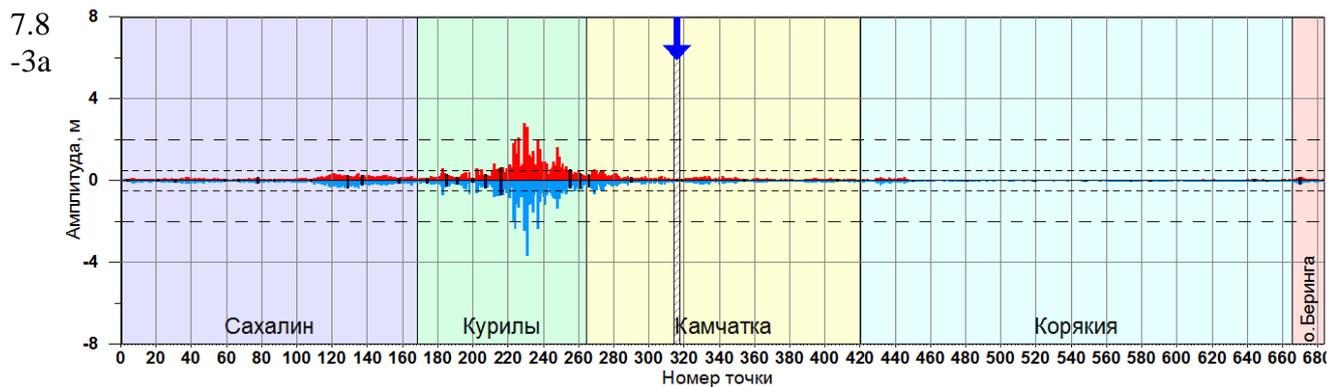
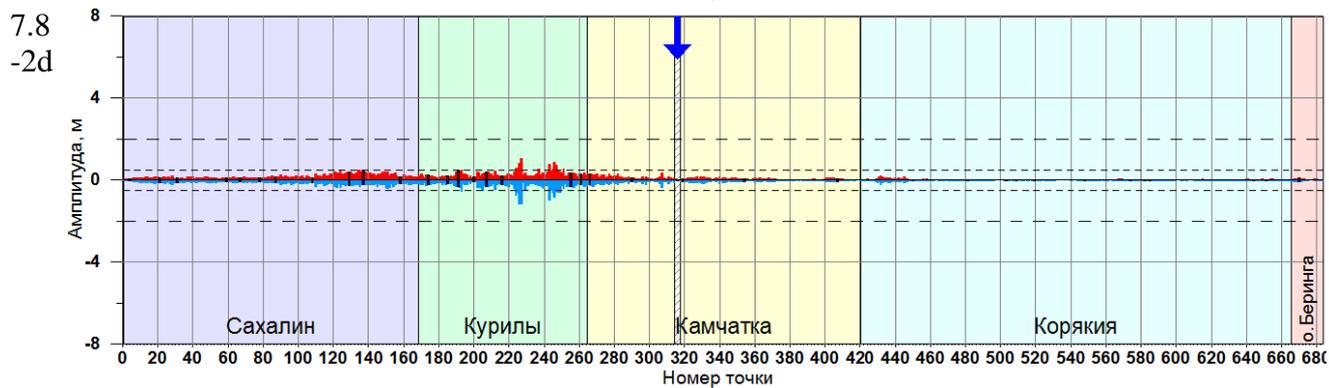
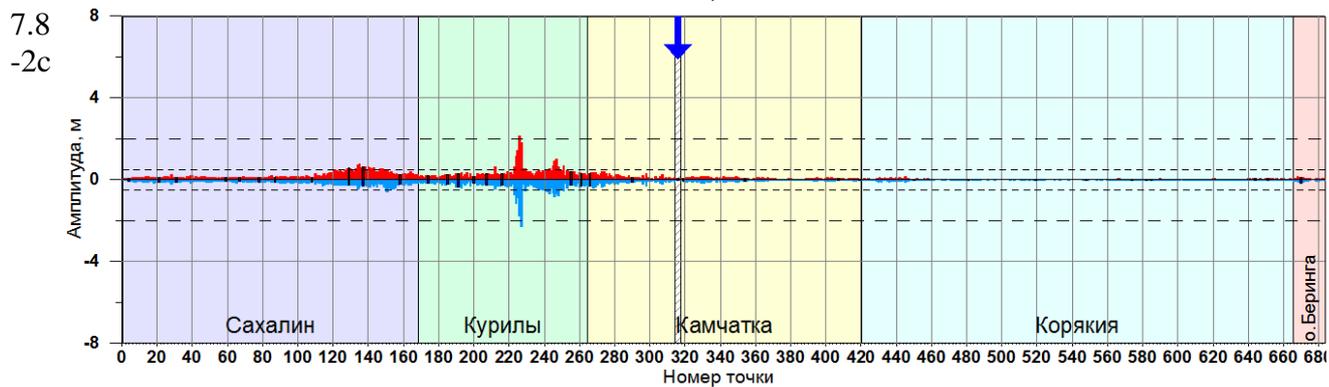
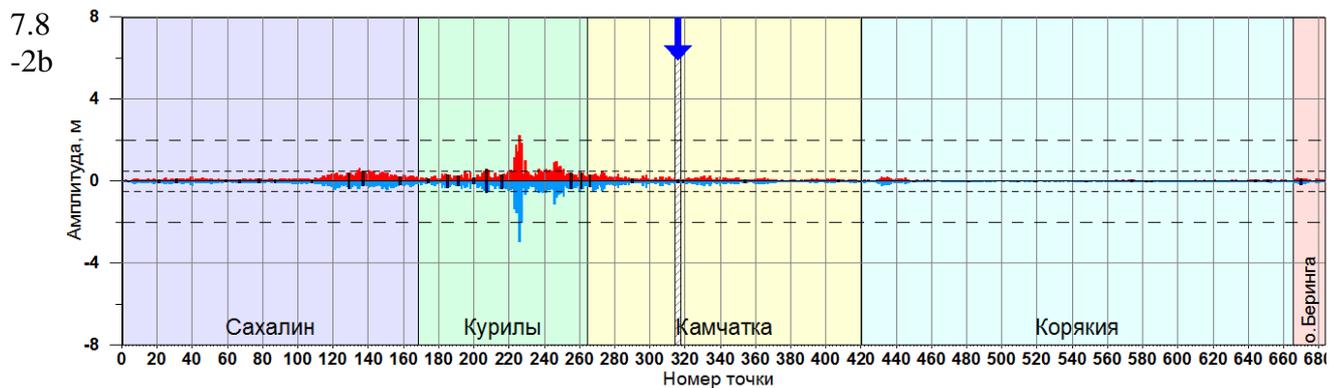


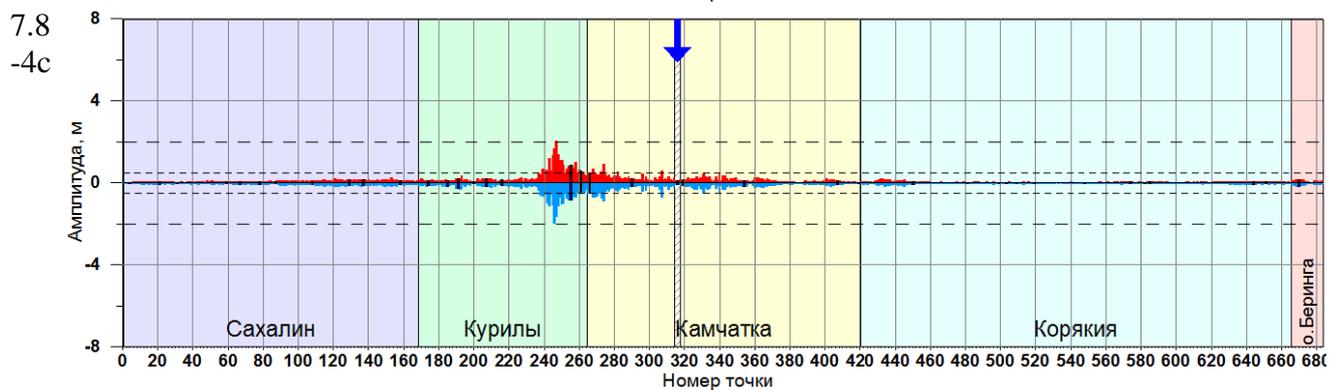
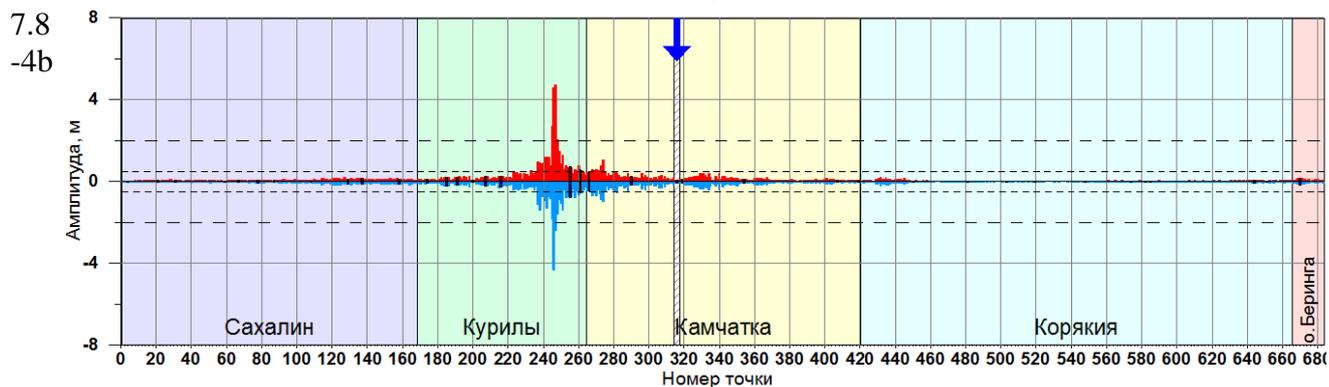
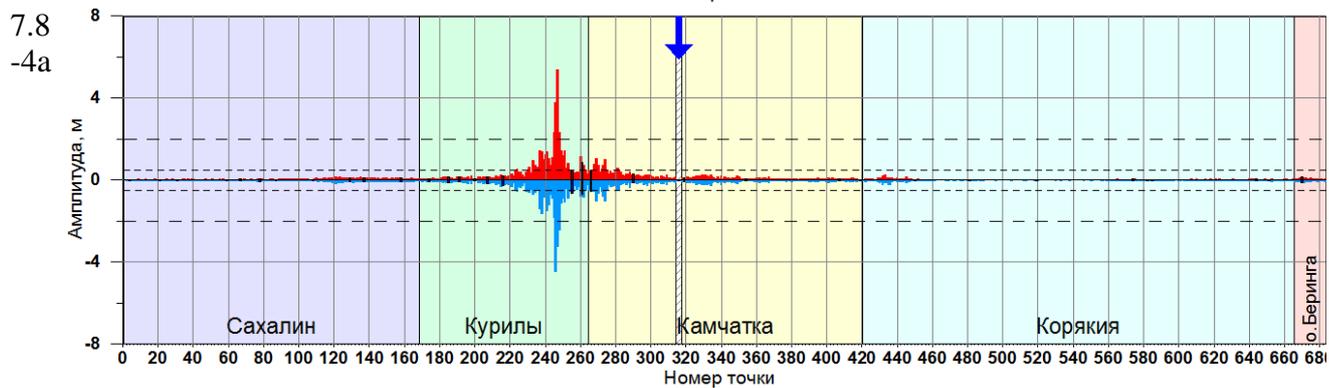
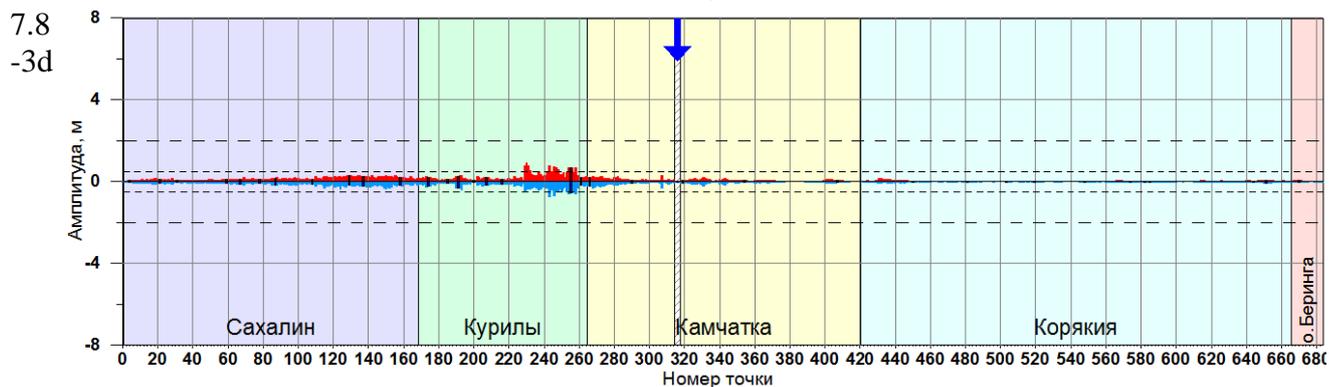
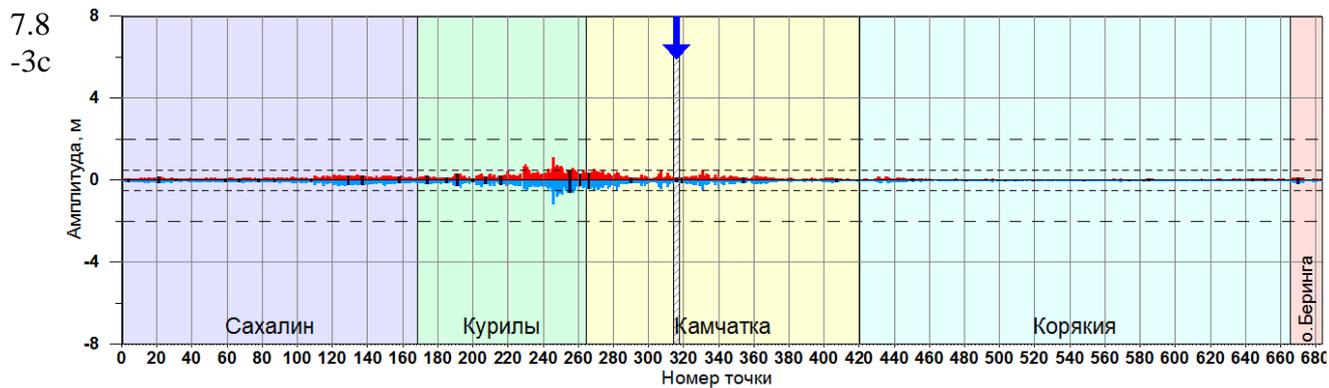


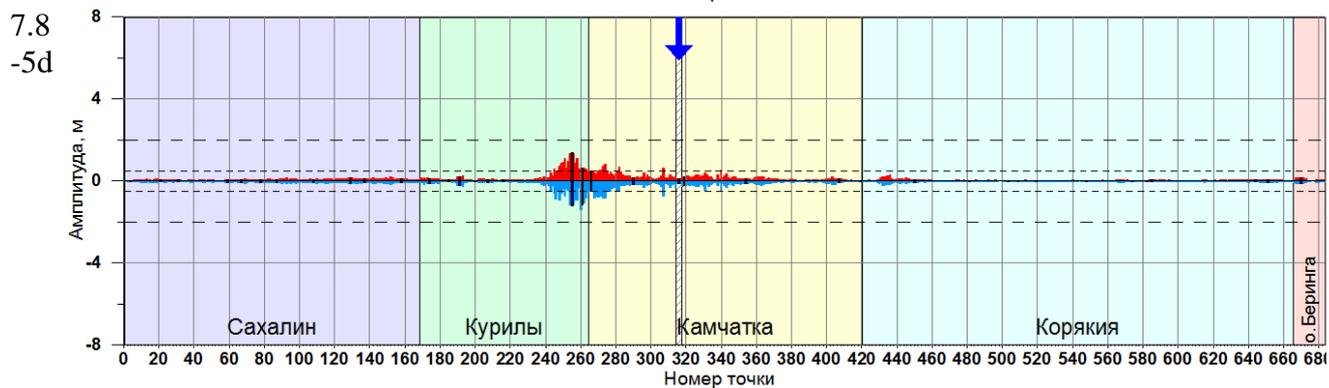
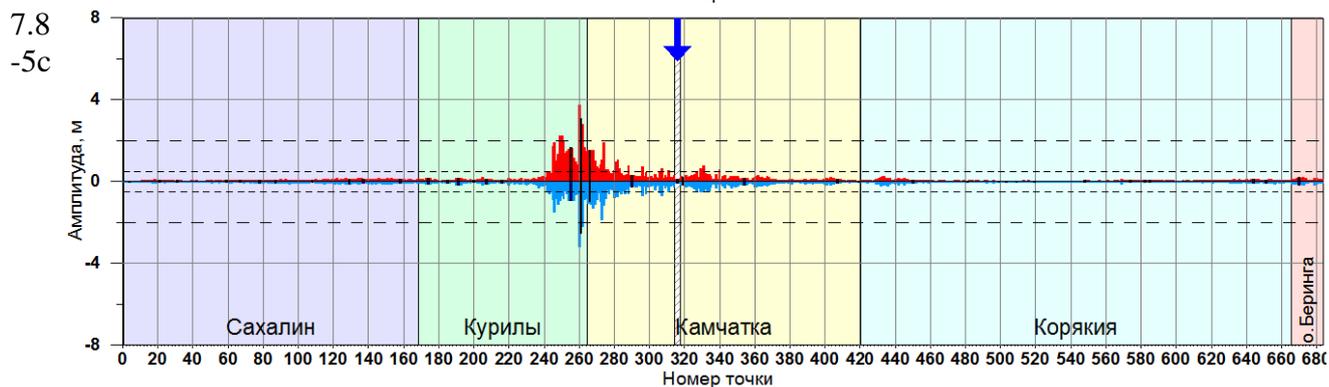
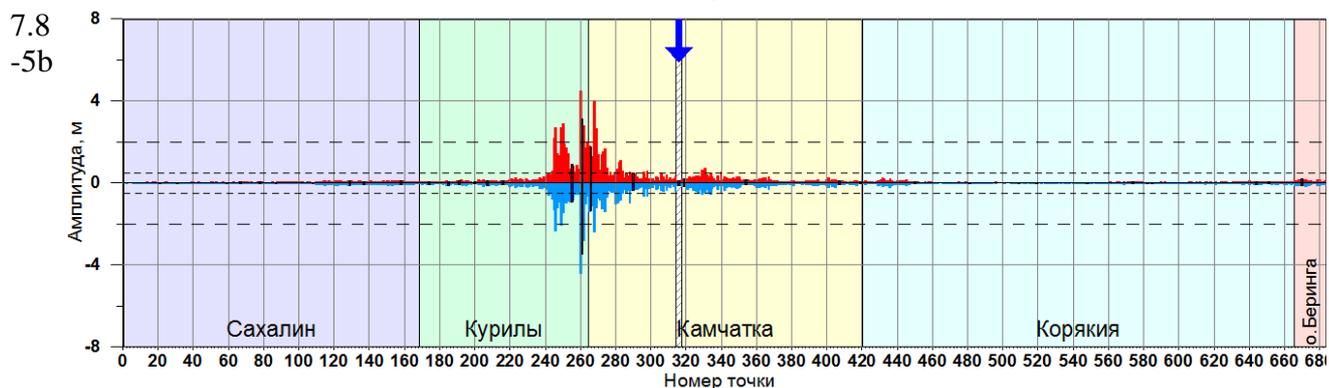
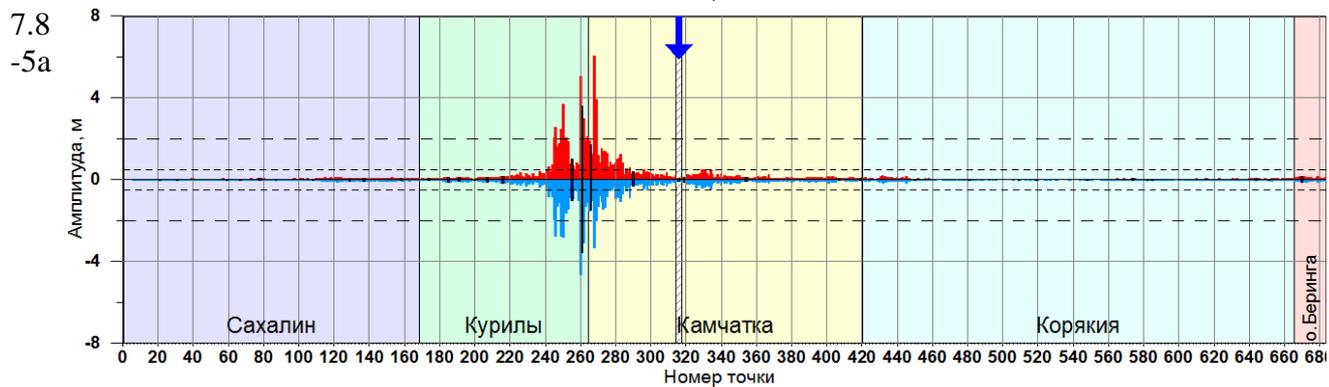
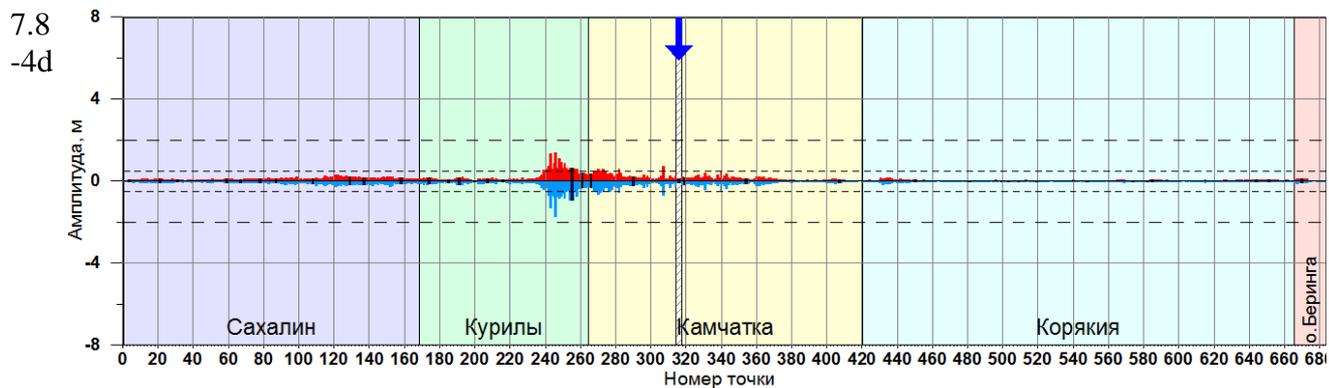


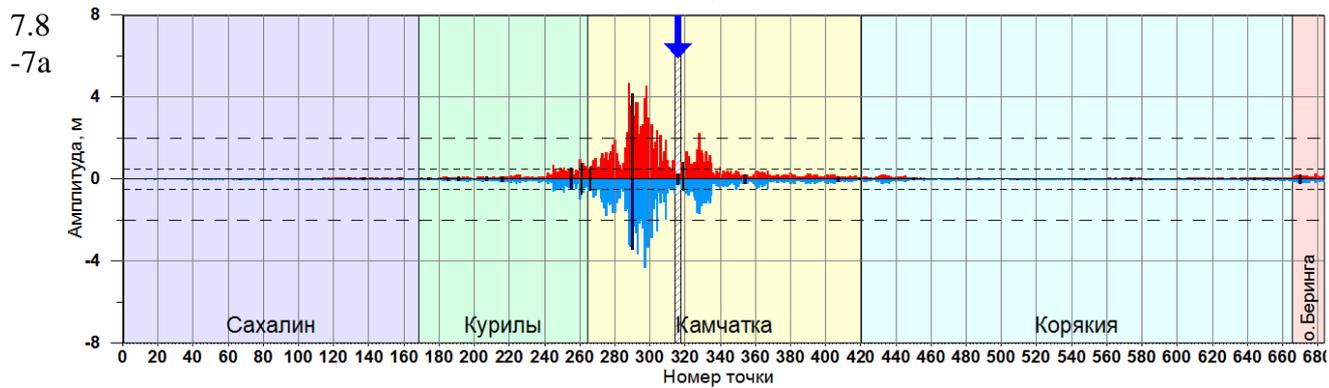
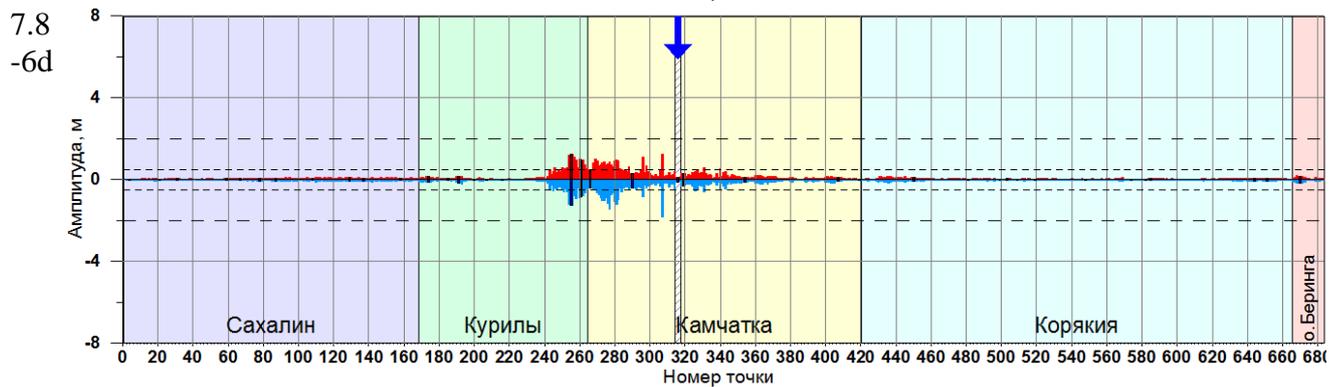
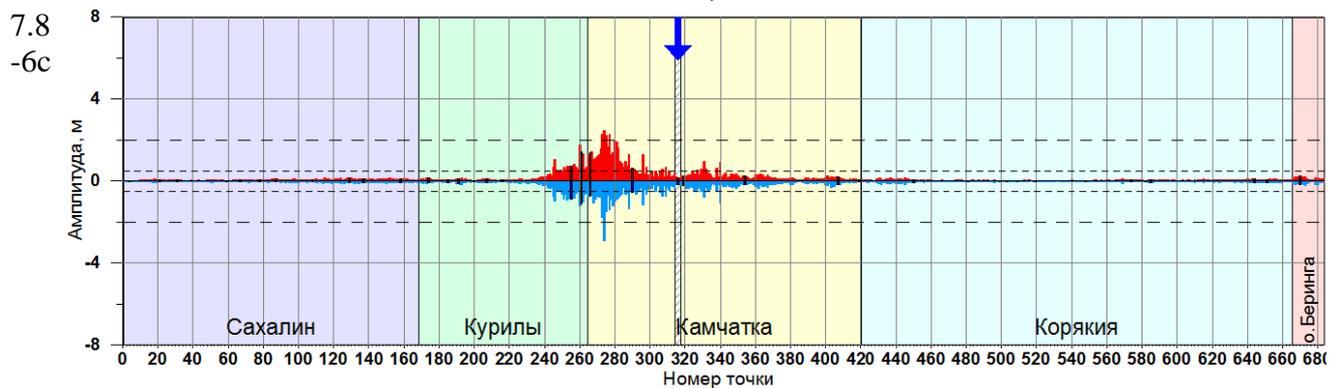
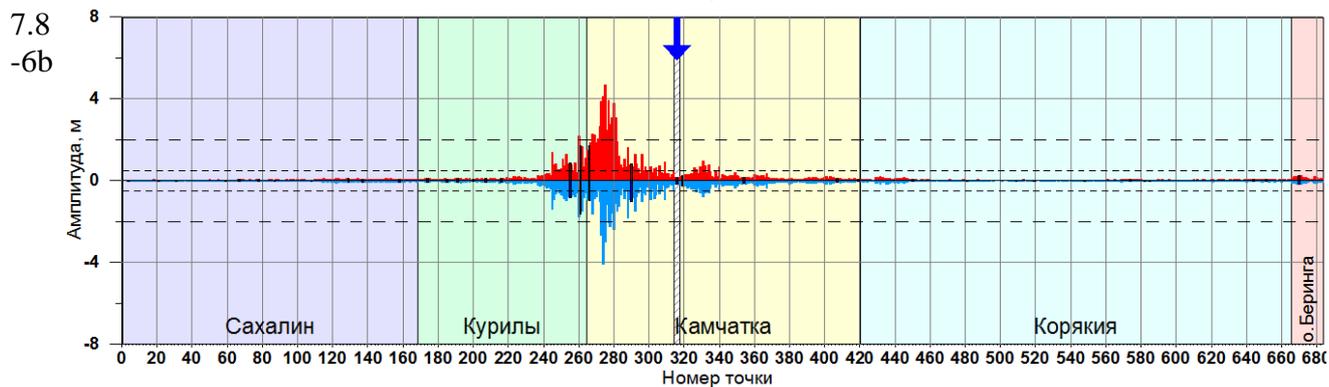
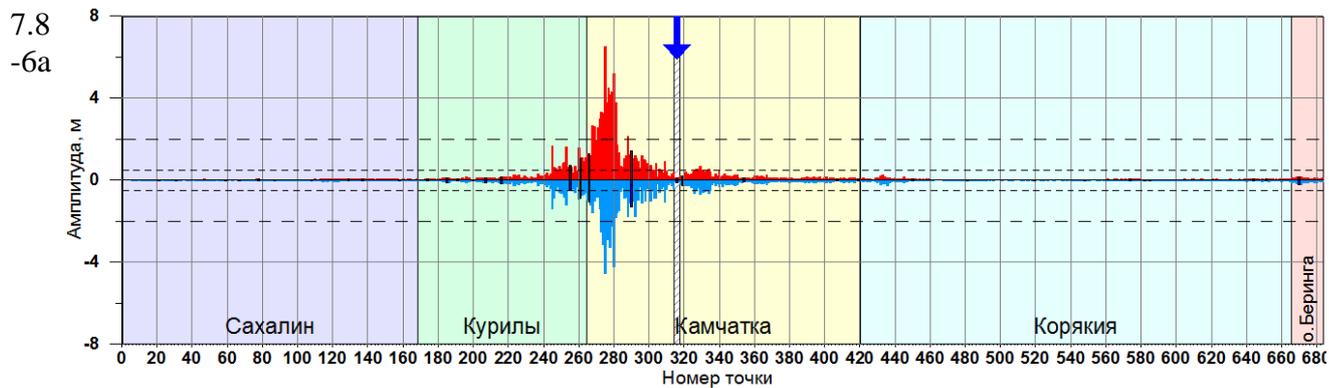


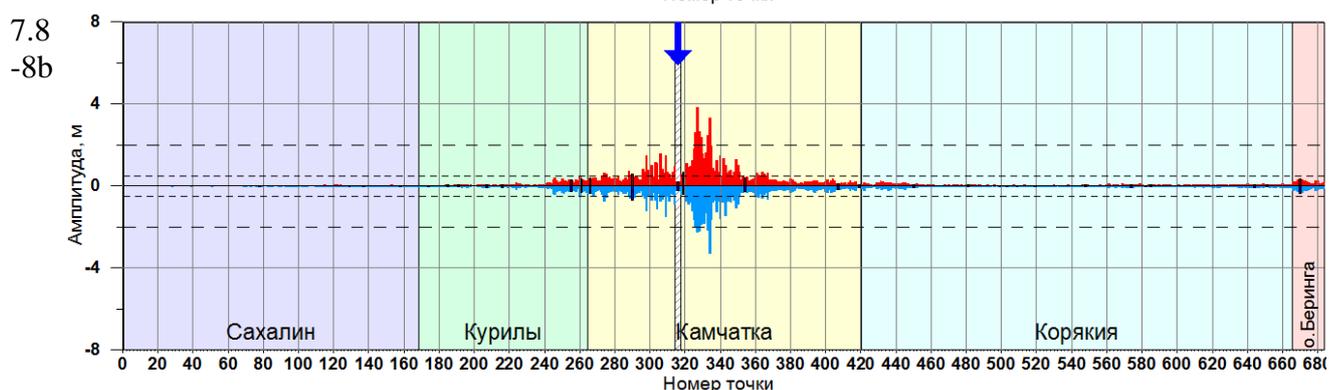
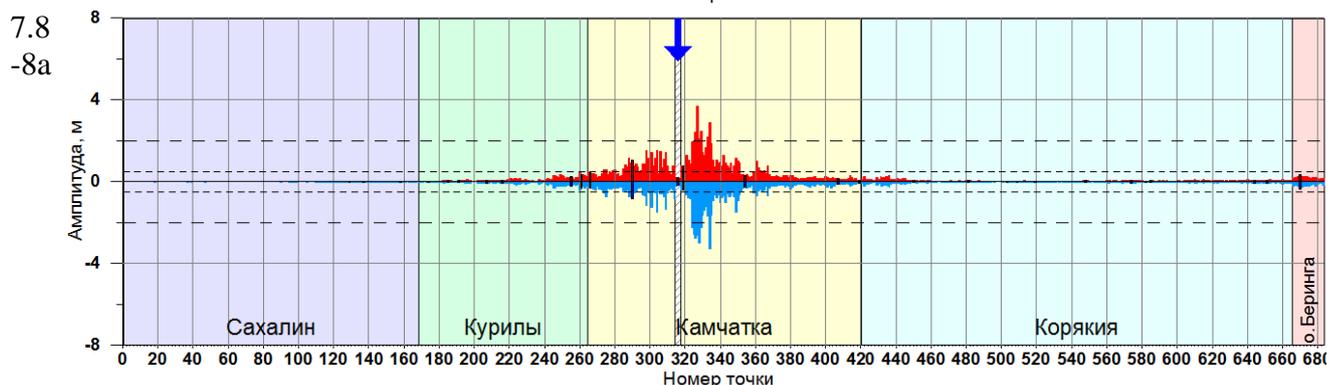
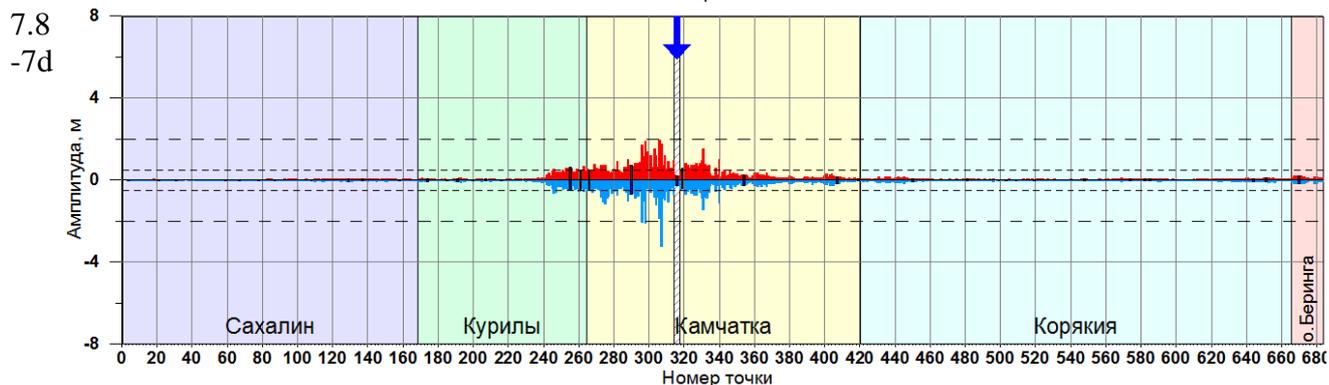
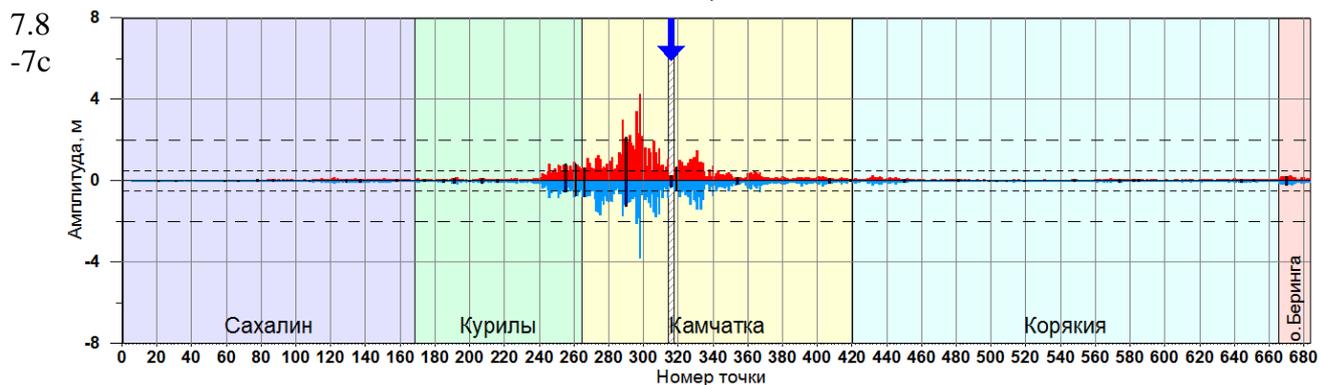
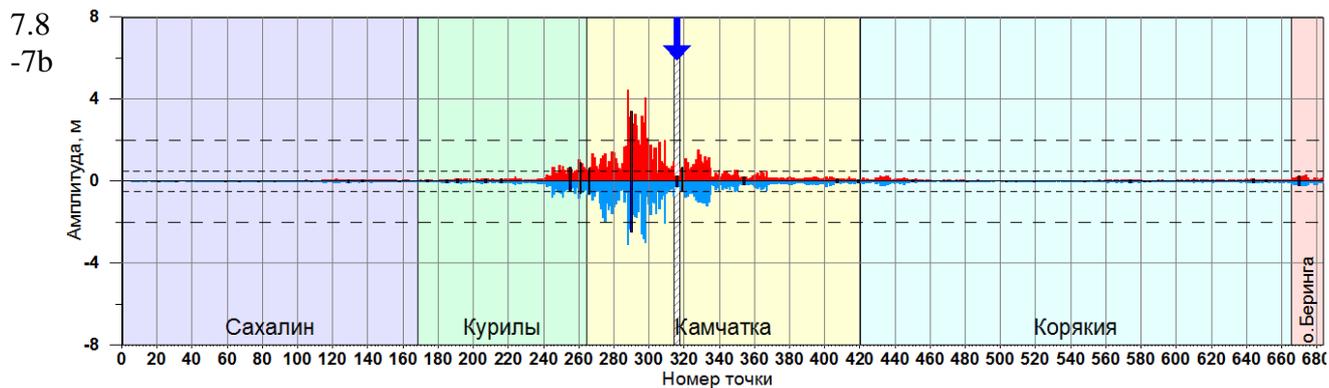


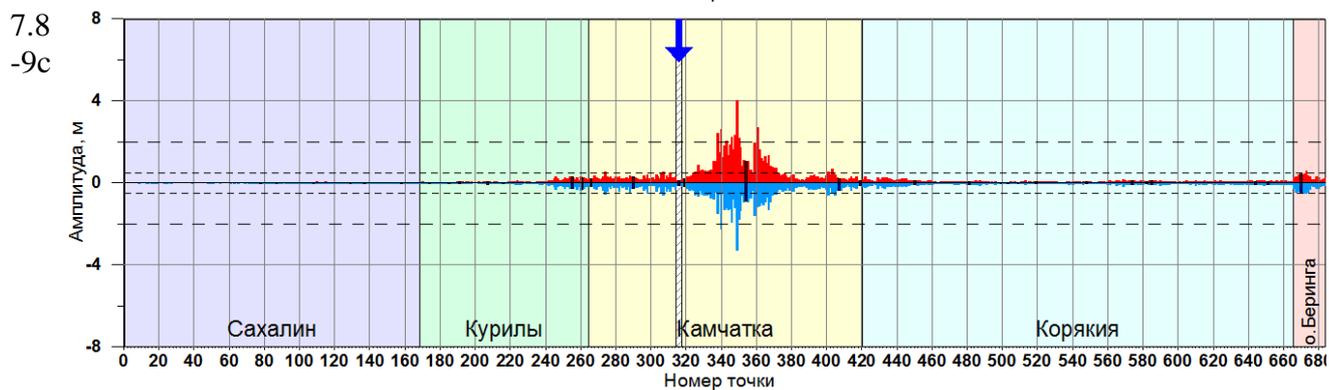
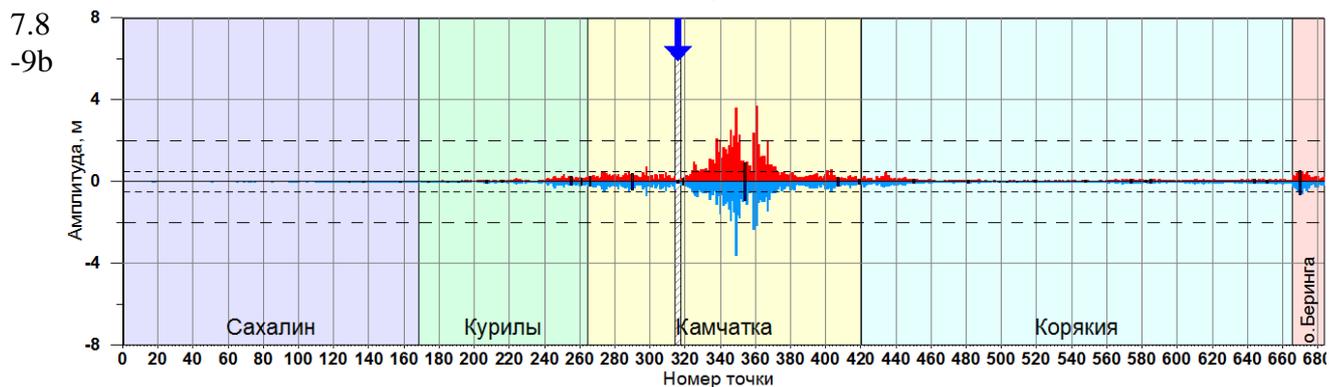
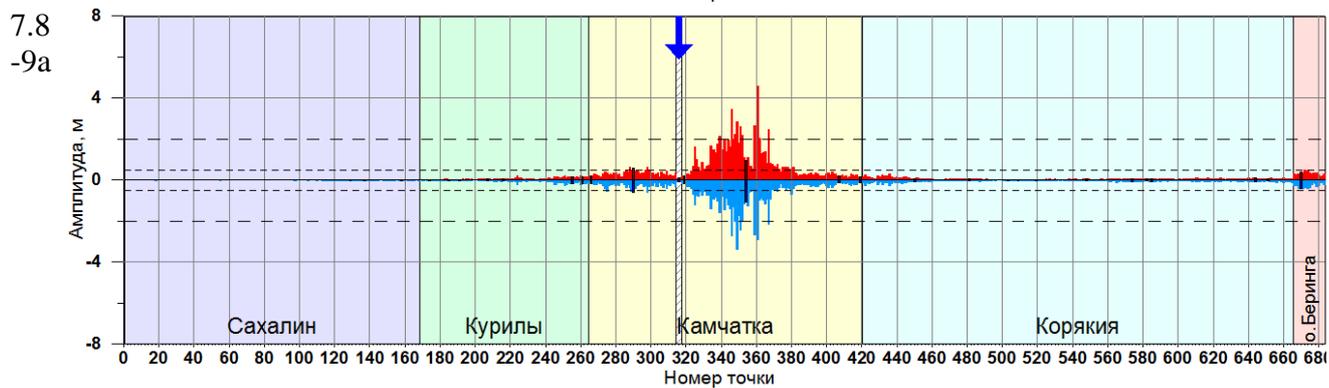
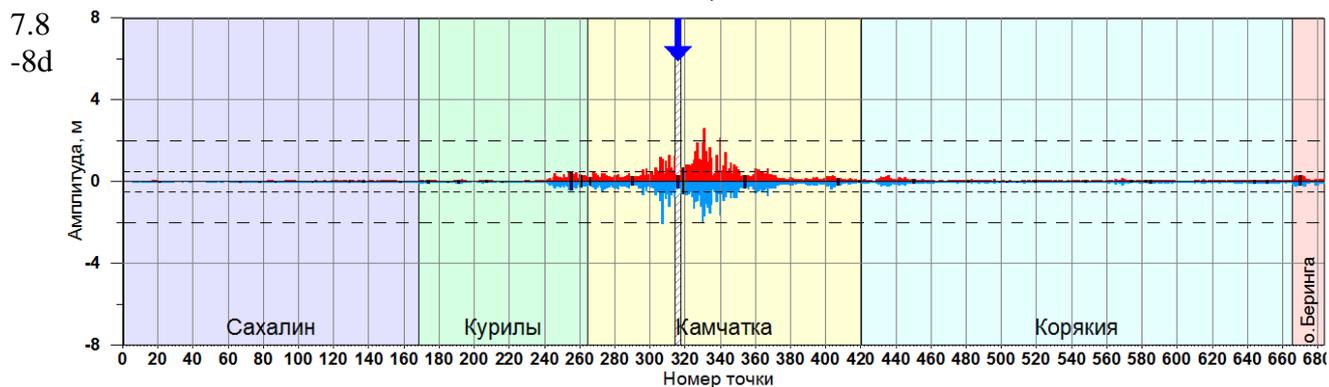
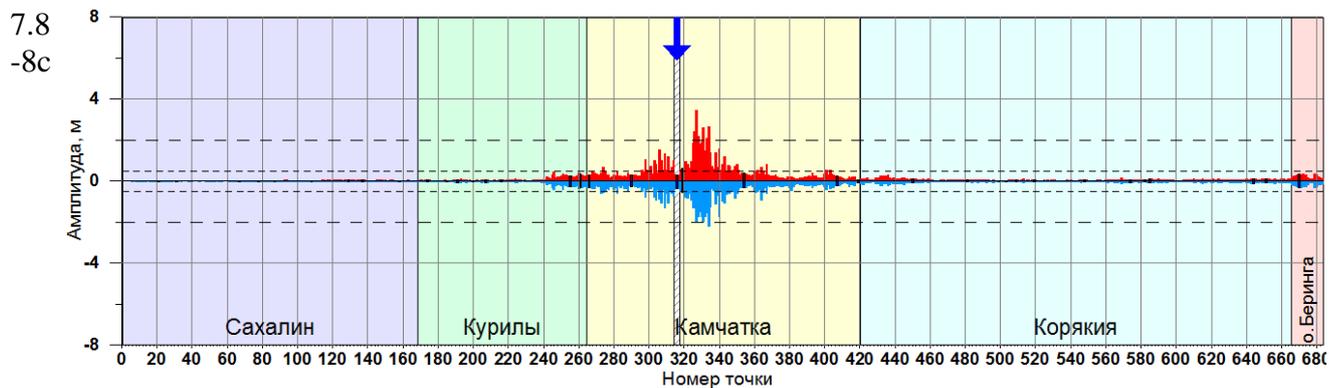


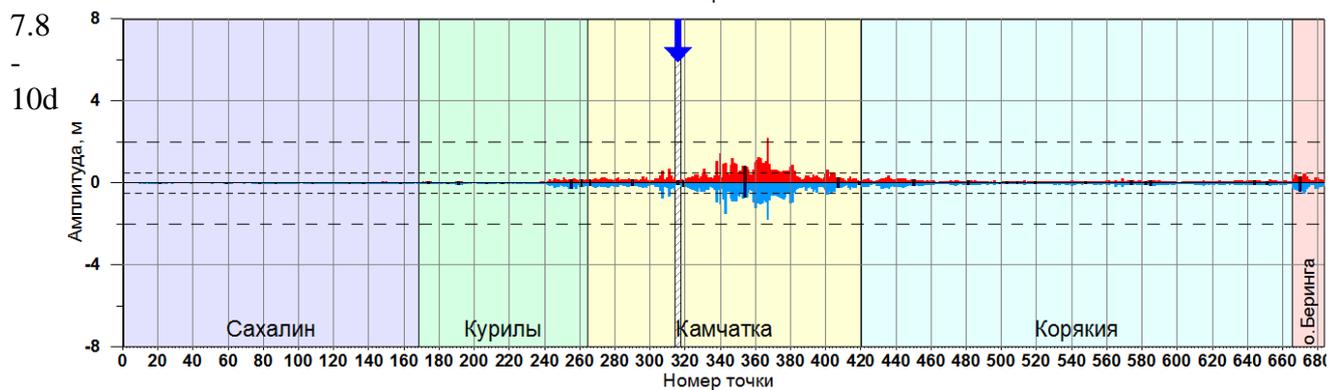
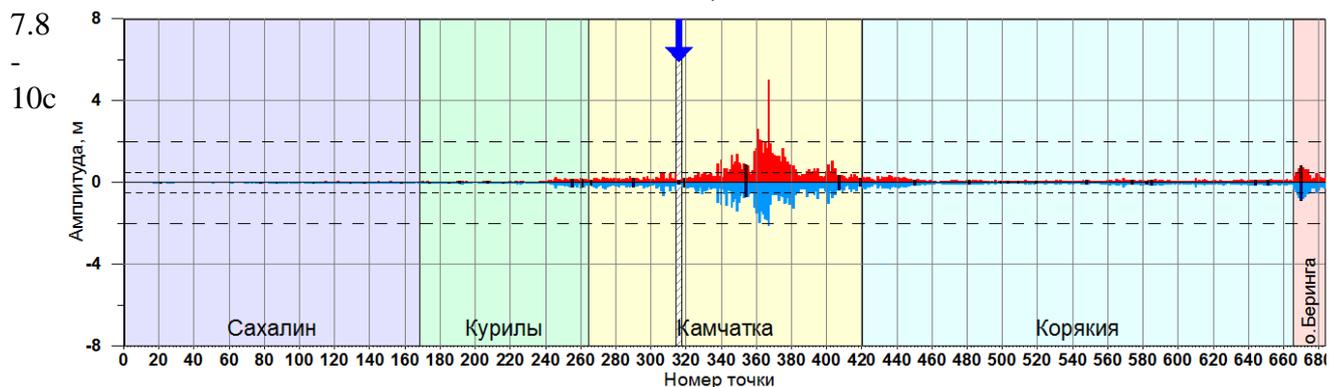
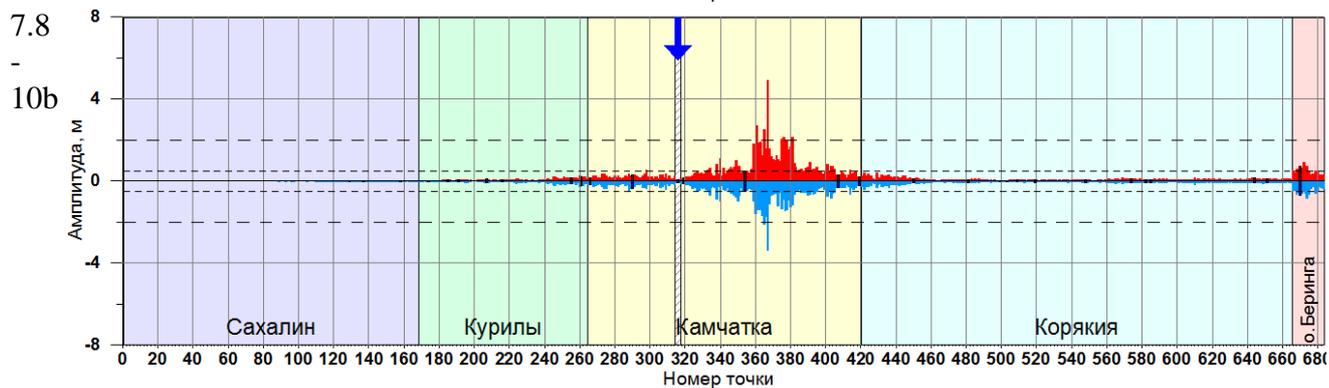
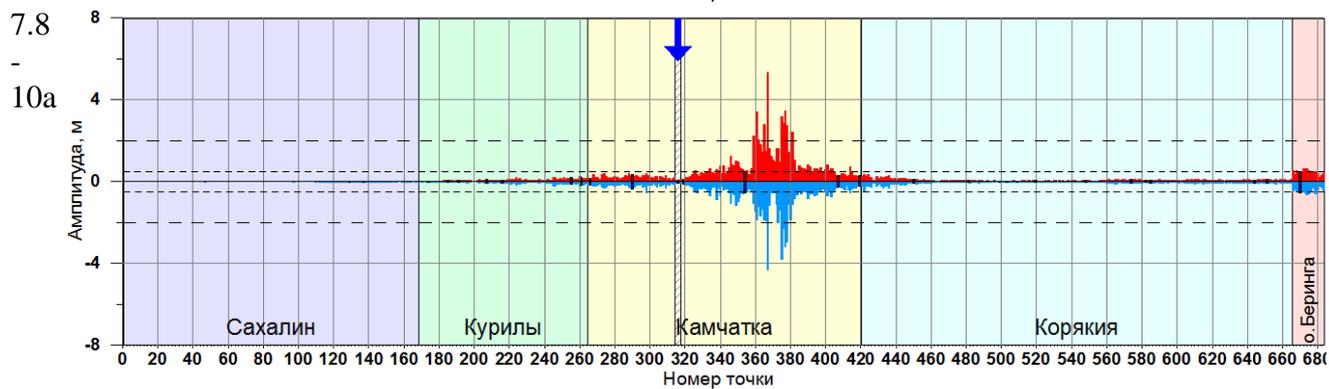
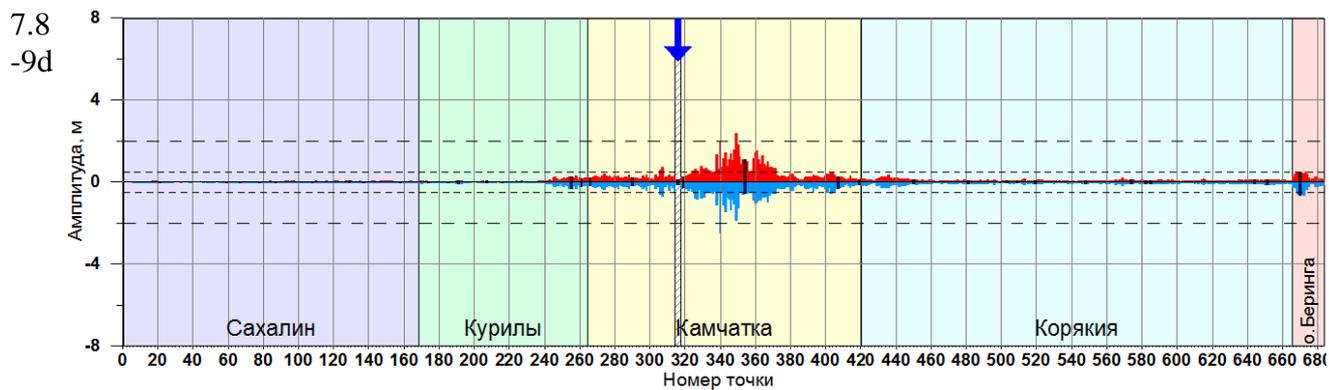


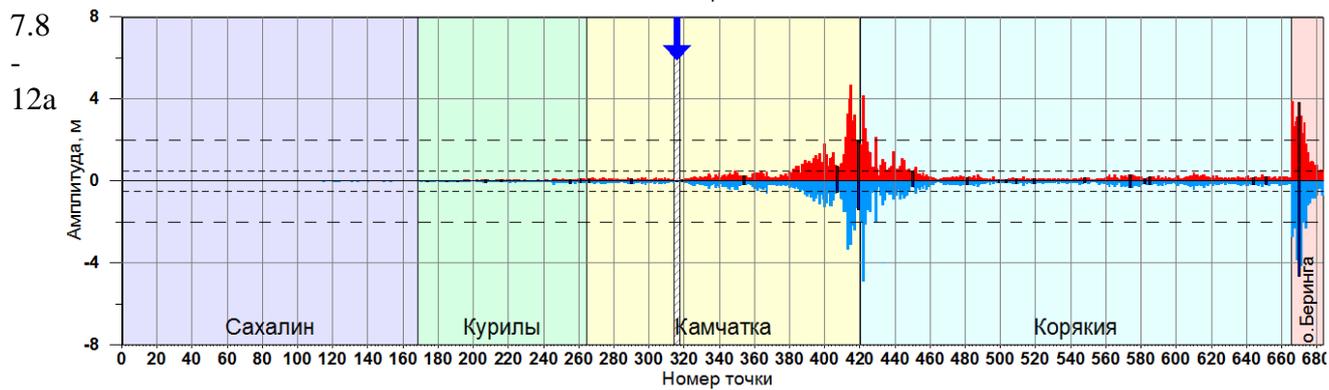
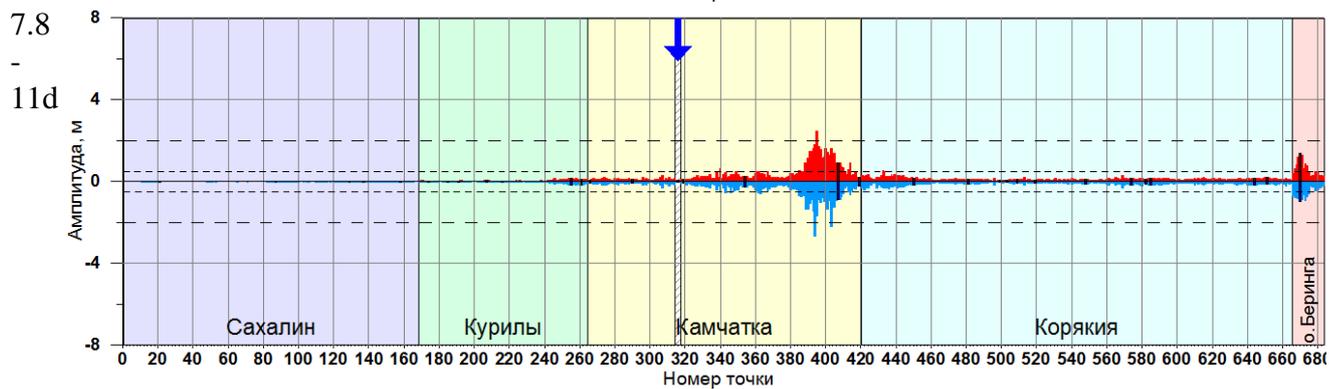
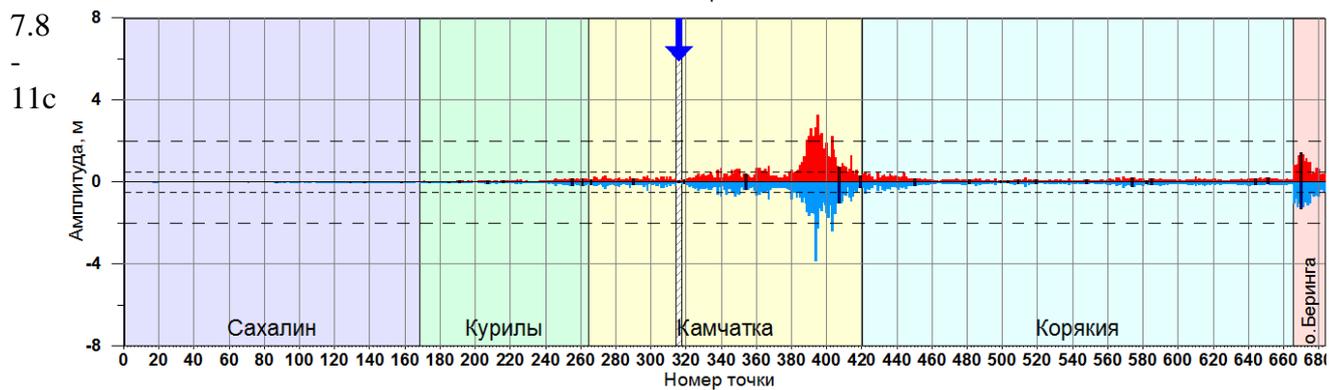
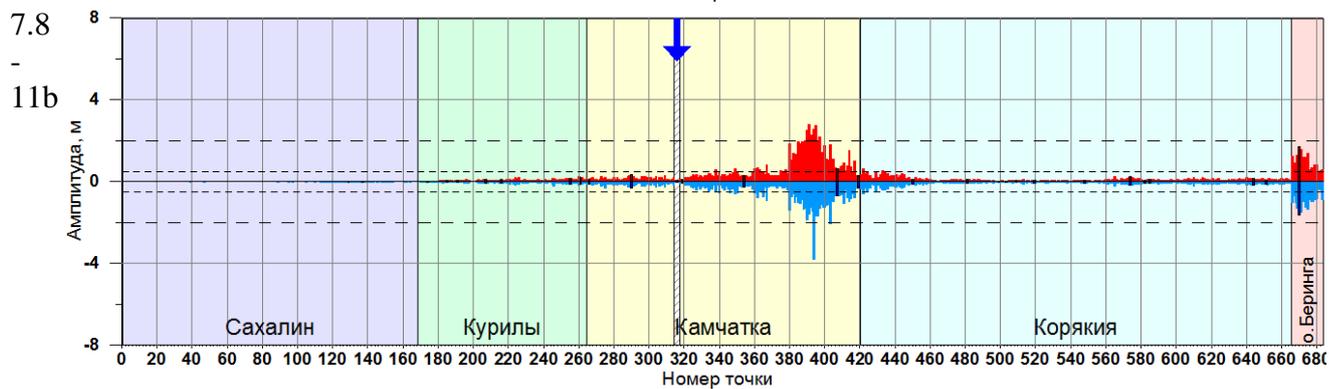
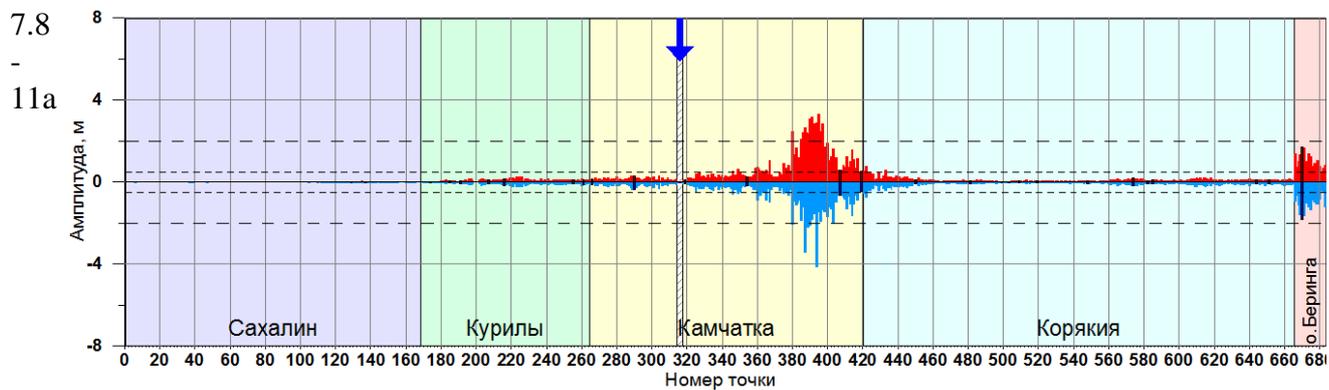


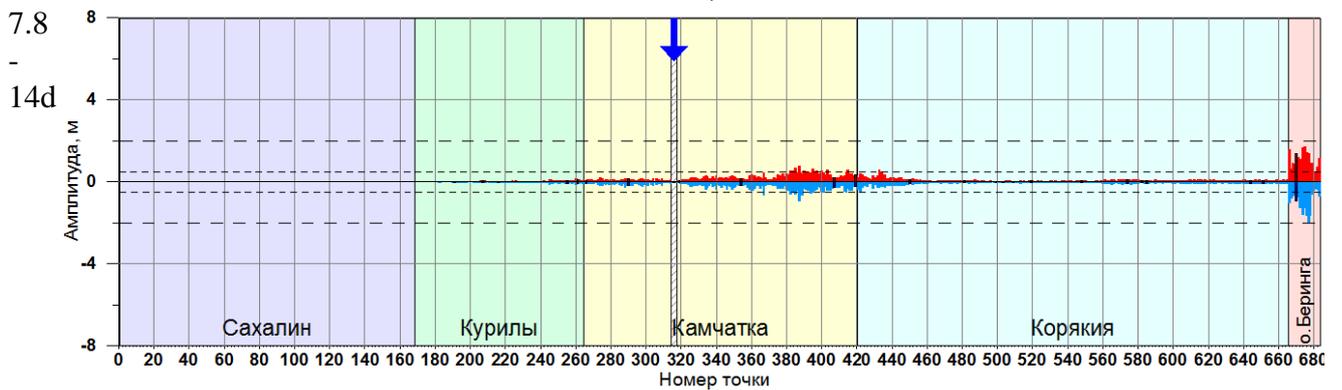
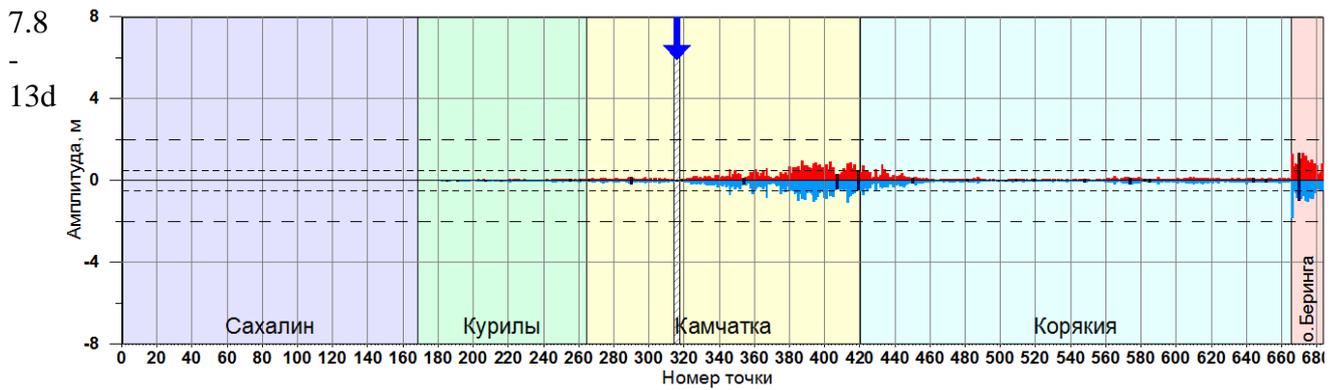
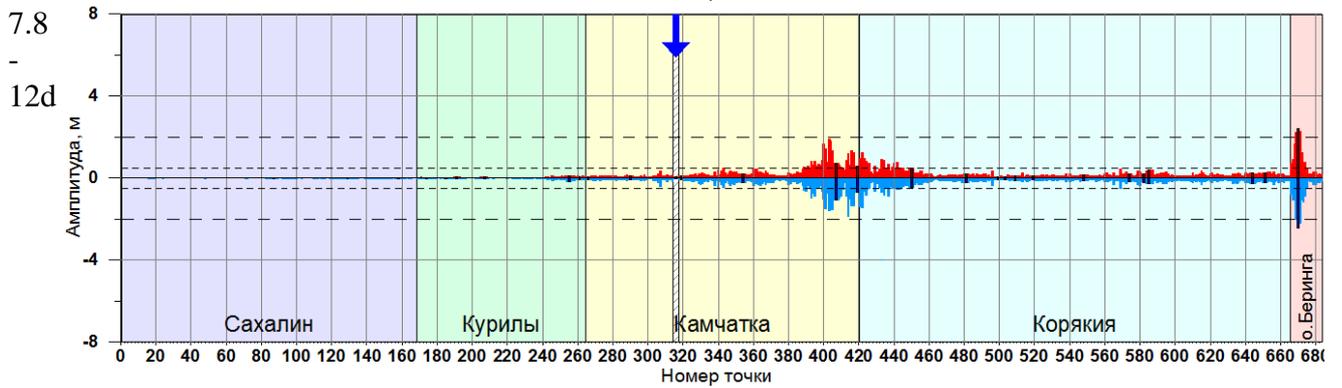
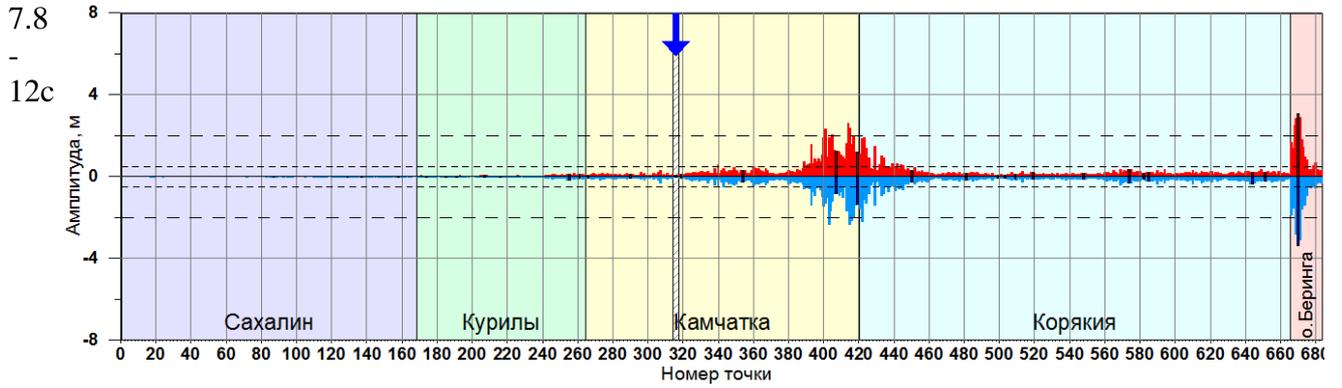
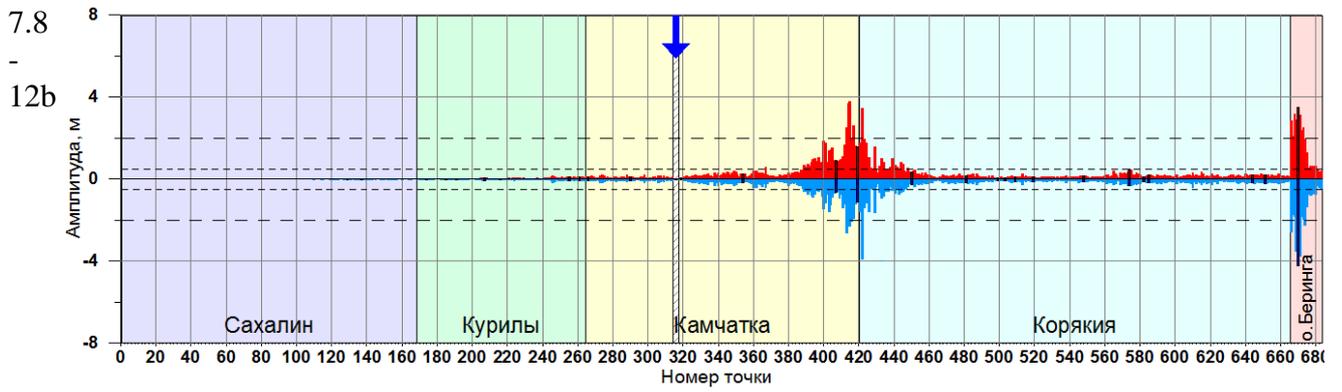


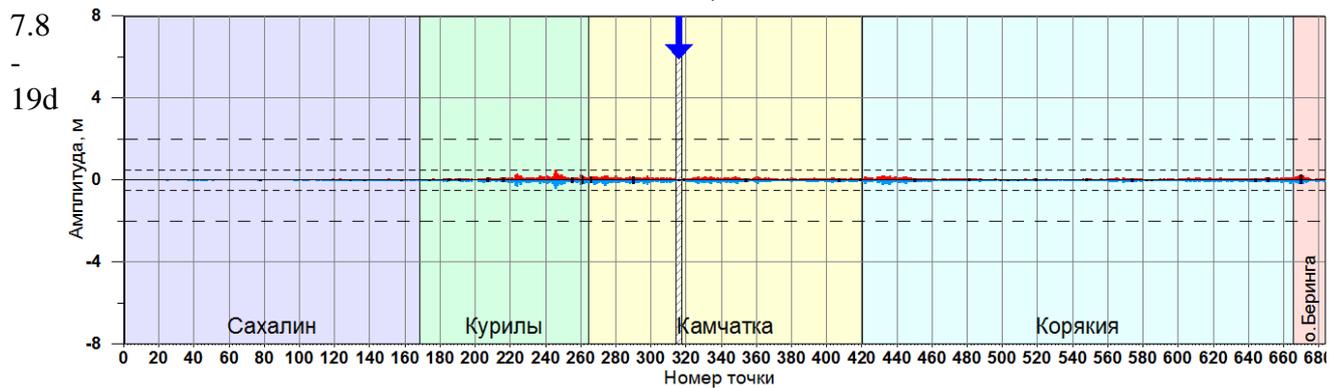
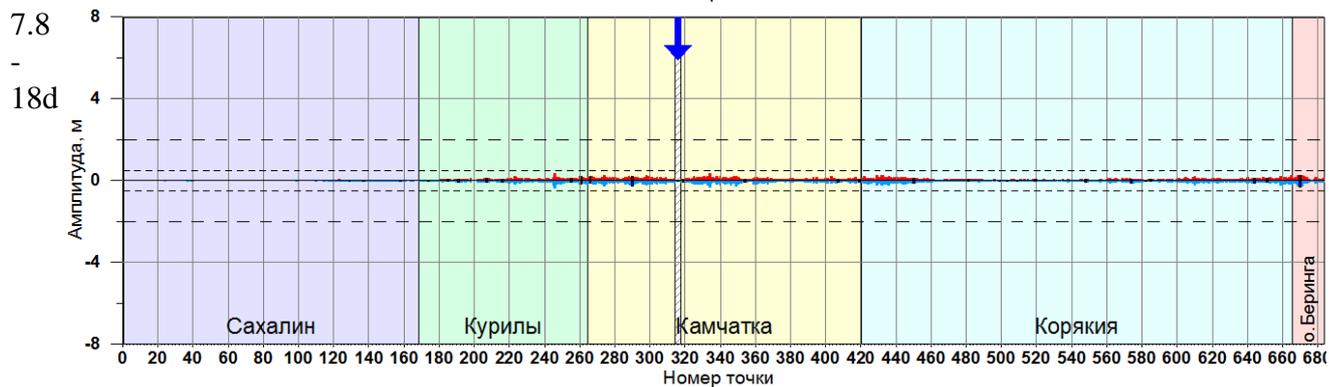
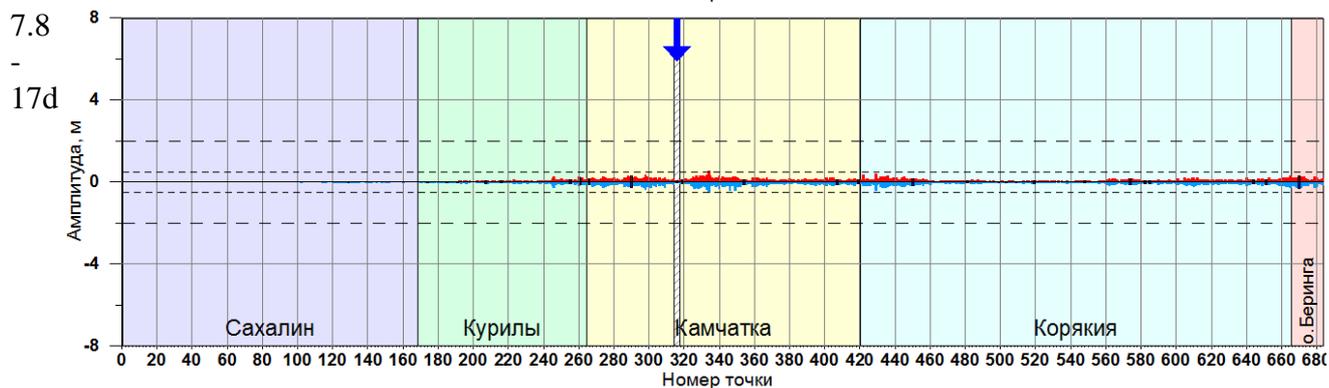
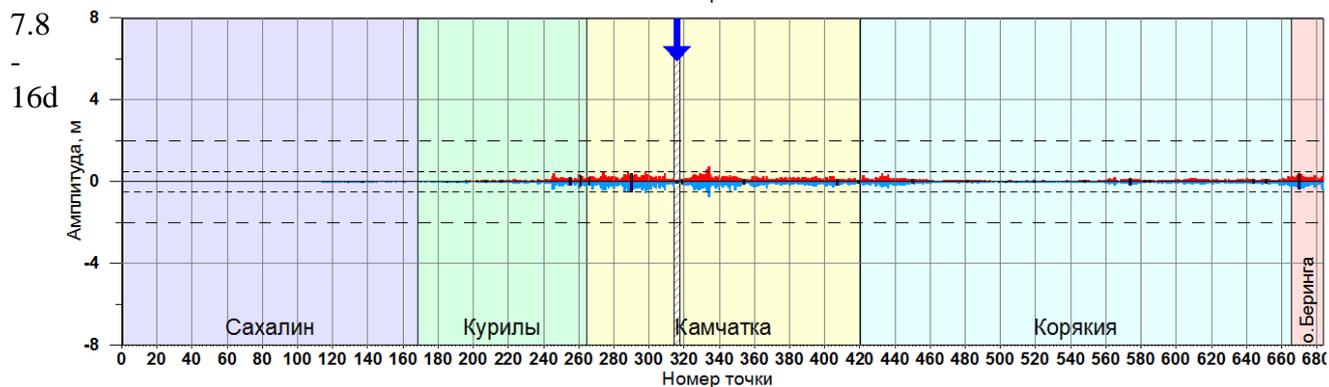
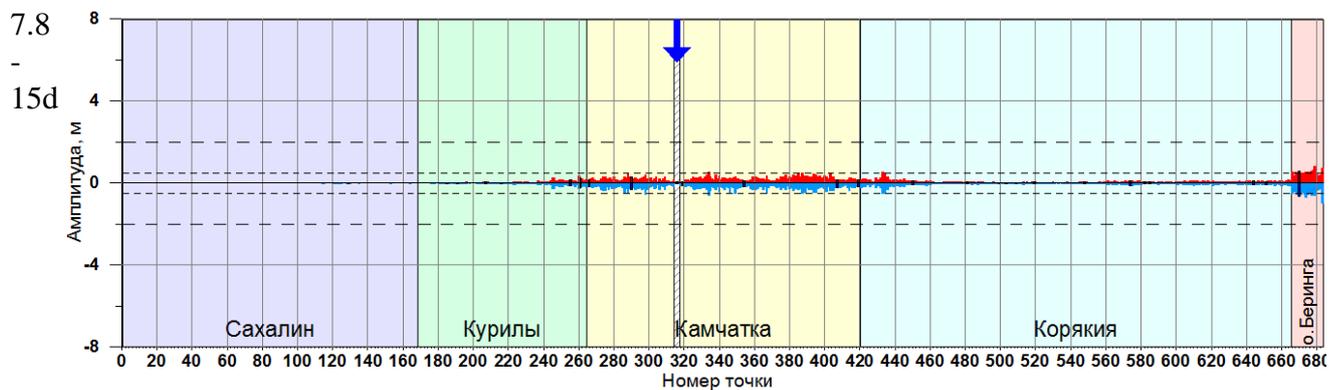


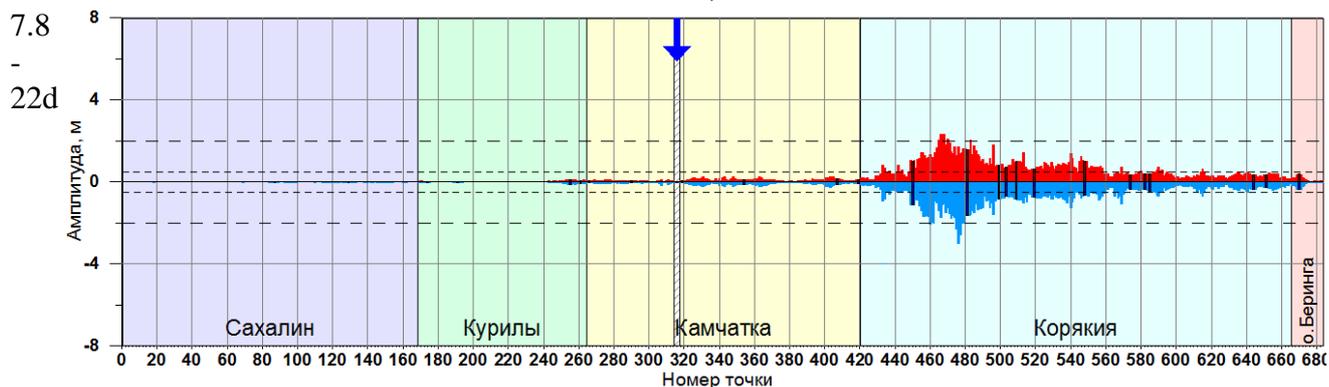
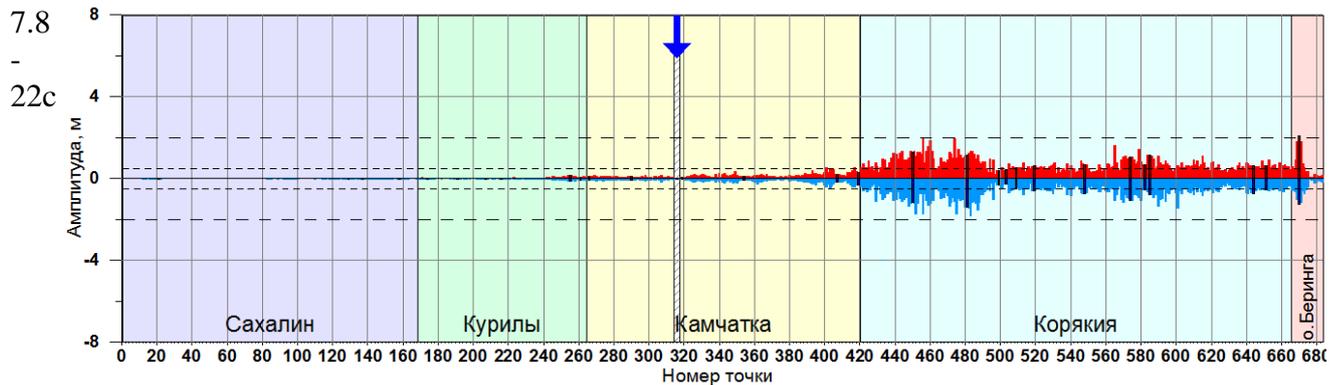
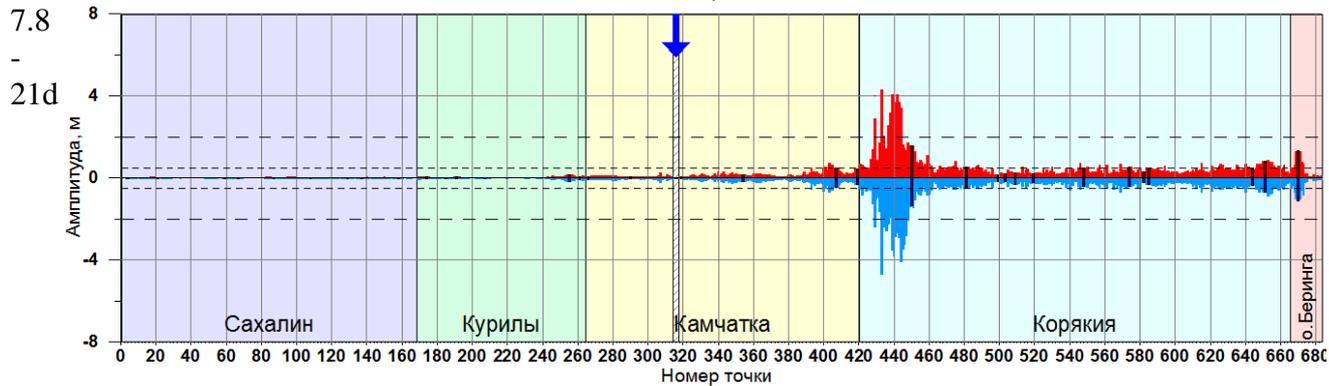
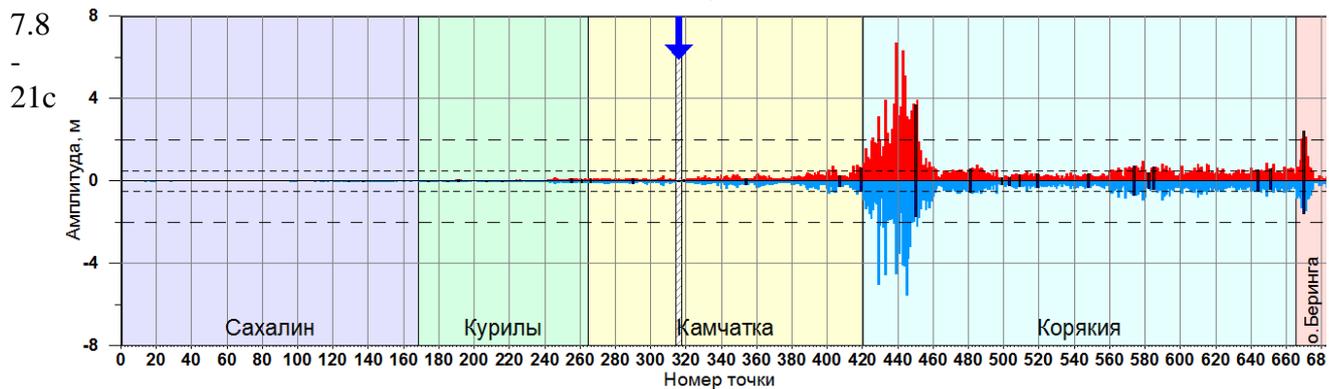
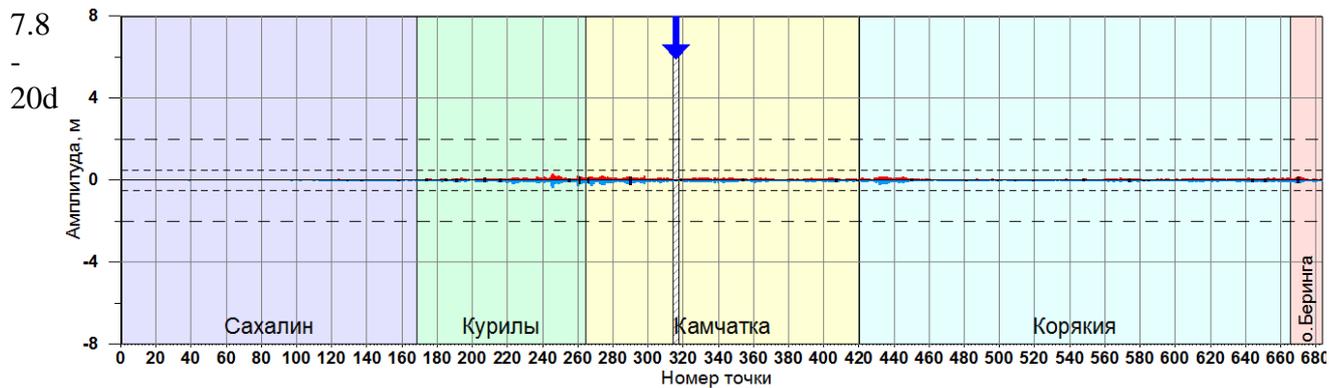


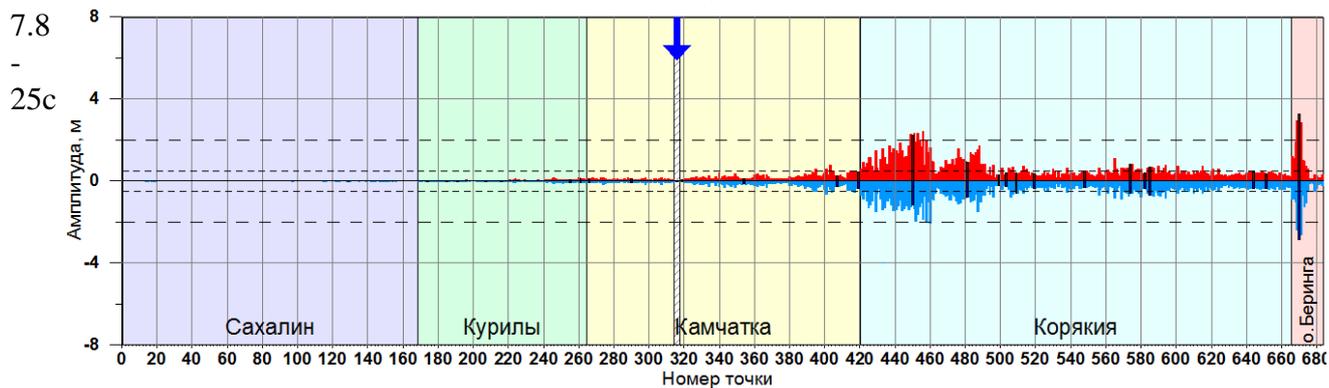
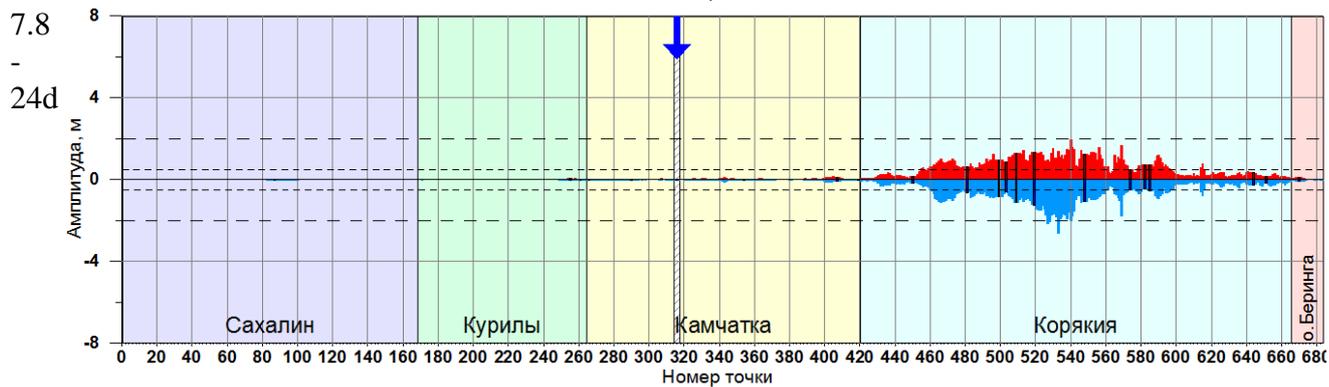
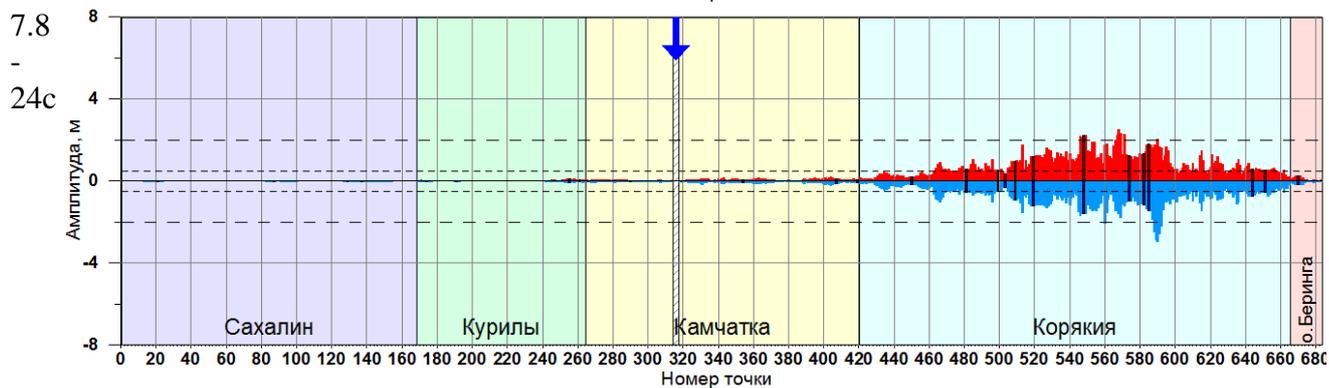
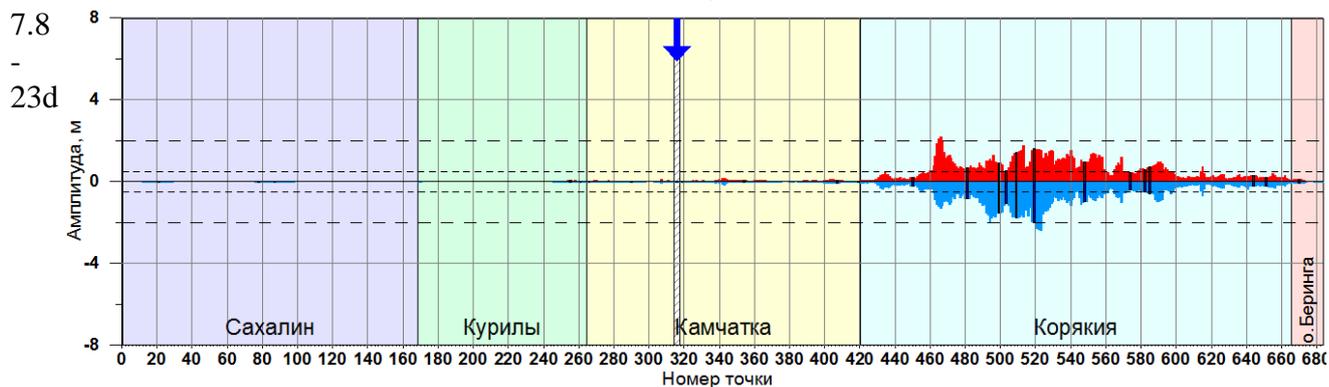
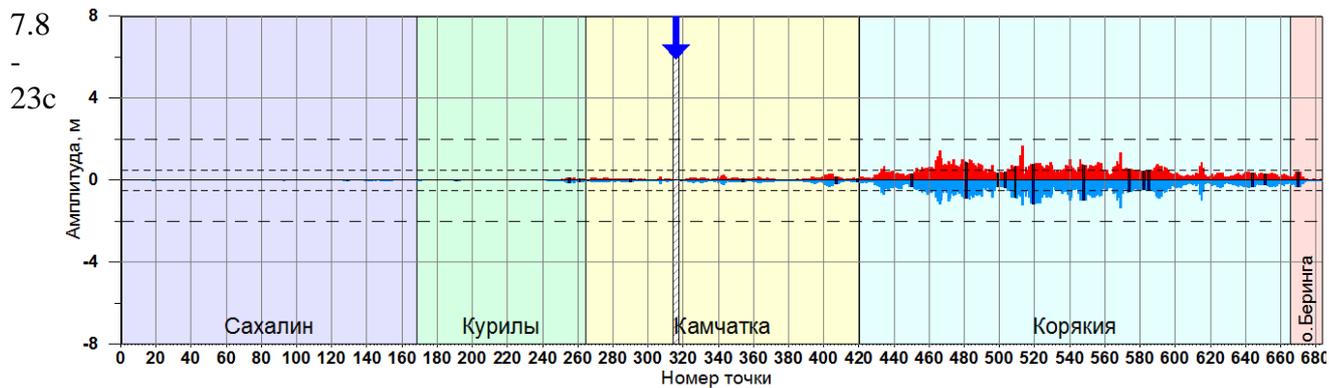


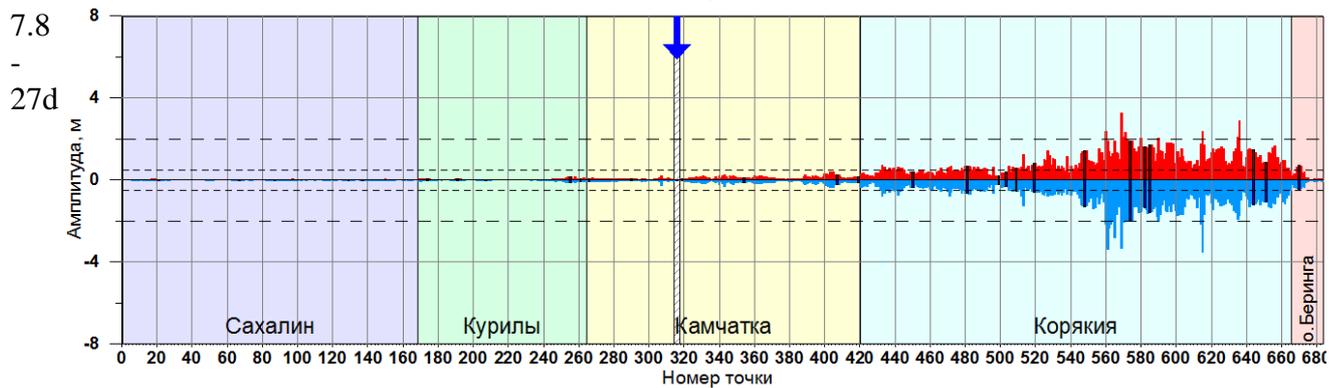
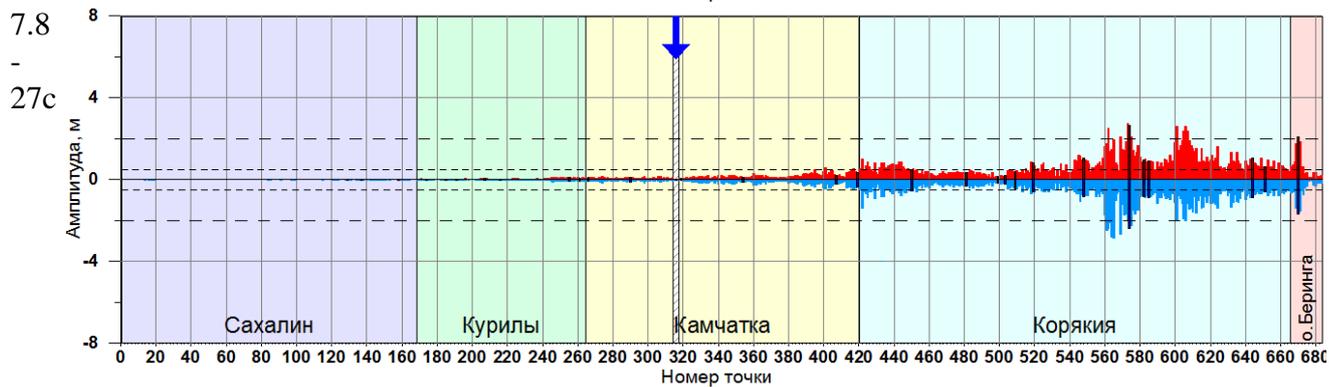
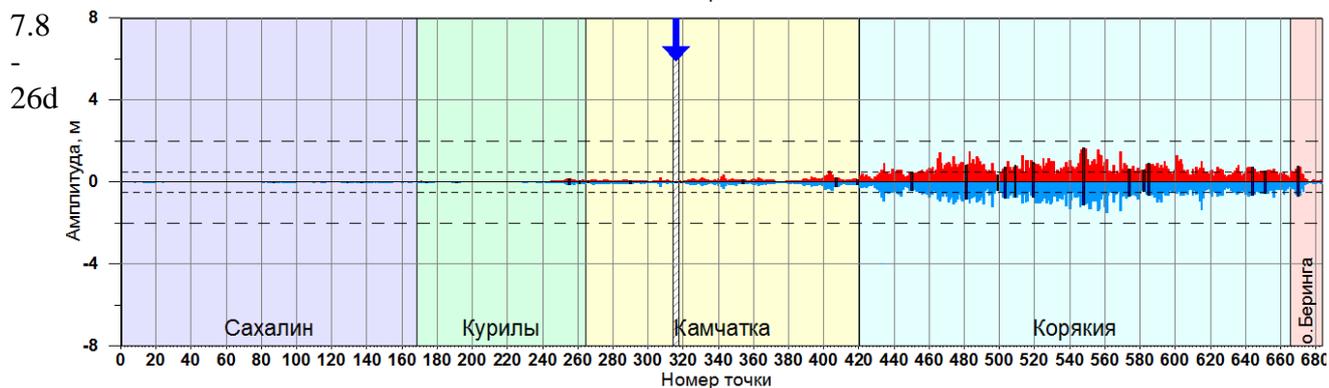
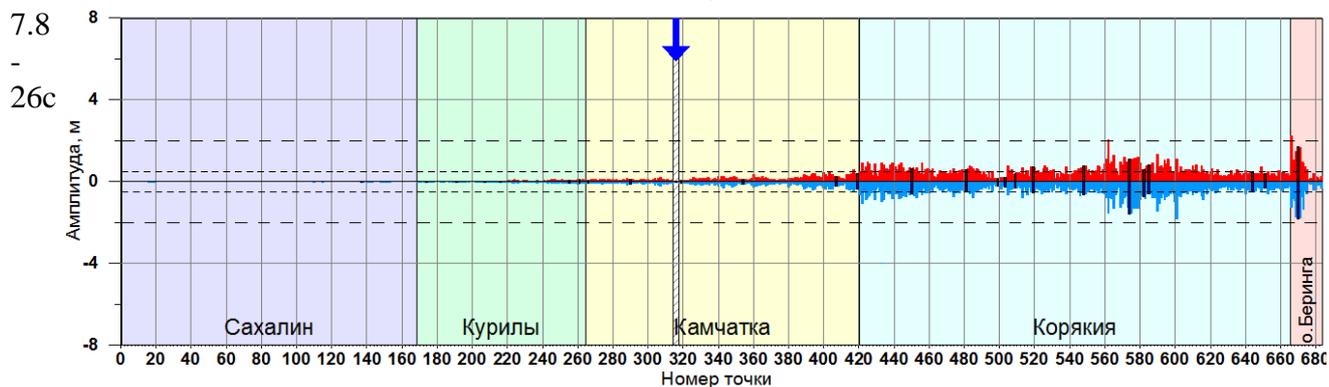
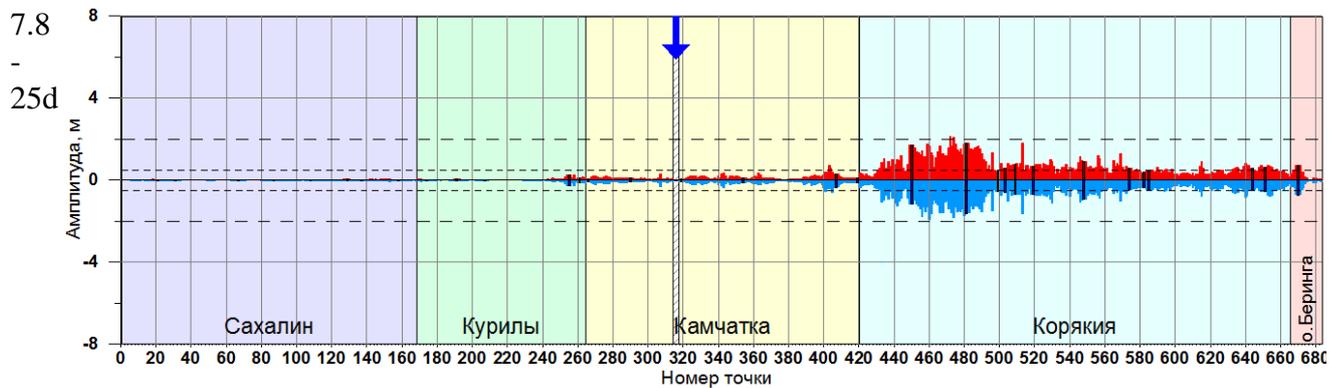


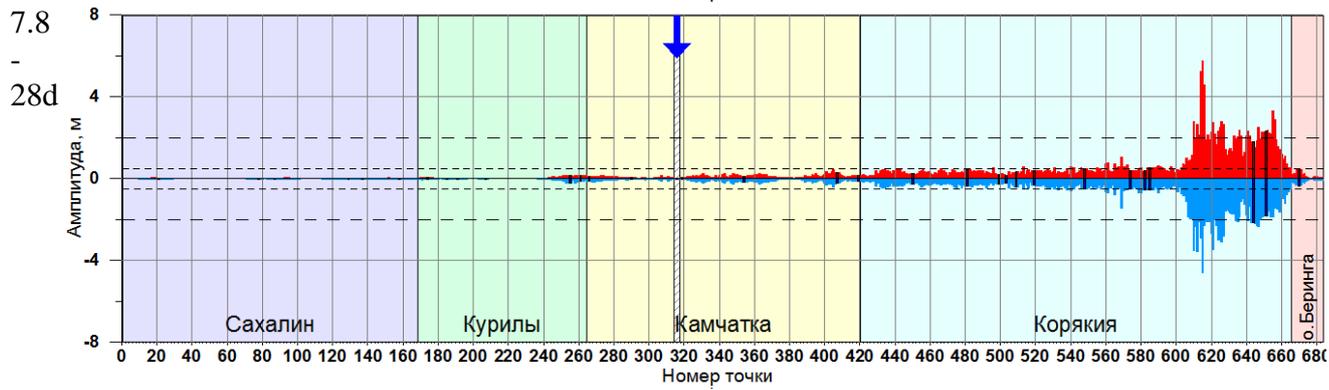
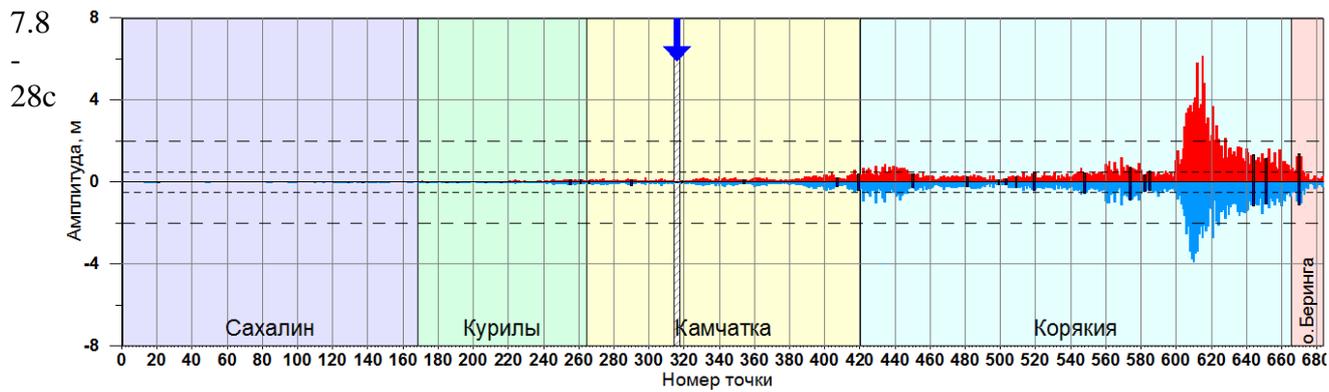






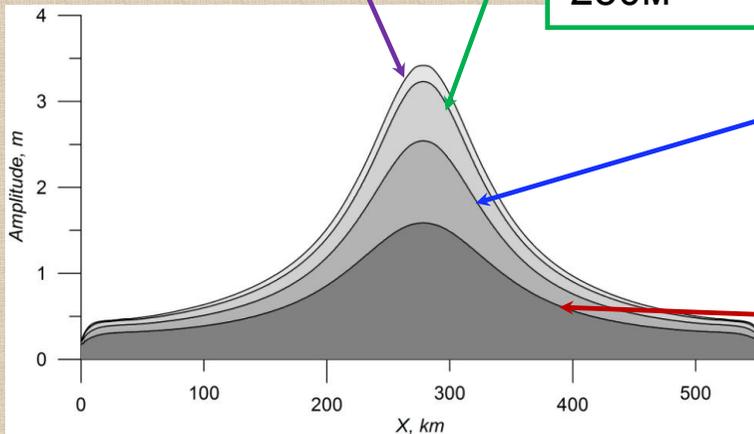
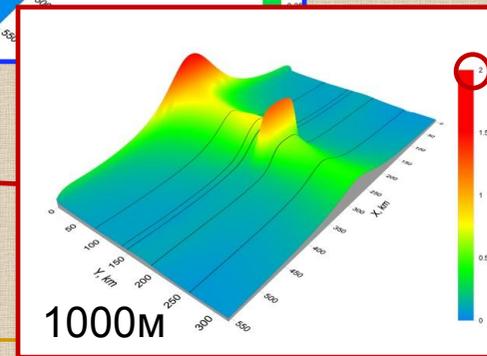
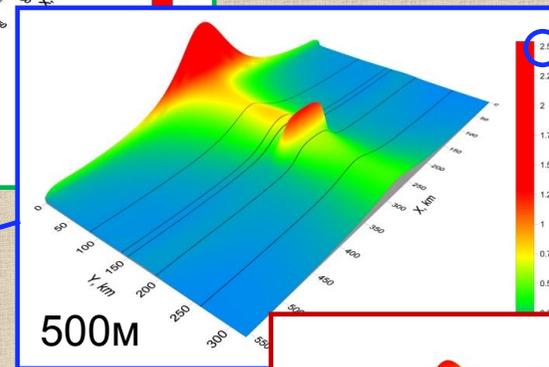
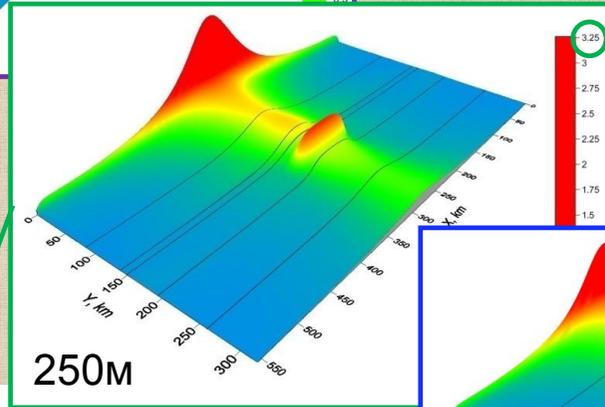
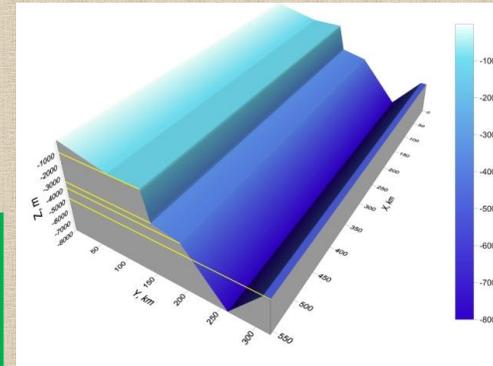
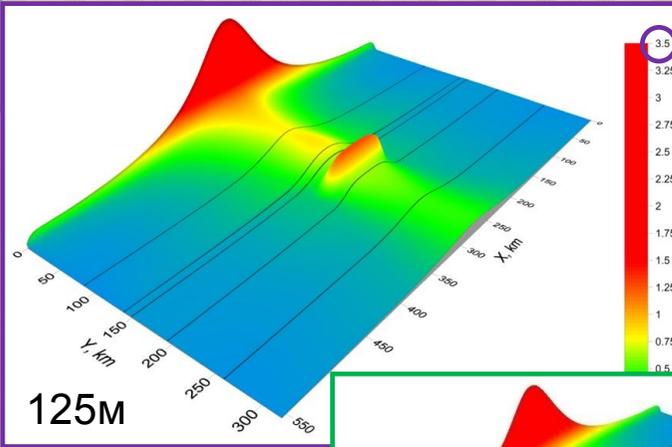




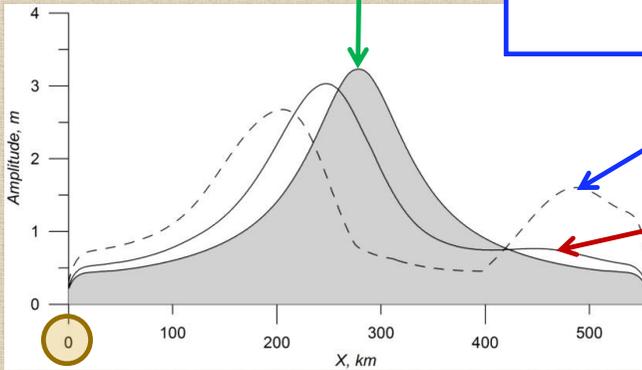
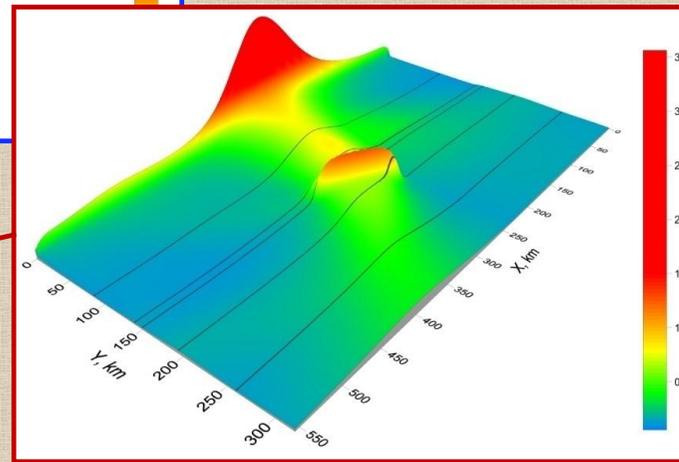
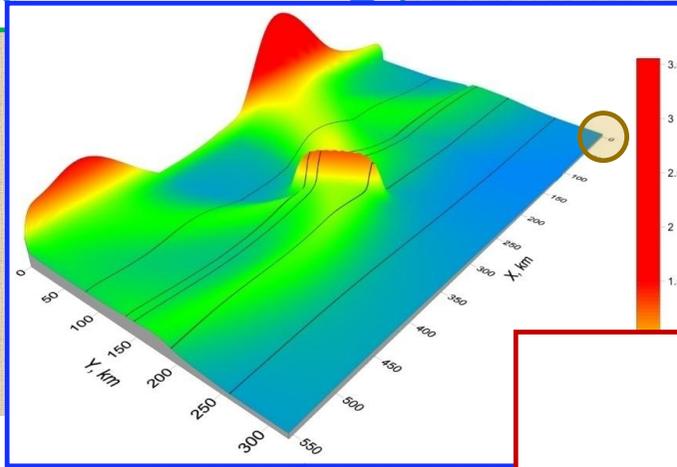
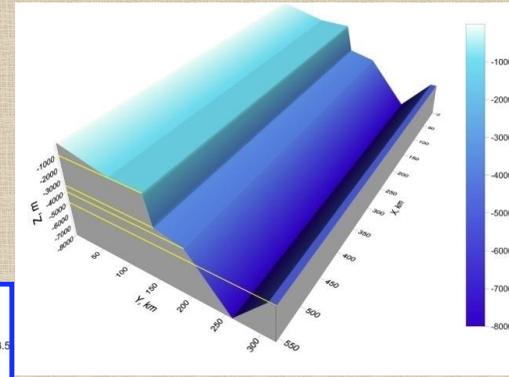
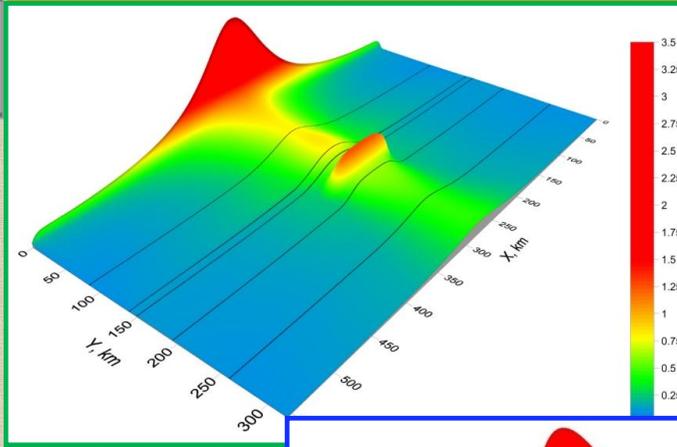


## **13. Приложение 2.**

**Зависимость результатов моделирования от разрешающей способности сетки**



**14. Приложение 3.**  
**Зависимость результатов моделирования от ориентации источника**



4