

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

10 октября 2007 года

**Контракт № 1н-07 от 22 марта 2007 г. 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 "**

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН ЦУНАМИ ПРИ
РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО КАРАГИНСКОМУ ЗАЛИВУ**

ТРЕТИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

_____ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2007 г.

Исполнители:

д.ф.-м.н.

В.К.Гусяков

к.ф.-м.н.

З.И.Федотова

аспирант

В.В.Бабайлов

аспирант

С.А.Бейзель

аспирант

С.В.Елецкий

1. Введение.....	4
2. О проявлениях цунами и о цунамигенных землетрясениях в акваториях, прилегающих к Карагинскому заливу.....	5
3. Модели генерации волн цунами подводными землетрясениями.....	7
4. Алгоритмическое обеспечение.....	8
5. Защищаемые пункты.....	12
6. Исторические сведения	14
7. Концепция конструирования набора модельных источников	16
8. Расчетная область «Карагинский залив».....	17
9. Результаты расчетов	19
10. Литература	39

1. Введение

Содержание третьего промежуточного информационного отчета, согласно календарному плану, непосредственно связано исследованием трансформации волн цунами при распространении по Карагинскому заливу.

С использованием совокупности технологических приемов, предложенных и разработанных Исполнителями проекта на предыдущем этапе работ,

- подготовлен краткий обзор имеющейся в научной литературе информации о проявлениях цунами и о цунамигенных землетрясениях в исследуемой области;
- определена совокупность характерных «критических» модельных цунамигенных землетрясений,
- проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых рассчитаны максимальные и минимальные высоты волн, порожденных этими землетрясениями в Карагинском заливе и в прилегающих акваториях
- подготовлены карты «свечения» волн цунами, наглядно представляющие направления распространения волновой энергии от зоны начального смещения свободной поверхности.

В соответствии с Техническим заданием Заказчику передаются файлы рассчитанных максимальных и минимальных высот волн, порожденных характерными для исследуемой акватории «критическими» модельными цунамигенными землетрясениями и карты «свечения» волн цунами в общепринятом графическом формате. Соответствующие значения мареограмм, рассчитанных в утвержденных (см. Первый информационный отчет по Контракту) защищаемых пунктах были переданы в комплекте приложений к Второму информационному отчету.

Дополнительная информация об особенностях изучаемого явления содержится в отчетах о НИР «Цунамирайонирование Берингоморского побережья Карагинского и Олюторского районов Корякского автономного округа», выполненных в 1994 – 1995 гг. под руководством одного из авторов настоящей работы (В.К.Гусяков) по заказу ОМСП ИВ ДВО РАН.

Отчет состоит из основного текста (40 стр.) и 5 приложений, в него включены 5 таблиц и 26 рисунков. Собственно результаты расчетов передаются Заказчику в виде соответствующего набора файлов данных.

2. О проявлениях цунами и о цунамигенных землетрясениях в акваториях, прилегающих к Карагинскому заливу.

Значительная часть 8-бальной зоны на территории Корякского автономного округа находится под дном океана, что является источником потенциальной цунамиопасности для Беринговоморского побережья Корякии. В течении длительного времени реальностью этой опасности пренебрегалось. Достаточно сказать, что во всех существовавших схемах цунамирайонирования Курило-Камчатского побережья (см., например, Атлас ..., 1978; Го и др., 1884, 1986; Пелиновский, Плинк, 1980) Беринговоморское побережье Камчатки не рассматривалось вовсе. Возникновение сильного цунамигенного землетрясения 23 ноября 1969 года ($M = 7.7$) с высотами волн в районе полуострова Озерной до 10-15 метров оказалось полной неожиданностью, но поскольку оно произошло вблизи практически незаселенного побережья и не вызвало значительного материального ущерба (а тем более человеческих жертв) это событие не привело к пересмотру существовавших схем цунамирайонирования Камчатки.

Озерновское землетрясение явилось первым из серии достаточно сильных ощутимых землетрясений на территории Корякского автономного округа. Через шесть с небольшим лет, 21 января 1976 года произошло землетрясение магнитуды 6.2 с эпицентром в районе западного побережья острова Карагинский, которое ощущалось с интенсивностью до 5-6 баллов в пос.Оссора. Следующее ощутимое (5-6 баллов) землетрясение произошло 10 сентября 1985 года в районе пос. Пахачи, эпицентр которого находился в прибрежной части Олюторского залива. Через шесть лет после него сильное землетрясение с магнитудой 7.1 произошло 8 марта 1991 года в глубине Корякского нагорья в районе пос. Хаилино и вызвало панику в поселке Тиличики и других населенных пунктах округа. Последнее по времени разрушительное землетрясение с магнитудой $M=7.5$ в той же зоне произошло 20 апреля 2006 года и сопровождалось значительным материальным ущербом. Таким образом, можно говорить о происходящем в последние годы значительном усилении сейсмической активности на территории Корякского автономного округа. Эпицентры всех этих сильных землетрясений находились частично или полностью на суше, поэтому волны цунами с высотами, достаточными для визуального обнаружения, не возникали, мареографные же установки в данном районе отсутствуют. Однако очаг следующего сильного землетрясения вполне может оказаться непосредственно под дном Карагинского залива и в таком случае возникновение цунами становится весьма вероятным событием.

О реальности угрозы цунами для Беринговоморского побережья КАО свидетельствует также обнаружение в полевых экспедиционных работах следов

палеоцунами в торфяных отложениях прибрежных болот и маршей Укинской губы, острова Карагинский и на северном побережье Олюторского залива (Мелекесцев, Курбатов, 1993). Эти следы представляют собой прослой песка и мелкого гравия морского происхождения (часто с остатками морских ракушек) в прибрежных лагунах и торфяниках, которые интерпретируются как отложения поднятого волной донного и берегового осадочного материала в процессе набегания и обратного отката волн цунами (Minoura, 1991). В частности, возраст найденного в районе пос. Хайлюля прослоя торфа, содержащего цунамигенный песчаный слой, радиоуглеродным методом был определен в интервале 1500-1550 гг. н.э. В результате полевых работ сезона 1993 года на острове Карагинском были выявлены и датированы радиоуглеродным и тефрохронологическими методами три доисторических цунами - около 720, 820 и 940 гг. н.э. Предположительно, сейсмотектонический подъем, приведший к возникновению 1.5-2-метровой береговой террасы и следы локального цунами на мысе Крещенный Огнем, идентифицируемого по обнаруженному прослою раковин гастропод и устриц (возраст по ^{14}C 820 ± 80 лет т.н.), вызваны одной причиной - катастрофическим землетрясением, происшедшим в этом районе около 1220-1230 гг. н.э. (Мелекесцев, Курбатов, 1994).

Сравнительно новым и малоизученным аспектом задачи цунамирайонирования Берингоморского побережья КАО является оценка вероятности локальных цунами от береговых и подводных оползней и обвалов, инициируемых местными землетрясениями. Предварительное изучение материалов аэрофотосъемки и результаты полевых обследований 1992-93 гг. позволили обнаружить ряд крупных сейсмотектонических обвалов в прибрежных частях территории КАО (обвал на мысе Крещенный Огнем, в бухте Лаврова, на юге о-ва Карагинского), образование которых, несомненно, сопровождалось возникновением локальных цунами.

Большинство поселков Берингоморского побережья КАО расположено на песчано-галечных косах в приустьевых частях рек, на отметках не более 2-3 метров над уровнем моря, что при отсутствии для многих из них безопасных путей и мест эвакуации, делает их особенно уязвимыми даже в случаях умеренных по силе цунами. В настоящее время идет интенсивная застройка населенных пунктов КАО, в том числе расположенных в прибрежной зоне.

В качестве сейсмотектонической модели источника в данной работе используется дислокационная пространственная модель очага землетрясения, интегральной характеристикой которой служит величина сейсмического момента. Дополнительно, она характеризуется шестью параметрами, в число которых входят размеры плоскости разрыва (длина, ширина), механизм очага (углы падения, простирания и направления

подвижки) и величина смещения по разрыву. Остаточным смещениям от такого источника, помещенного внутри однородного упругого полупространства приписывается некоторый закон изменения во времени (нарастание по линейному или экспоненциальному закону от нуля до некоторого максимального значения), с которым они вводятся в уравнение неразрывности системы уравнений мелкой воды, что соответствует так называемой поршневой модели возбуждения цунами (Comer, 1984).

В качестве модели распространения используется нелинейная система уравнений мелкой воды, решаемая численным способом на сетке, в узлах которой задаются глубины бассейна. Модель распространения позволяет пересчитать смещения поверхности океана в очаге цунами в высоты волн вблизи берега.

3. Модели генерации волн цунами подводными землетрясениями.

Сравнительный анализ различных моделей возбуждения цунами (Гусяков, Марчук, 1993) привел к выводу о том, что так называемая "поршневая модель" является вполне адекватной для расчета возбуждения цунами в случаях, когда в этот процесс не вовлекается какой-либо вторичный механизм типа подводного оползня или берегового обвала.

Поршневая модель основана на решении уравнений статической теории упругости для однородного полупространства с внутренним распределенным источником дислокационного типа. задача сводится к решению уравнения равновесия

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{\mathbf{U}} + \mu \Delta \bar{\mathbf{U}} + \bar{\mathbf{F}} = 0 \quad (1)$$

при нулевых напряжениях на свободной границе упругого полупространства (при $z=0$)

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\mathbf{U}}(x, y, z)$ – вектор смещения частиц среды относительно начального напряженного состояния, m и l – параметры Ляме упругой среды, $\bar{\mathbf{F}}$ – приложенная сила, отнесенная к единице объема. Решение задачи (1) – (2) строится для единичной вертикальной и горизонтальной сосредоточенной силы, затем делается переход к дипольным силовым источникам, моделирующим подвижку по бесконечно малому элементу разрыва. Далее решение обобщается на случай пространственного источника дислокационного типа, характеризующегося длиной плоскости разрыва L , ее шириной W , глубиной верхнего края разрыва h_0 , углом падения плоскости разрыва d , направлением подвижки в этой плоскости g и величиной смещения противоположных берегов разрыва D_0 .

В качестве меры интенсивности такого источника используется величина его сейсмического момента

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot D_0, \quad (3)$$

которому по известному корреляционному соотношению (Аки, 1973) может быть сопоставлена величина его магнитуды.

Создаваемые таким источником деформации дна $U_z(x,y)$ рассчитываются по программе, описанной в (Гусяков, 1978) и используются в качестве начальных данных для программы расчета распространения цунами в океане с реальным рельефом дна.

Смещения дна рассчитываются для прямоугольной области в узлах той же сетки, которая используется для расчета распространения цунами. Оценки показывают, что эта область содержит примерно 90% общего объема перемещения дна бассейна, так что вклад в генерацию цунами неучитываемых деформаций дна во внешней области можно считать достаточно малым. В такой постановке также пренебрегается искажениями поля остаточных смещений, вносимыми неоднородностями свободной границы упругого полупространства (рельефом дна).

В качестве модели распространения цунами используется нелинейная система уравнений мелкой воды, решаемая конечно-разностным методом на пространственной сетке, в узлах которой задаются глубины бассейна.

4. Алгоритмическое обеспечение.

Совокупность вычислительных алгоритмов разбита на два модуля: модуль расчета начального возмущения свободной поверхности океана, порожденного модельным цунамигенным землетрясением и модуль расчета распространения волны цунами от заданного начального возмущения.

Для выполнения серийных расчетов разработана специальная консольная утилита `serial_calc.exe`, не входящая в комплект программного обеспечения поддержки «пользовательского» режима. Выполняемая ею функциональность будет обеспечена набором алгоритмического и программного обеспечения, поддерживающего «исследовательский» режим работы. Следует заметить, что создание производственной версии этой утилиты потребовало дополнительной и тщательной настройки вычислительных алгоритмов, и потому ее разработка началась заранее, на этапе, предшествующем этапу проектирования и реализации структуры хранилища результатов. Такой подход оправдал себя еще и потому, что собственно проведение производственных расчетов оказалось весьма продолжительным процессом. Здесь же следует указать

специализированную вычислительную утилиту `source.exe`, предназначенную для расчета начального поля смещения свободной поверхности океана, а также утилиту `MassGlobalCalcul.exe`, осуществляющую моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу.

Многолетний опыт авторов по решению фундаментальных и прикладных задач проблемы цунами показал, что для определения максимальных высот волн в окрестности защищаемых пунктов (вплоть до на пятиметровой изобаты) достаточно использовать классические уравнения мелкой воды. Эта модель характеризуется набором “физических”, “географических” и “математических” параметров. К физико-географическим параметрам относятся начальные данные (форма начального возмущения свободной поверхности), форма границ (очертания берегов и сооружений) и граничные условия, батиметрия, шероховатость донной поверхности, ветровое трение, коэффициенты турбулентного перемешивания и др. Математические параметры возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов.

Вычислительный модуль системы реализует алгоритм расчета распространения цунами с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы и проход волн за границы расчетной области. Алгоритм построен на основе двухшаговой схемы Мак-Кормака.

Значительные размеры расчетной области потребовали использования географической системы координат, в которой линейные уравнения мелкой воды с учётом сил Кориолиса и донного трения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial (Hu)}{\partial \lambda} + \frac{\partial (Hv \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} &= f_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь R – средний радиус земли, φ – географическая широта, λ – географическая долгота, t – время, $h = H + \eta$ – полная глубина, H – глубина невозмущенного слоя жидкости, η – смещение свободной поверхности, g – ускорение силы тяжести; u и v – компоненты вектора скорости по направлениям λ и φ соответственно, $f_1 = lv - gk^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$, $f_2 = -lu - gk^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$, $l = 2\omega \sin \varphi$, ω – угловая скорость вращения Земли, k – коэффициент шероховатости.

Нелинейные уравнения мелкой воды на сфере могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial hu}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv \cos \varphi}{\partial \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{R} \left[\frac{1}{2 \cos \varphi} \frac{\partial u^2}{\partial \lambda} + v \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{g}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \right] &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{R} \left[\frac{u}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + g \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} \right] &= f_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассматривая область $\Omega(\lambda, \varphi) = \{(\lambda, \varphi) : \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, \lambda_1, \varphi_1, \lambda_2, \varphi_2 - const\}$ в плоскости географических координат φ и λ , введём в ней равномерную прямоугольную сетку: $\bar{\Omega} = \{(\lambda_i, \varphi_j) : \lambda_1 \leq \lambda_i \leq \lambda_2, \varphi_1 \leq \varphi_j \leq \varphi_2, 0 \leq i \leq N_\lambda, 0 \leq j \leq N_\varphi\}$ с шагами $\Delta\lambda$ и $\Delta\varphi$ по пространственным переменным λ и φ , соответственно. Пусть $\Delta\tau^n = t^{n+1} - t^n$ – шаг по времени. В терминах сеточных функций, зависящих от дискретных переменных $\lambda_i, \varphi_j, t^n$, явная двухшаговая конечно-разностная схема для аппроксимации линейной модели (4) во внутренних узлах сетки $\bar{\Omega}$ имеет вид:

Шаг 1

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta\lambda} + \frac{\cos \varphi_j H_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \varphi_{j-1} H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta\varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R \cos \varphi_j} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta\lambda} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta\varphi} &= f_{2ij}^n, \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_{1ij}^n = l_j v_{ij}^n - gk^2 \frac{u_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}, \quad f_{2ij}^n = -l_j u_{ij}^n - gk^2 \frac{v_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}, \quad l_j = 2\omega \sin \varphi_j.$$

Шаг 2

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + h_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{H_{i+1j}^n u_{i+1j} - H_{ij}^n u_{ij}}{\Delta\lambda} + \frac{\cos \varphi_{j+1} H_{ij+1}^n \hat{v}_{ij+1} - \cos \varphi_j H_{ij}^n \hat{v}_{ij}}{\Delta\varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + u_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R \cos \varphi_j} \frac{h_{i+1j} - H_{i+1j}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta\lambda} &= f_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R} \frac{h_{ij+1} - H_{ij+1}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta\varphi} &= f_{2ij}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_{1ij} = l_j \hat{v}_{ij} - gk^2 \frac{u_{ij} \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(h_{ij})^{4/3}}, \quad f_{2ij} = -l_j u_{ij}^n - gk^2 \frac{\hat{v}_{ij} \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}.$$

Для системы нелинейных уравнений (5) строится аналогичный алгоритм:

Шаг 1

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{h_{ij}^n u_{ij}^n - h_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_j h_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \varphi_{j-1} h_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(u_{ij}^n)^2 - (u_{i-1j}^n)^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{v_{ij}^n}{R} \frac{u_{ij}^n - u_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{u_{ij}^n}{R \cos \varphi_j} \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(v_{ij}^n)^2 - (v_{ij-1}^n)^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} \right] &= f_{2ij}^n. \end{aligned}$$

Шаг 2

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + h_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{h_{i+1j} u_{i+1j} - h_{ij} u_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_{j+1} h_{ij+1} \hat{v}_{ij+1} - \cos \varphi_j h_{ij} \hat{v}_{ij}}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + u_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(u_{i+1j})^2 - (u_{ij})^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{h_{i+1j} - H_{i+1j}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{\hat{v}_{ij}}{R} \frac{u_{ij+1} - u_{ij}}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{u_{ij}}{R \cos \varphi_j} \frac{\hat{v}_{i+1j} - \hat{v}_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(\hat{v}_{ij+1})^2 - (\hat{v}_{ij})^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{h_{ij+1} - H_{ij+1}^n - h_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} \right] &= f_{2ij}. \end{aligned}$$

Верхняя и нижняя границы расчетной области параллельны экватору, а левая и правая – проходят по меридианам. Звенья границы «вертикальная стенка» проходят через узлы равномерной прямоугольной сетки так, что всегда параллельны внешним сторонам прямоугольника $\Omega(\lambda, \varphi)$. На боковых фрагментах границы граничные условия для разностной схемы имеют вид: $u = 0, \partial v / \partial \lambda = 0, \partial \eta / \partial \lambda = 0$; а на параллелях, соответственно $v = 0, \partial u / \partial \varphi = 0, \partial \eta / \partial \varphi = 0$. На внешних «открытых» границах области $\Omega(\lambda, \varphi)$ поставлены условия свободного прохода – условия Зоммерфельда. В используемой системе координат на параллелях они имеют вид

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm c \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = 0, \quad R \frac{\partial u}{\partial t} \pm c \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0, \quad R \frac{\partial v}{\partial t} \pm c \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0,$$

и на меридианах

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = 0, \quad R \frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} = 0, \quad R \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} = 0,$$

где $c = \sqrt{gh}$ – скорость распространения сигнала, а выбор знака зависит от направления внешней нормали к соответствующей границе.

Батиметрия поверхности дна и топография суши являются фиксированными, хранятся в соответствующей базе данных и используются вычислительным модулем и модулем визуализации. Эти данные представляют собой сеточную функцию $\tilde{H}(\lambda_i, \varphi_j)$, $0 \leq i \leq N_\lambda, 0 \leq j \leq N_\varphi$, определенную в узлах дискретной области $\bar{\Omega}$, и определяются как значения глубин и высот, заданных на равномерной 1-минутной сетке.

Начальное возмущение свободной поверхности океана рассчитывается специальным расчетным модулем, а начальные скорости полагаются нулевыми. Шаг разностной схемы по времени вычисляется на каждом шаге из условия устойчивости. Алгоритм предусматривает возможность сглаживания решения через определенное число шагов. Параметры такого сглаживания задаются в специальном файле.

Первая версия программного обеспечения «пользовательского» режима работы обладает следующими функциональностями: просмотр распределений максимальных и минимальных амплитуд волн и их «размахов» в выбранном защищаемом пункте по всем цунамигенным землетрясениям, а также просмотр распределений максимальных и минимальных амплитуд волн и их «размахов» от выбранного цунамигенного землетрясения по всем защищаемым пунктам. Возможен экспорт этих распределений в текстовые файлы. В режиме просмотра для выбранного пункта и выбранного землетрясения в отдельном окне можно отрисовать соответствующую мареограмму.

5. Защищаемые пункты.

В приведенной ниже таблице 1 перечислены *защищаемые пункты, вошедшие в область «Карагинский залив»*, их «исходные» географические координаты, координаты в терминах выбранного Исполнителем фрагмента 1-минутной сетки, отклонение этих значений от «исходных» и значения глубин. Анализ таблицы показывает, что выбранная детальность расчета позволила достаточно точно аппроксимировать локализацию защищаемых пунктов за исключением пункта «Петропавловский маяк».

Таблица 1

Таблица защищаемых пунктов

N	name	Phi-0	Psi-0	phi	psi	D-ij
5	KNP m. Zheltyj	157.7	51.63	157.7	51.55	4
6	? GMS Vodopadnaja	158.07	51.83	158.0833	51.8	13.2549
7	RSB buhta Hodutka	158.08	51.77	158.0833	51.8	13.2549

8RSB buhta Asacha	158.3	52.13	158.3167	52.11667	6.362921
9RSB buhta Zhirovaja	158.43	52.6	158.4333	52.6	3.058824
10Buhta Russkaja (mys Vhodnoj)	158.5	52.43	158.5	52.43333	2.005988
11RSB buhta Listvinichnaja (mys Povorotnyj)	158.57	52.33	158.5667	52.33333	5.921569
12RSB buhta Bol'shaja Sarannaja(mys Sarannyj)	158.57	52.77	158.5667	52.76667	2.005988
13g. Petropavlovsk-Kamchatskij	158.58	53.02	158.5833	53.03333	1.972056
14vhod v Avachin. Buhtu (Mys majachnyj)	158.7	52.9	158.7	52.88333	1.952096
15 Petropavlovskij majak	158.72	53.02	158.7	53.01667	-160.293
16byshee selo Halaktyrka	158.87	53	158.8667	53	0.941176
17RSB ust'e r. Nalychevo	159.25	53.02	159.25	53.15	1
18RSB ust'e r. Ostrovnaja	159.55	53.25	159.55	53.23333	1.982036
19RSB ust'e r. Berezovaja	159.85	53.83	159.85	53.81667	1.001996
20RSB ust'e r. Zhupanovo	159.87	53.67	159.8667	53.68889	2.980392
21RSB ust'e r. Karymskaja	159.88	53.97	159.9167	53.96667	1.929553
22RSB buhta Bol'shaja Medvezhka	159.95	53.33	159.95	53.33333	12.01597
23GMS Semjachik	159.98	54.1	160	54.1	4
24Kordon Zhupanovo	159.98	54.12	160	54.16667	2.003992
25GMS Kronoki /buhta Ol'ga/	161.2	54.62	161.1667	54.56667	7.049196
26Mys Kozlova	161.7	54.5	161.7167	54.5	1
27RSB ust'e r. Storozh	161.73	55.4	161.7333	55.4	1.039216
28Ust'e r. Bol'shaja Chazhma	161.87	55.07	161.8667	55.08333	0.693906
29Selo Hajljulja	162	58.15	162.0167	58.15	4.843137
30Majak mys Kronockij	162.13	54.75	162.15	54.75	10
31Selo Uka	162.14	57.92	162.1167	57.88333	0.970764
32Mys Kamenistyj	162.15	54.83	162.15	54.83333	0.934132
33Selo Ivaschka	162.27	58.54	162.2833	58.51667	6.045204
34Selo Pankara	162.34	58.6	162.3333	58.6	2.052836
35Ust'Kamchatsk	162.47	56.27	162.4667	56.21667	0.97276
36Selo Dranka	162.58	58.76	162.5833	58.75	5.039216
37Selo Makar'evskoe	162.74	58.86	162.75	58.81667	3.005988
38RSB ust'e r. Ozernaja	162.78	57.37	162.8	57.35	6
39Ossora	163.08	59.3	163.0833	59.25	3.039216
40Poselok Ossora	163.09	59.3	163.0833	59.25	3.039216
41Selo Tymlat	163.2	59.48	163.2	59.5	2
42Selo Kostroma	163.21	59.17	163.2167	59.16667	2.968416
43Selo Nagornyj	163.22	59.49	163.2167	59.5	1.019608
44GMS mys Ozernoj	163.23	57.6	163.2333	57.6	10.2549
45? GMS m. Afrika	163.33	56.27	163.35	56.26667	12.99601
46Selo Krasnoe	163.45	59.85	163.45	59.83333	5.97006
47Ust'e r. Kichiga	163.51	59.78	163.4667	59.83333	7.930844
48Selo Jagodnoe	163.55	58.86	163.6667	58.71667	5.9973
49Selo Anapka	163.75	59.94	163.7667	59.93333	3.860749
50Karaginskij ostr. rybozavod	163.87	58.97	163.85	58.96667	2.972056
51Poselok Il'pyrskij	164.28	59.97	164.2833	59.96667	3.019608
52Selo Ol'hovaja	164.45	60.07	164.45	60.1	3

53Selo Peschanoe	164.66	59.9	164.6667	60	4
54Mys Il'pinskij	164.88	59.73	164.8833	59.78333	6.978044
55Selo Geka	165.25	60.08	165.25	60.08333	2.96008
56Selo Vyvenka	165.51	60.13	165.5167	60.18333	2.873664
57Selo Medvezhka	165.75	60.28	165.75	60.25	4
58Nicol'skoe	165.98	55.2	165.9667	55.18333	4.025244
59Korf	166	60.37	166	60.35	3
60Selo Oljutorka	166.1	60.31	166	60.35	3
61Selo Telichiki	166.11	60.44	166.1167	60.41667	3.001996
62Selo Kultushino	166.26	60.47	166.2667	60.45	4.960784
63GMS buhta Lavrova	167.09	60.33	167.1	60.31667	3.003992
64Selo Preobrazhenskoe	167.58	54.78	167.5833	54.78333	1.04356
65Poselok Pahacha	169.22	60.54	169.2167	60.55	1.019608
66Apuka	169.62	60.39	169.6333	60.41667	5.005988
67GMS Krasnaja	172.76	61.24	172.7667	61.21667	7.992368

Для каждого защищаемого пункта помимо основного мареографа были определены «соседние» мареографы. Цель этого шага очевидна – получить возможность для оценки пространственной устойчивости результатов моделирования.

6. Исторические сведения

Выбор расчетной области и конструирование набора модельных цунамигенных землетрясений был осуществлен на основе анализа доступных исторических сведений и экспертных оценок сейсмотектонической обстановки исследуемого региона. На рисунке 1 изображена карта сейсмичности и очагов исторических цунами. В **приложении 1** приведена таблица известных исторических землетрясений вблизи п-ва Камчатка. Имя файла, содержащего это приложение – `1_List_eartquakes.txt`.

Эта таблица получена с использованием последней версии информационной системы WinITDB, в столбцах таблицы указаны дата события (Year, Mon, Day, Hour, Min, Sec) координаты его гипоцентра (Lat, Lon), его глубина (Depth) и магнитуда (Ms).

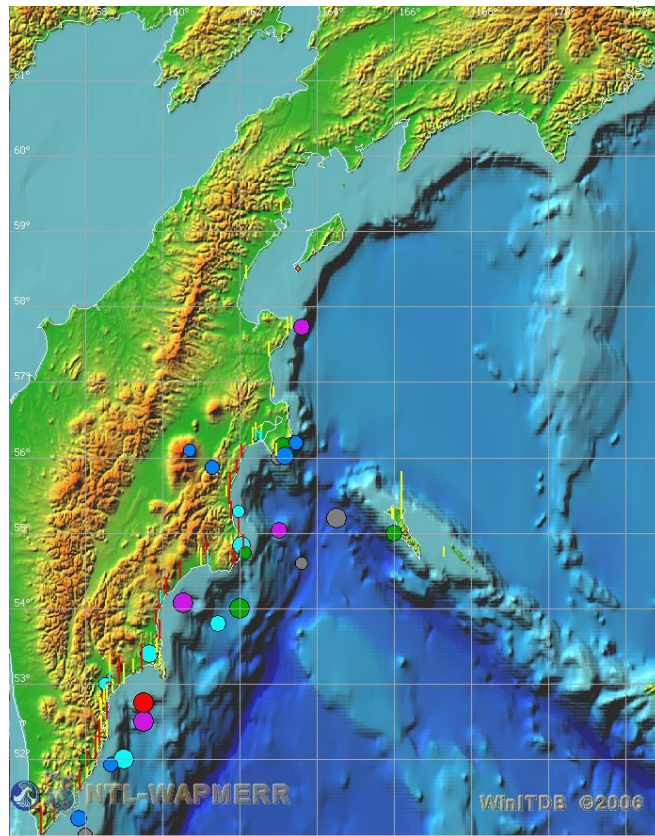


Рисунок 1. Карта очагов исторических цунами

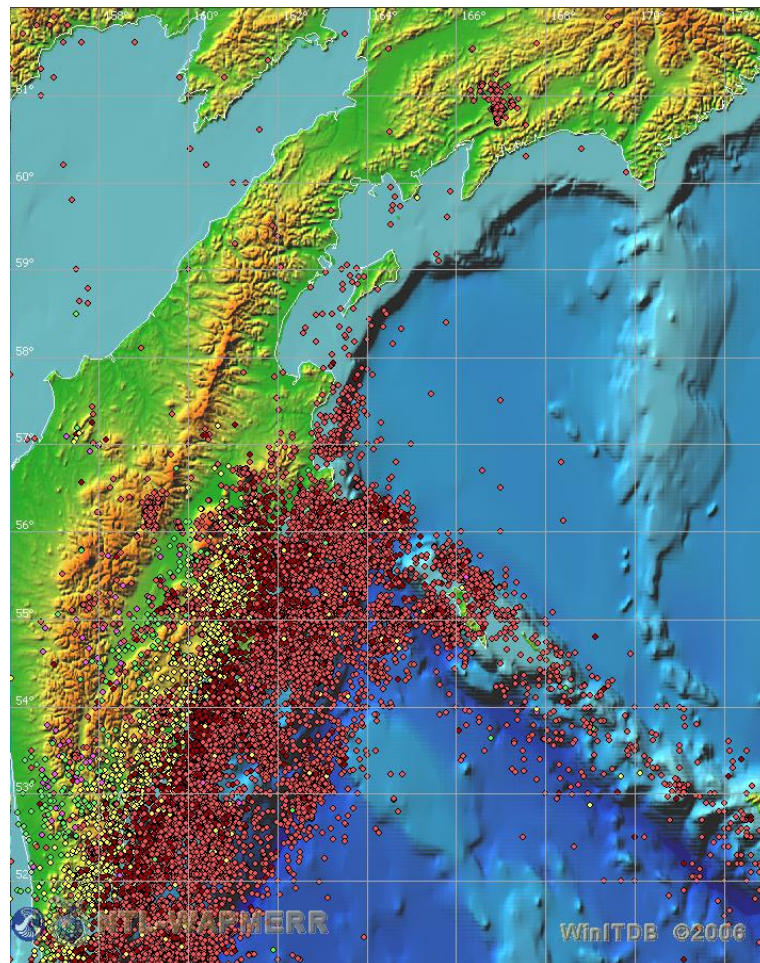


Рисунок 2. Карта сейсмичности

На рисунке 1. изображены также известные из хроник высоты волн в отдельных пунктах побережья. Соответствующая тестовая информация содержится в **приложении 2** (2_List_tsunamis.txt) и в **приложении 3** (3_List_TsunamiWaveHights.txt).

7. Концепция конструирования набора модельных источников

На основе предварительного анализа и с привлечением специалистов-сейсмологов, хорошо знающих специфику рассматриваемого региона (А.Гусев), была выделена зона вероятного расположения критических очагов цунами и предложены наборы их параметров (см. Таблицы 2–5 и **приложение 4** – файл 4_List_sources.txt).

Как следует из рисунков 3-6 из множества модельных цунамигенных землетрясений, построенных на Втором этапе выполнения работы, были выделены четыре подгруппы модельных землетрясений, различающихся по магнитудам – 7.8, 8.1, 8.4, 9.0.

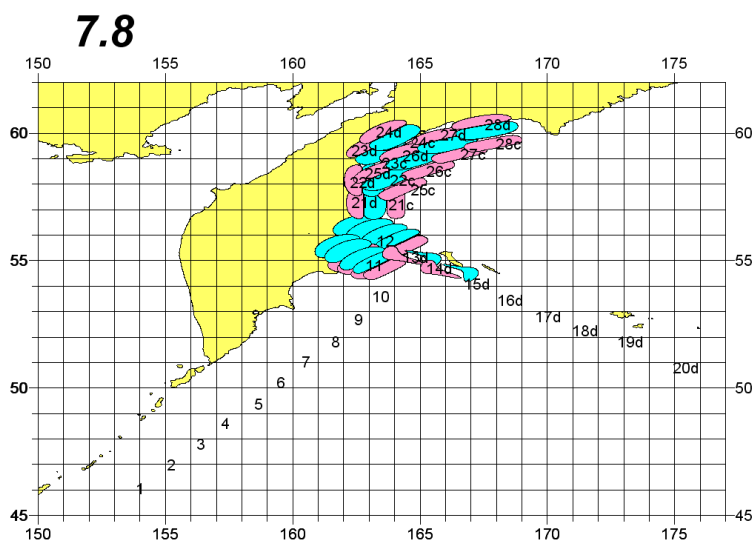


Рисунок 3. Схема размещения модельных землетрясений с магнитудой 7.8.

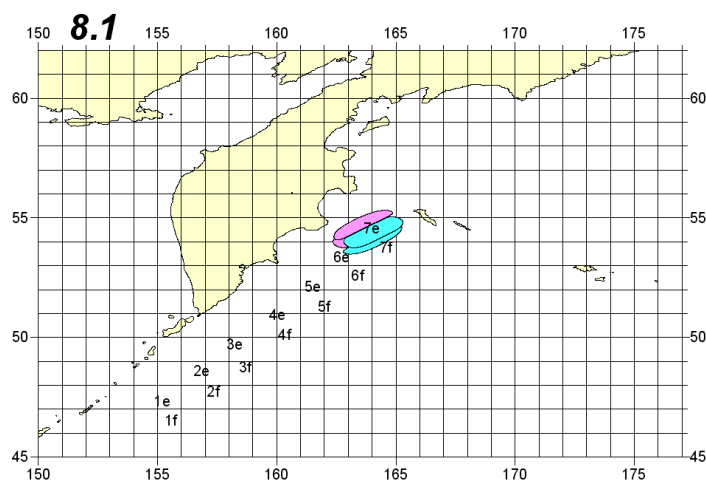


Рисунок 4. Схема размещения модельных землетрясений с магнитудой 8.1.

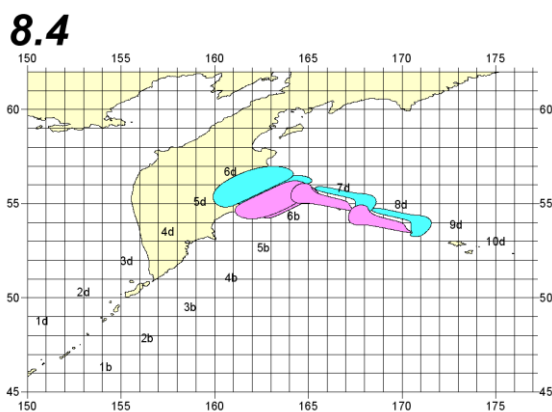


Рисунок 5. Схема размещения модельных землетрясений с магнитудой 8.4.

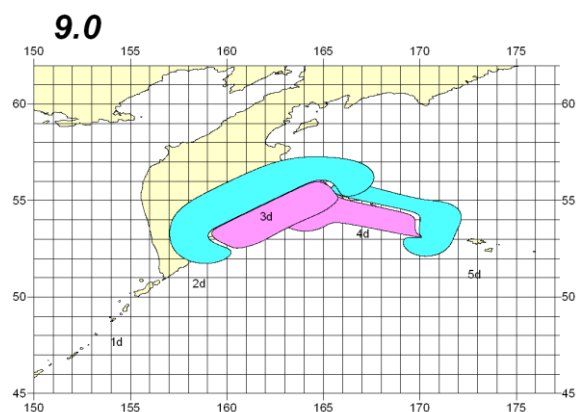


Рисунок 6. Схема размещения модельных землетрясений с магнитудой 9.0.

8. Расчетная область «Карагинский залив»

В соответствии с концепцией конструирования набора модельных источников в качестве базовой акватории для выполнения работ был выбран район, простирающийся по долготе от 156 до 173 градусов Восточной долготы и по широте от 51 до 62 градусов Северной широты: Изображение рельефа дна и суши исследуемого фрагмента представлено на рисунке 7.

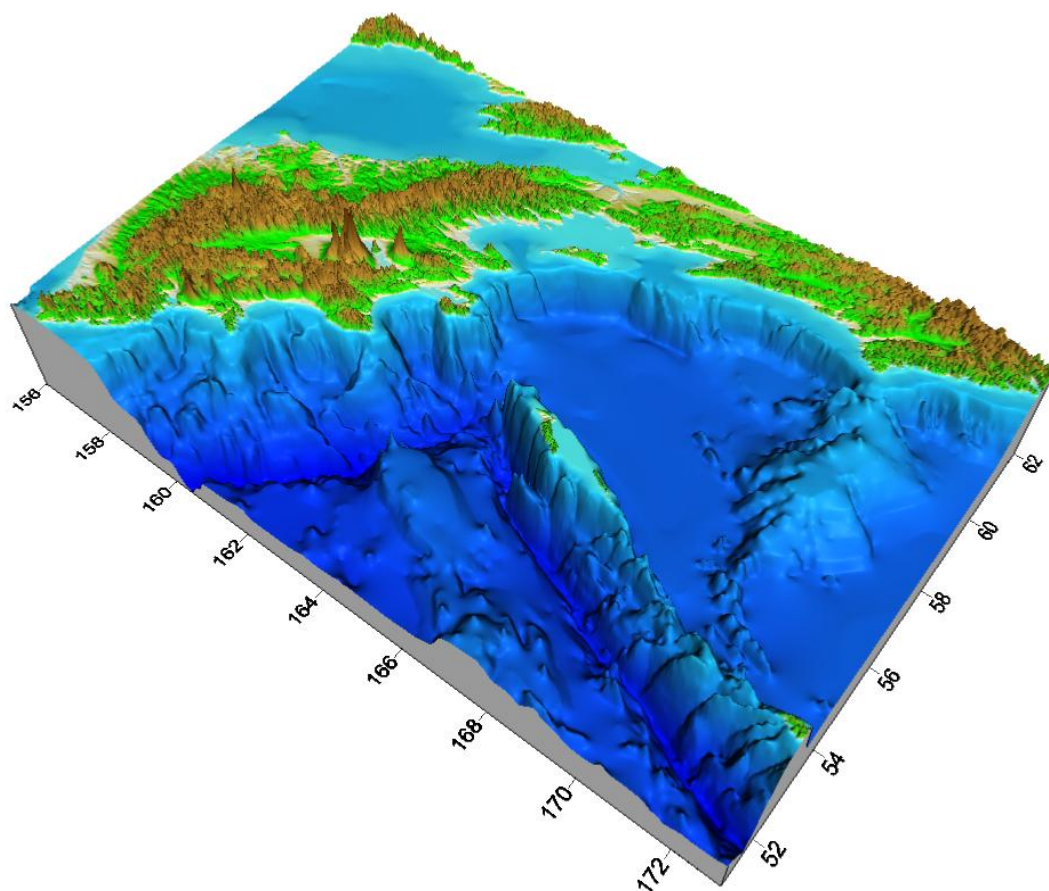


Рисунок 7. Рельеф дна в области «Карагинский залив»

Таблица 2

Параметры модельных землетрясений с магнитудой 7.8

Name	Lat	Long	L	W	DE	LA	TE	D0	H_top	N	M
1a	46.75	153.35	108	38	15	90	58	3.42	5	231	115
1b	46.93	152.85	108	38	15	90	58	2.74	15	231	115
1c	47.1	152.35	108	38	15	90	58	2.74	25	231	115
1d	47.3	152	108	38	15	90	58	2.74	35	231	115
2a	47.55	154.38	108	38	15	90	58	3.42	5	231	115
2b	47.7	153.95	108	38	15	90	58	2.74	15	231	115
2c	47.9	153.55	108	38	15	90	58	2.74	25	231	115
2d	48.1	153.1	108	38	15	90	58	2.74	35	231	115
3a	48.35	155.45	108	38	15	90	58	3.42	5	231	115
3b	48.55	155.05	108	38	15	90	58	2.74	15	231	115
3c	48.73	154.63	108	38	15	90	58	2.74	25	231	115
3d	48.9	154.2	108	38	15	90	58	2.74	35	231	115
4a	49.15	156.58	108	38	15	90	58	3.42	5	231	115
4b	49.35	156.18	108	38	15	90	58	2.74	15	231	115
4c	49.55	155.75	108	38	15	90	58	2.74	25	231	115
4d	49.7	155.3	108	38	15	90	58	2.74	35	231	115
11a	54.88	163.3	108	38	15	90	50	3.42	5	231	115
11b	55	162.85	108	38	15	90	50	2.74	15	231	115
11c	55.25	162.35	108	38	15	90	50	2.74	25	231	115
11d	55.4	162	108	38	15	90	50	2.74	35	231	115
12a	55.75	164.15	108	38	15	90	50	3.42	5	231	115
12b	55.9	163.7	108	38	15	90	50	2.74	15	231	115
12c	56.05	163.2	108	38	15	90	50	2.74	25	231	115
12d	56.2	162.75	108	38	15	90	58	2.74	35	231	115
13d	55.3	164.75	108	38	10	170	110	3.42	5	231	115
14d	54.75	166.23	108	38	10	170	110	3.42	5	231	115
21c	57.25	163.75	108	38	35	90	0	3.42	5	231	115
21d	57.25	163.23	108	38	125	90	0	3.42	5	231	115
22c	58.13	163.65	108	38	35	90	0	3.42	5	231	115
22d	58.15	163.18	108	38	125	90	0	3.42	5	231	115
23c	59.05	163.9	108	38	35	90	45	3.42	5	231	115
23d	59.25	163.5	108	38	125	90	45	3.42	5	231	115
24c	59.55	164.45	108	38	35	90	45	3.42	5	231	115
24d	59.8	164.05	108	38	125	90	45	3.42	5	231	115
25c	57.95	164.1	108	38	35	90	50	3.42	5	231	115
25d	58.2	163.75	108	38	125	90	50	3.42	5	231	115
26c	58.7	165.15	108	38	35	90	60	3.42	5	231	115
26d	58.95	164.8	108	38	125	90	60	3.42	5	231	115
27c	59.33	166.4	108	38	35	90	65	3.42	5	231	115
27d	59.55	166.1	108	38	125	90	65	3.42	5	231	115
28c	59.75	167.75	108	38	35	90	70	3.42	5	231	115
28d	60.08	167.65	108	38	125	90	70	3.42	5	231	115

Таблица 3

Параметры модельных землетрясений с магнитудой 8.1

Name	Lat	Long	L	W	DE	LA	TE	D0	H_top	N	M
7e	54.3	164.18	150	52	135	90	50	5.1	5	231	115
7f	54.5	163.45	150	52	45	90	50	5.1	5	231	115

Таблица 4

Параметры модельных землетрясений с магнитудой 8.4

Name	Lat	Long	L	W	DE	LA	TE	D0	H_top	N	M
6b	55.45	163.3	215	75	15	90	50	6.1	5	231	115
6d	55.7	162.3	215	75	15	90	50	5.5	25	231	115
7d	55.55	166.5	215	75	10	170	110	6.1	5	231	115
8d	54.4	169.5	215	75	10	170	110	6.1	5	231	115

Таблица 5. Параметры модельных землетрясений с магнитудой 9.0

Name	Lat	Long	L	W	DE	LA	TE	D0	H_top	N	M
3d	54.9	161.5	430	150	15	90	50	11.6	5	201	101
4d	55	167.95	430	150	10	170	110	11.6	5	201	101

9. Результаты расчетов

Результаты численного моделирования процессов трансформации волн цунами в Карагинском заливе представлены в виде распределений максимальных и минимальных высот волн, рассчитанных в узлах одноминутной сетки за время расчета, выбранное на основе предварительного анализа. Этот параметр оказался равным 6 часам физического времени и обеспечил полное развитие процесса распространения волны и ее трансформации от зоны генерации до исследуемого участка побережья.

Полностью результаты приведена в **приложении 5** и в наборе файлов, размещенных в папке LIGHTNINGS. Ниже, на рисунках 8 –26 приведены характерные изображения указывающие на существенное различие цунами потенциала, которым обладают цунамигенные землетрясения, размещенные весьма компактно и в достаточно малой области. Все зависит от ориентации источника и, естественно от энергетических характеристик. Тщательный анализ представленных материалов позволяет сделать вывод о сравнительной опасности землетрясений, происходящих в различных районах акваторий, прилегающих к Карагинскому заливу.

3d-90

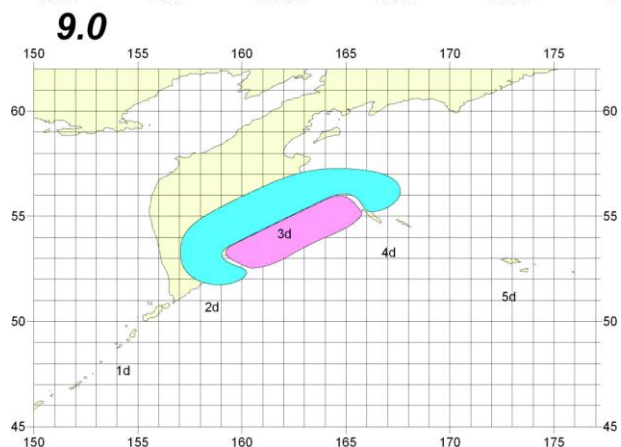
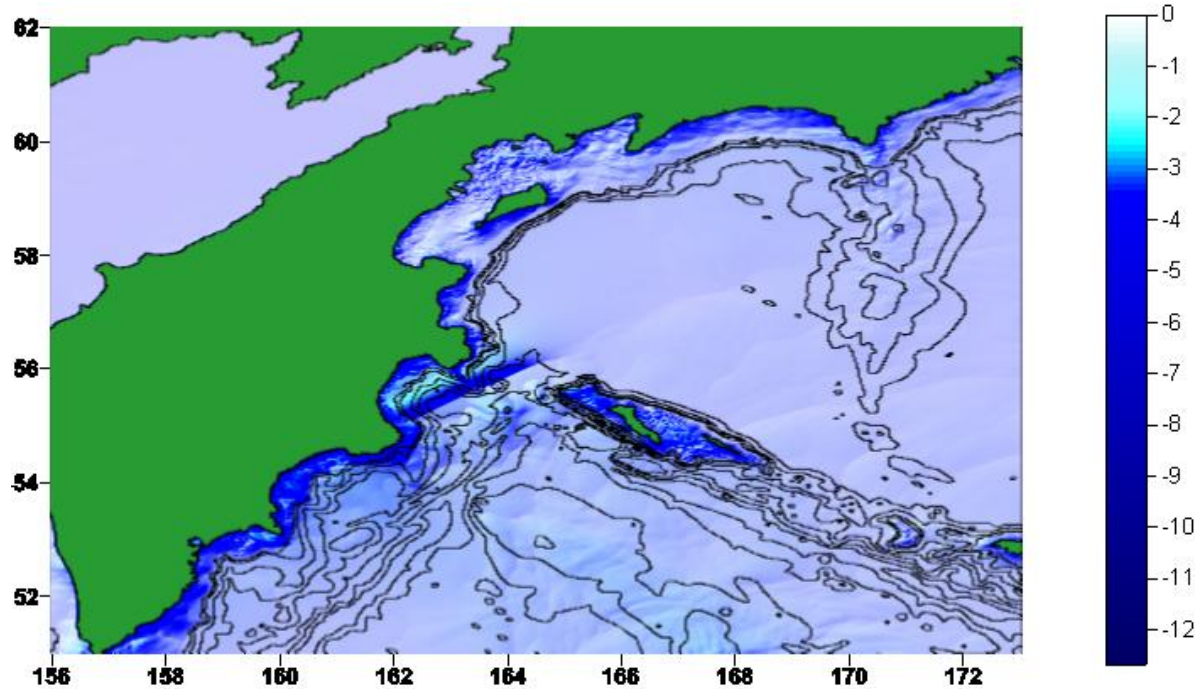
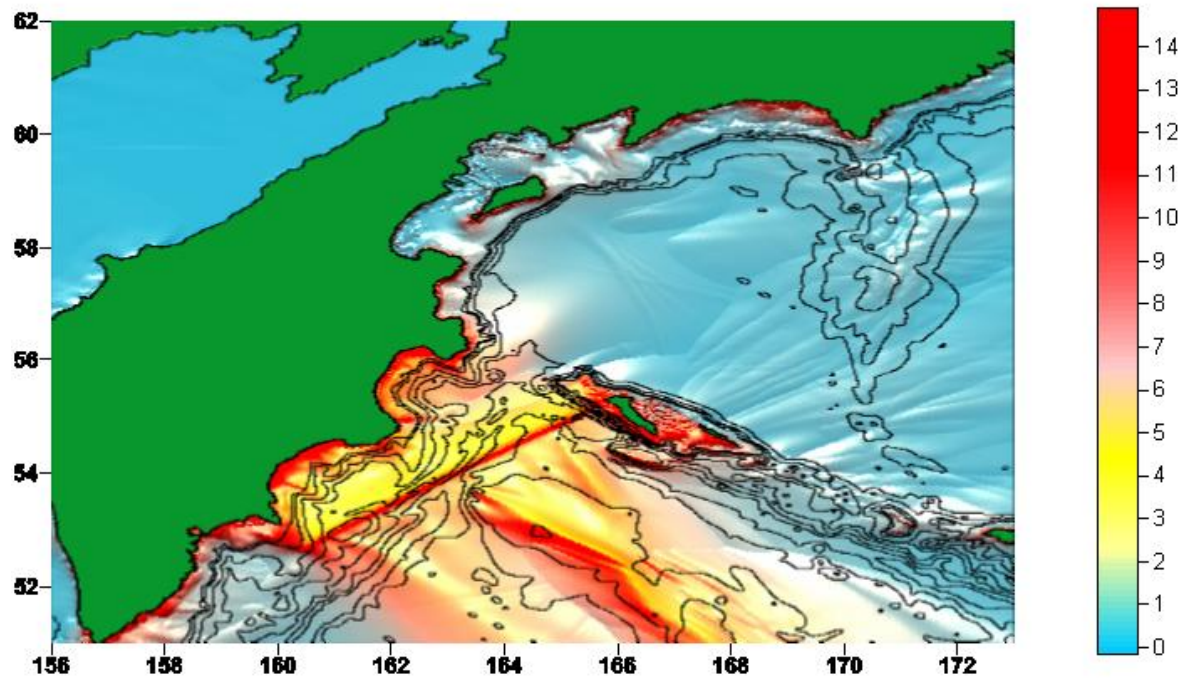


Рисунок 8.

4d-90

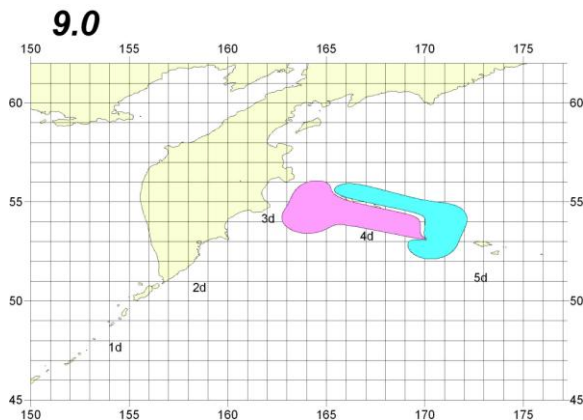
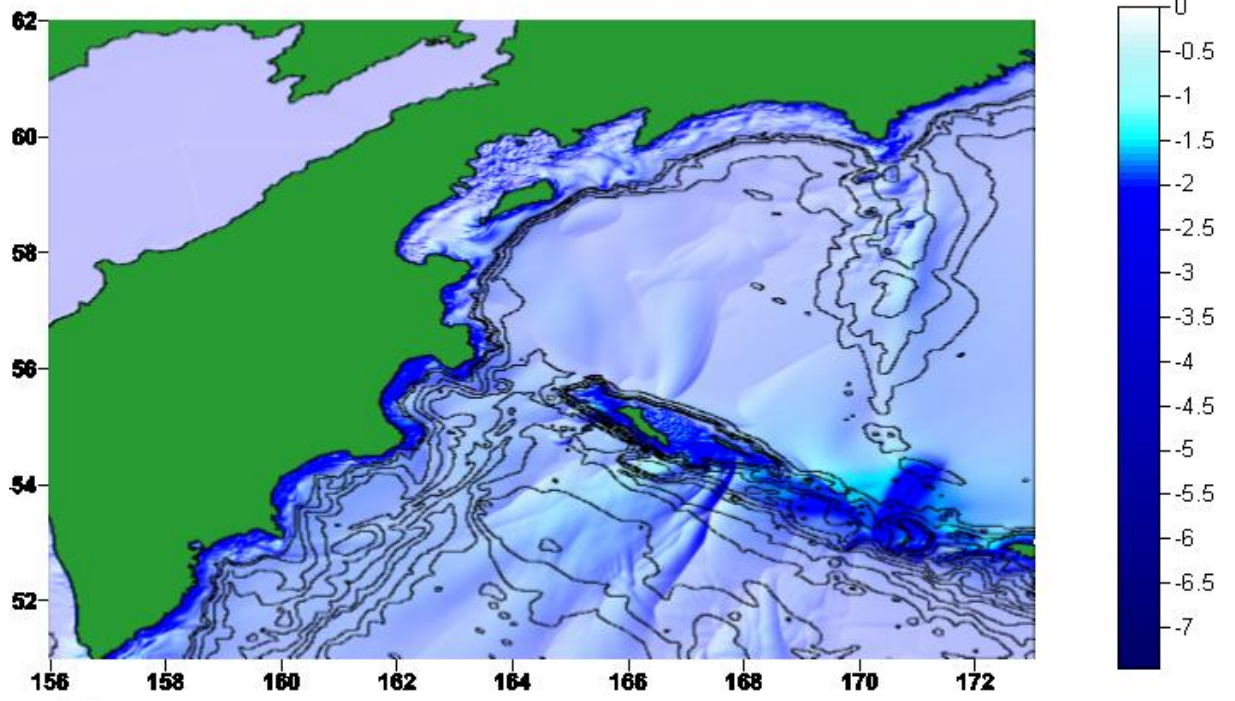
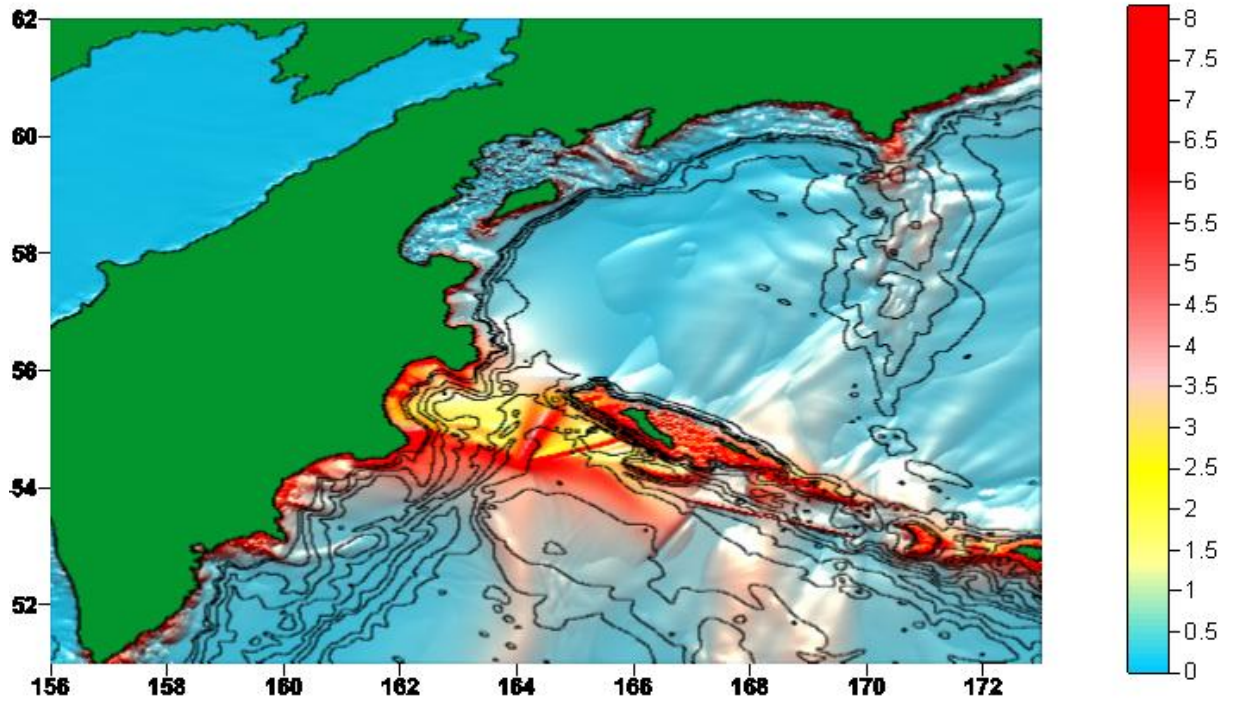
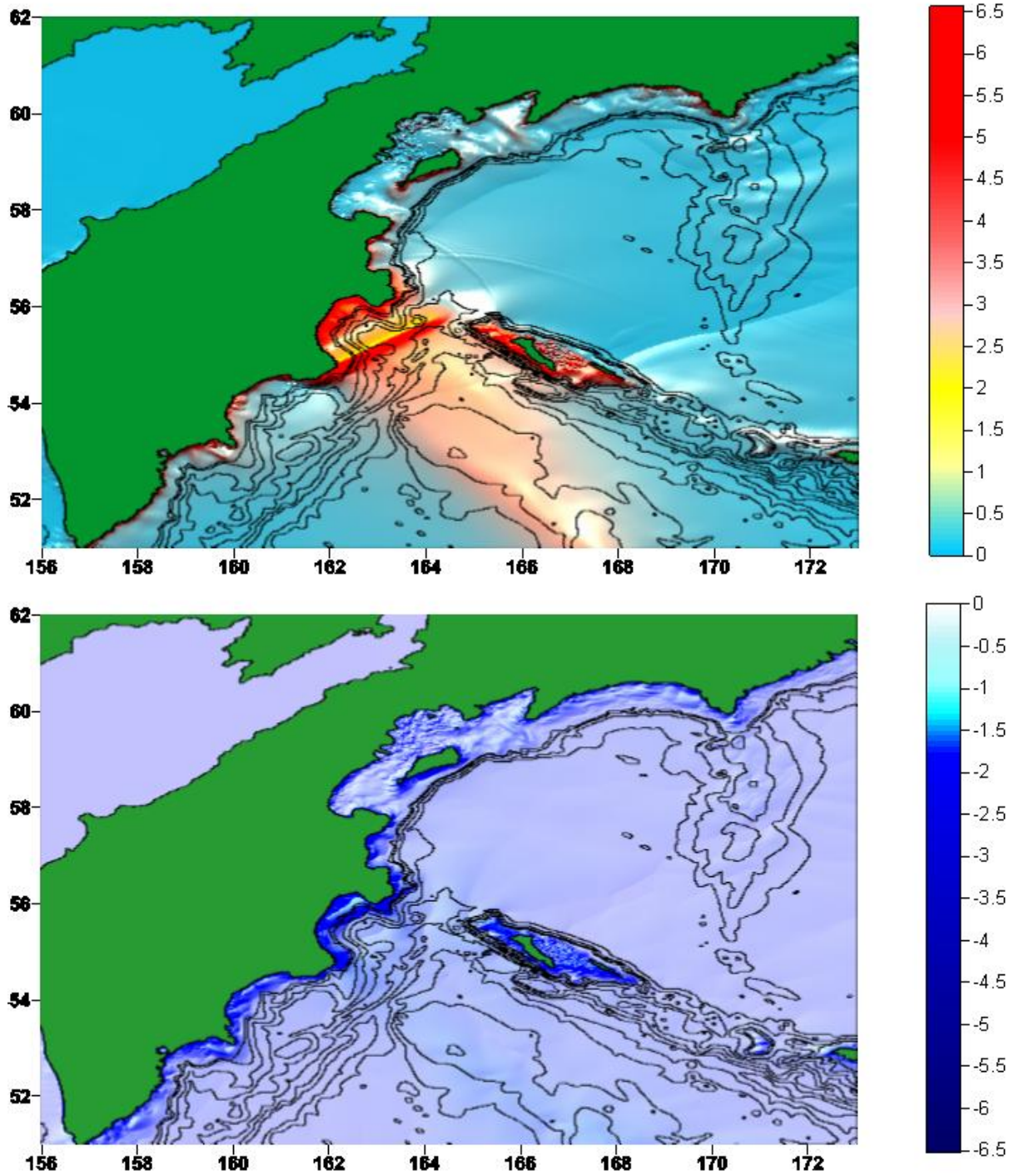


Рисунок 9.

6d-84



8.4

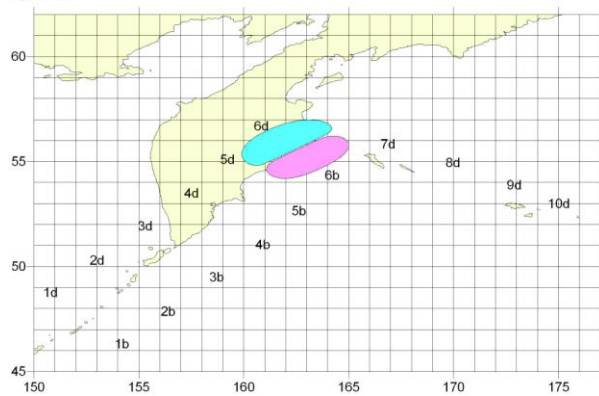
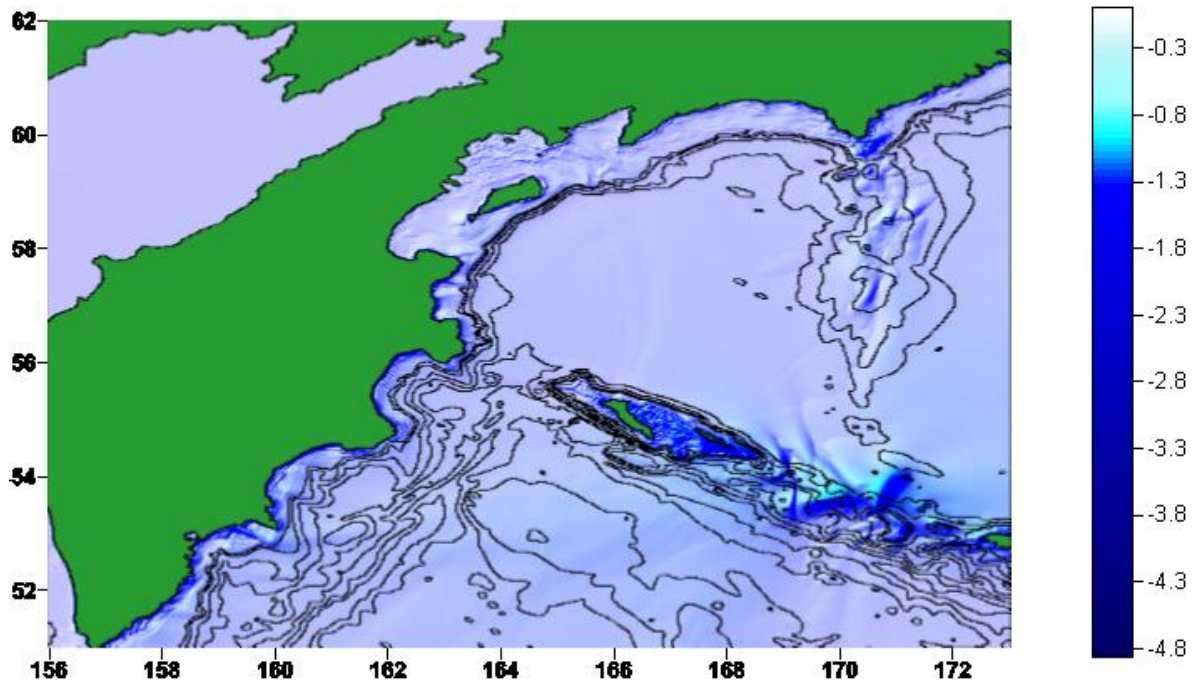
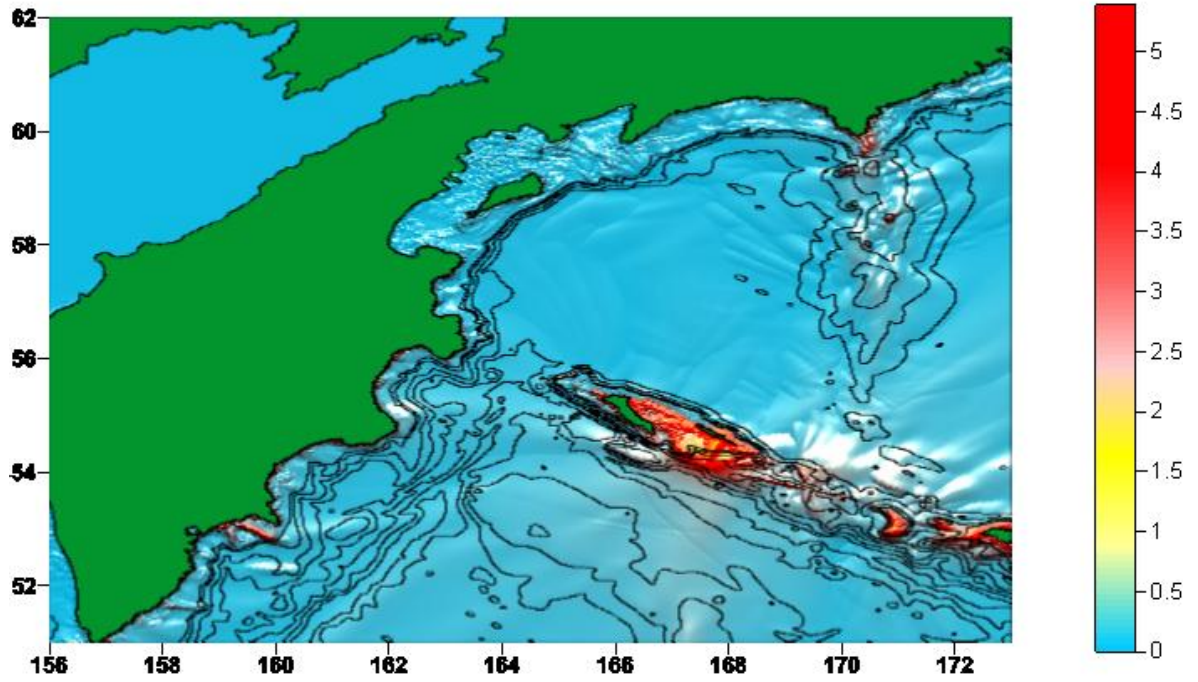


Рисунок 10.

8d-84



8.4

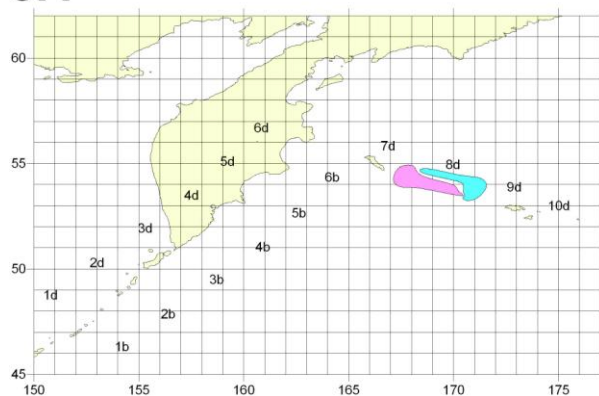


Рисунок 11.

7e-81

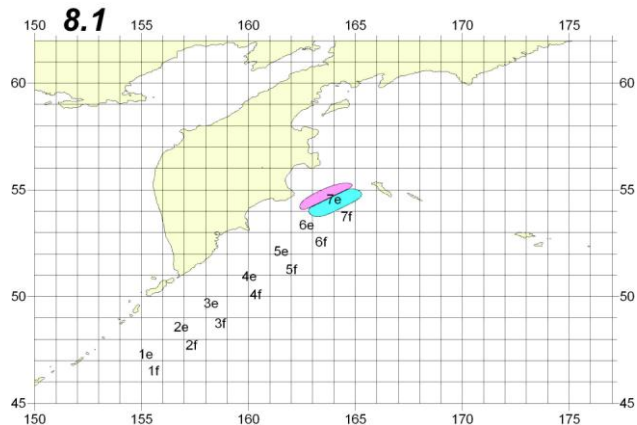
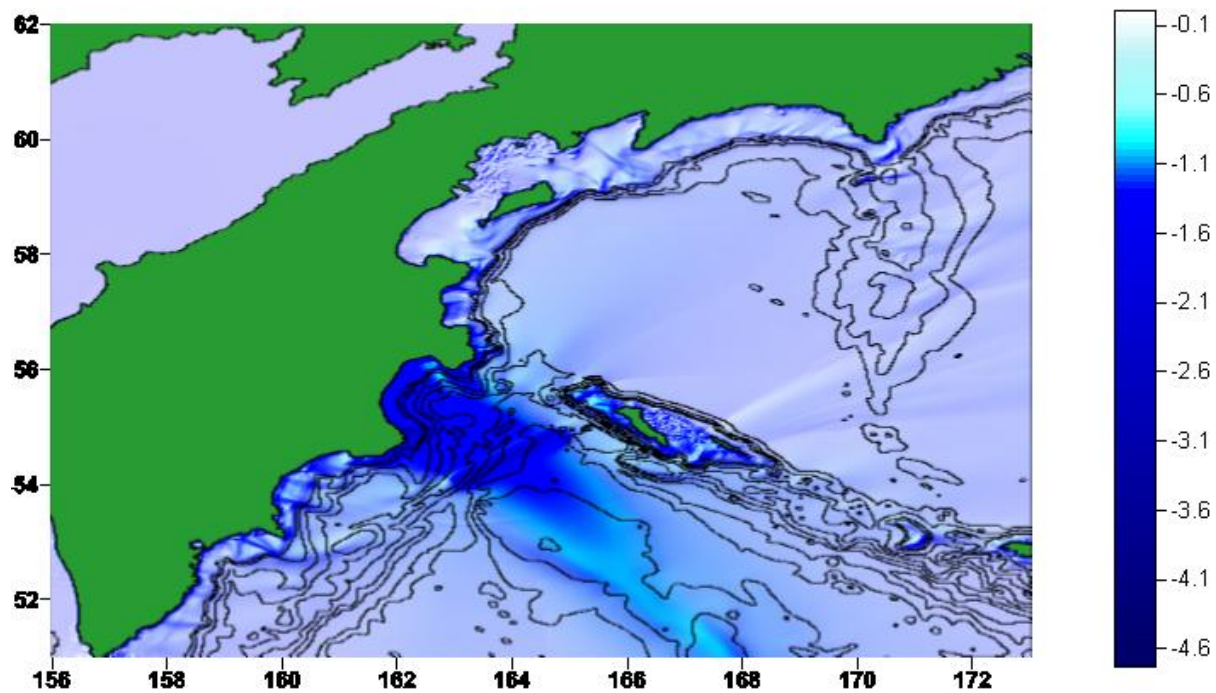
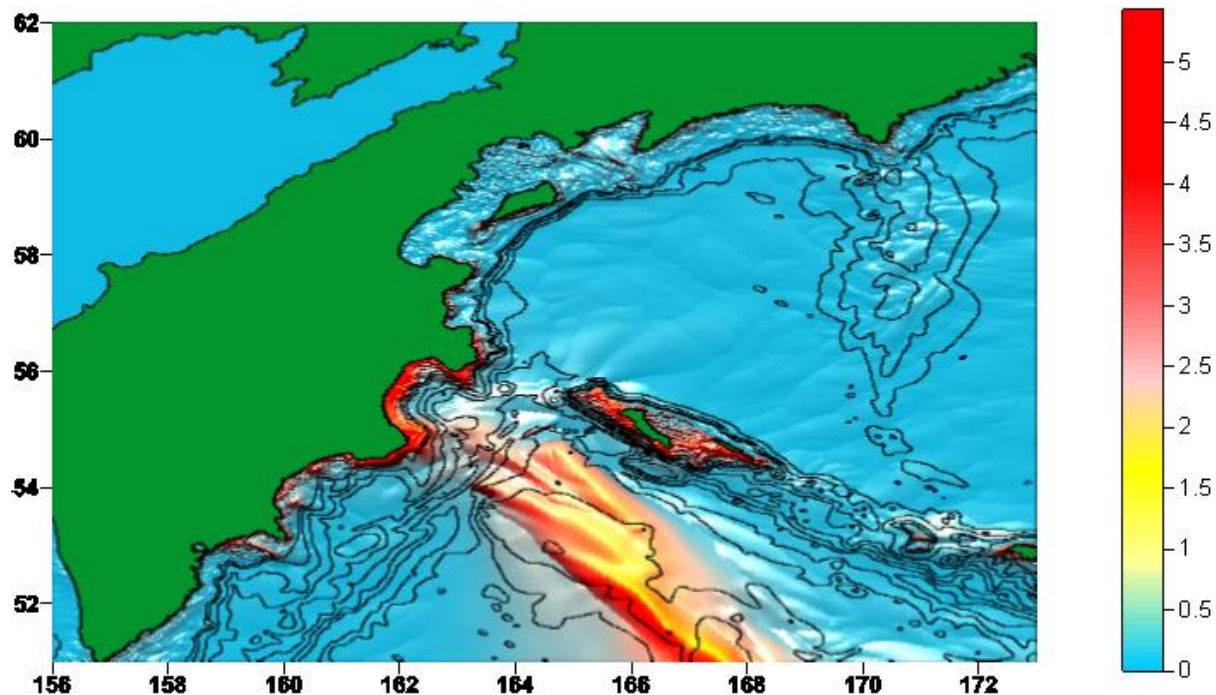


Рисунок 12.

7f-81

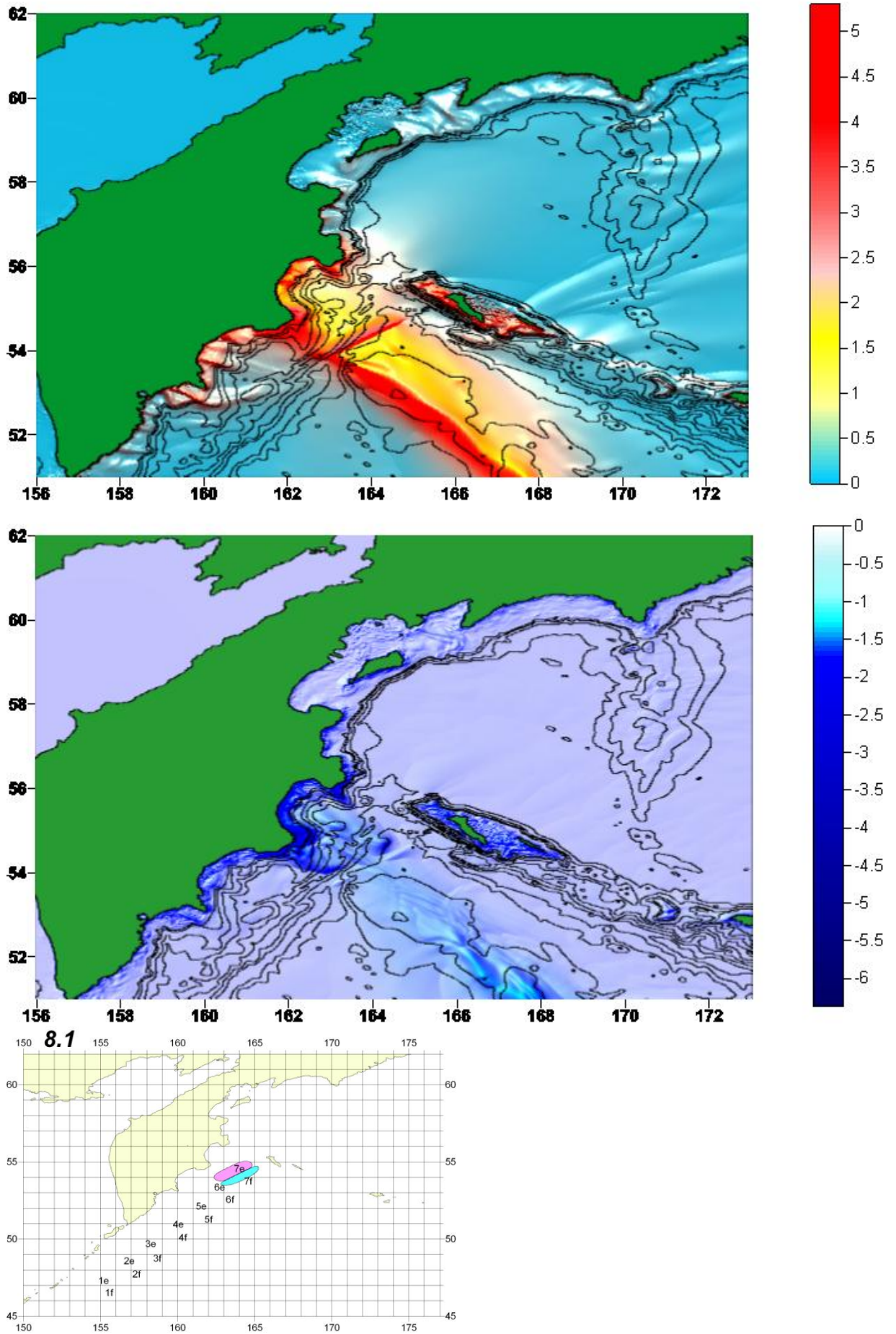
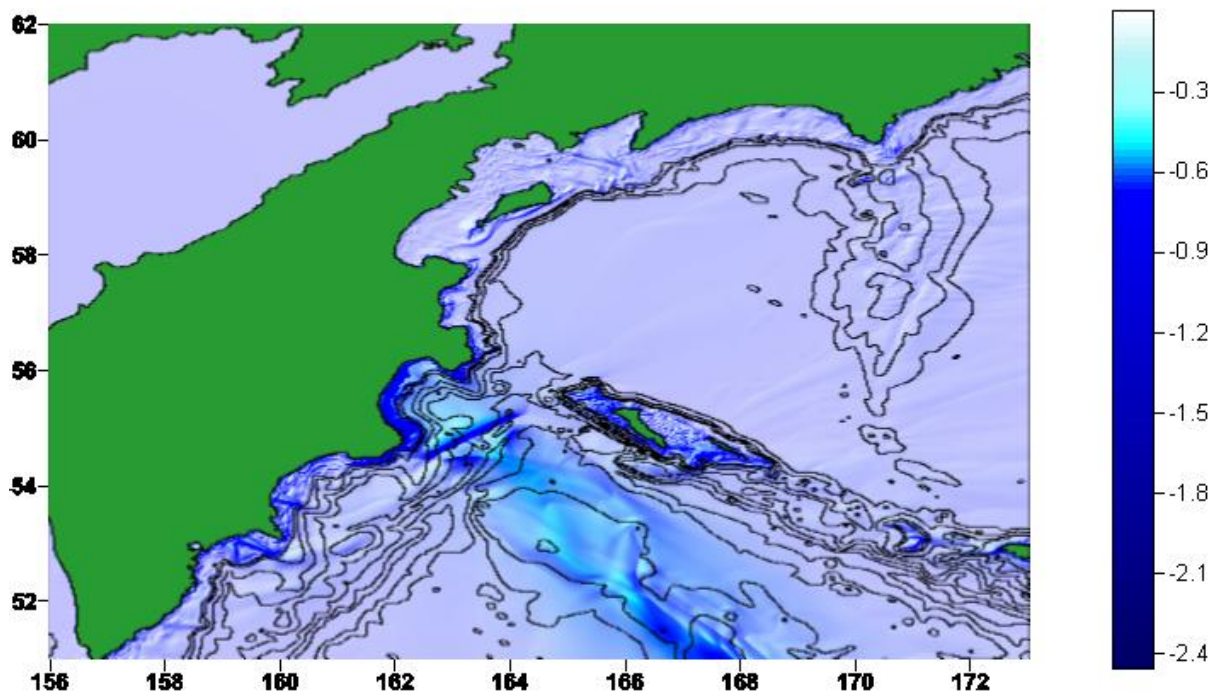
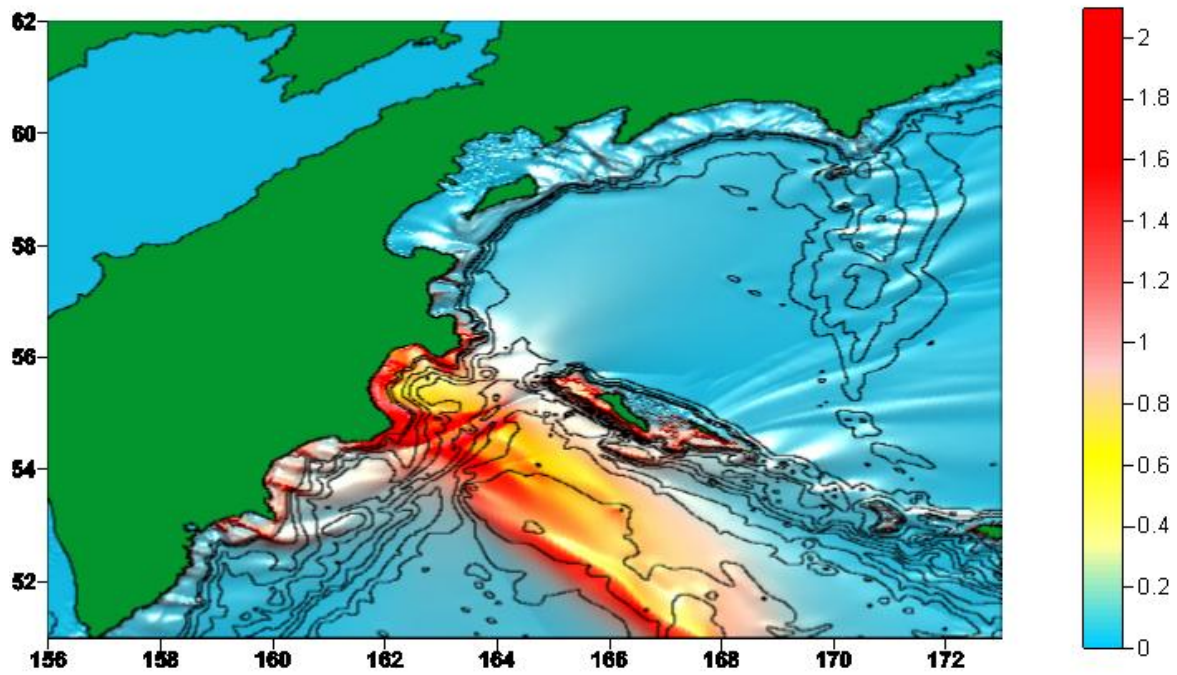


Рисунок 13.

11a-78



7.8

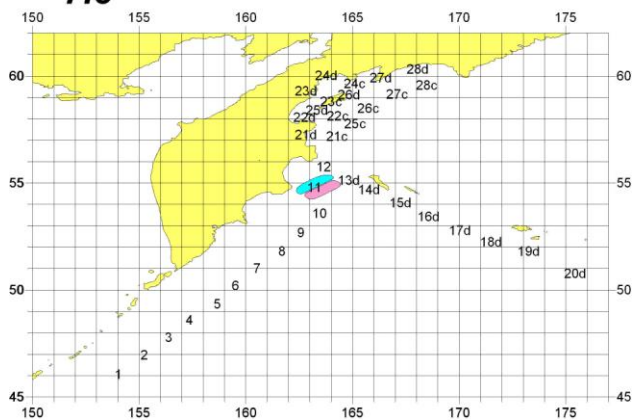


Рисунок 14.

11b-78

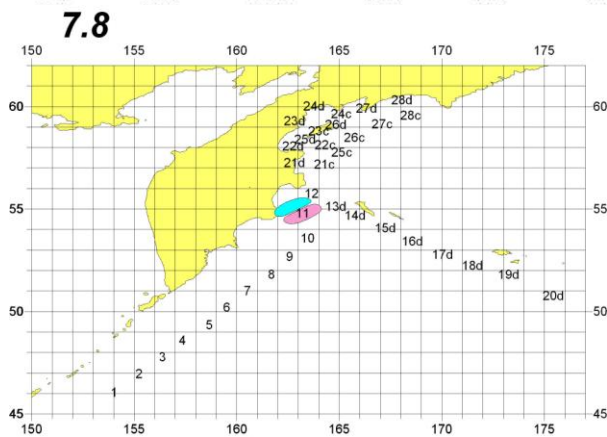
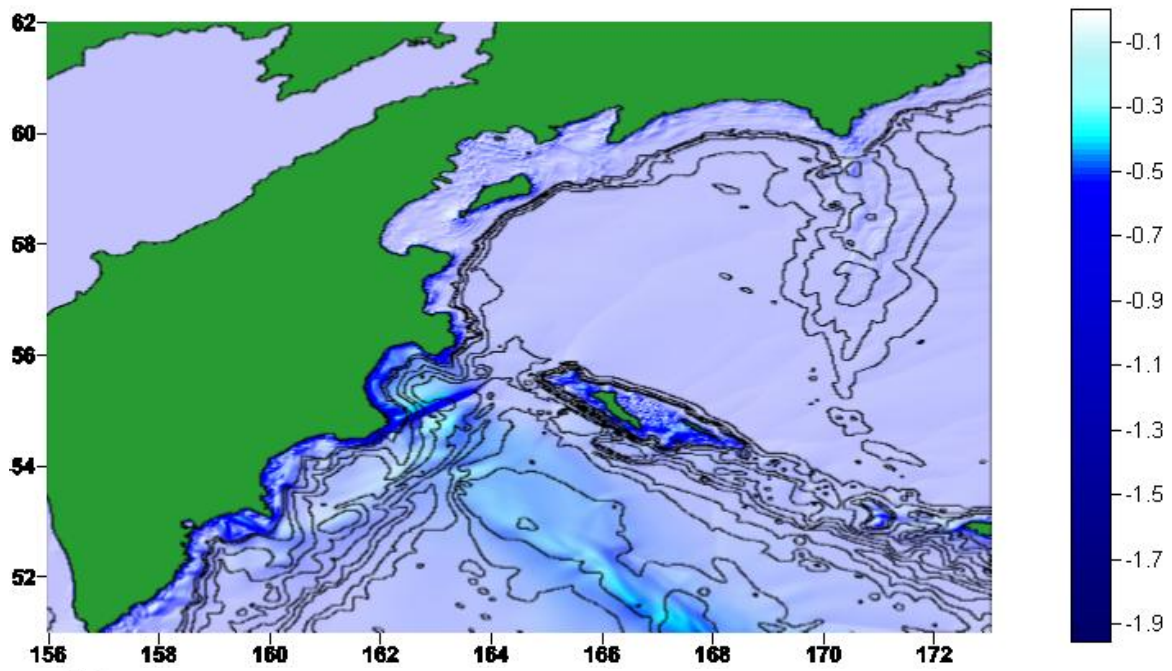
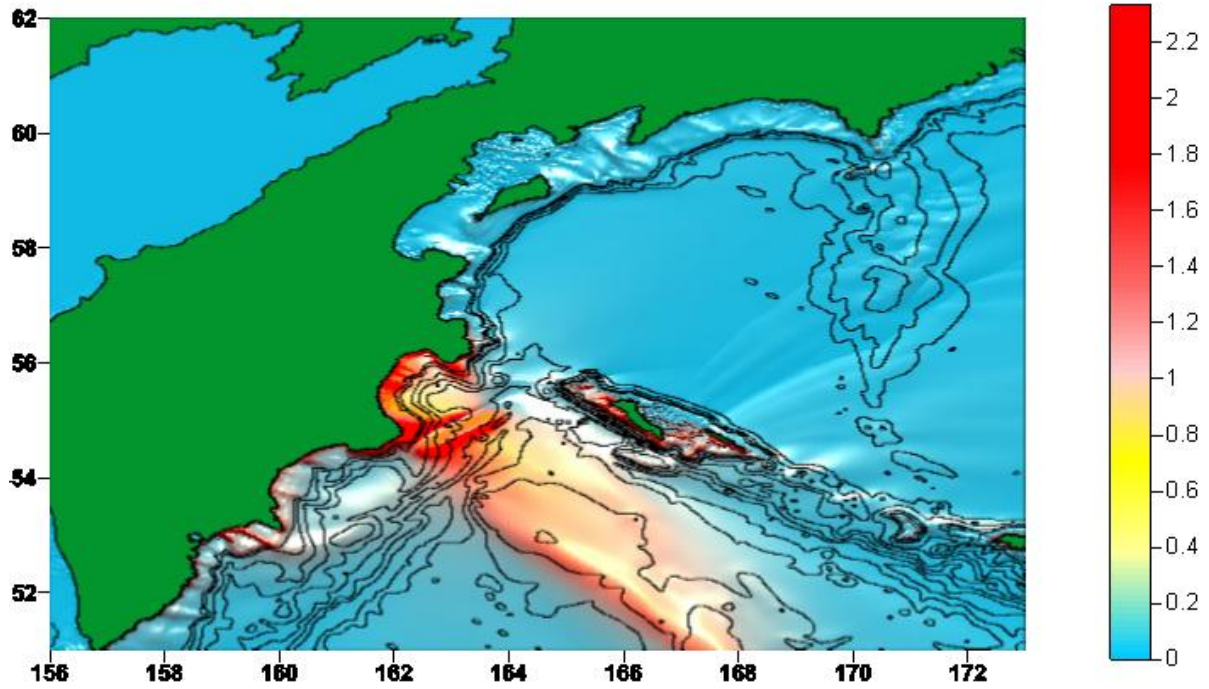
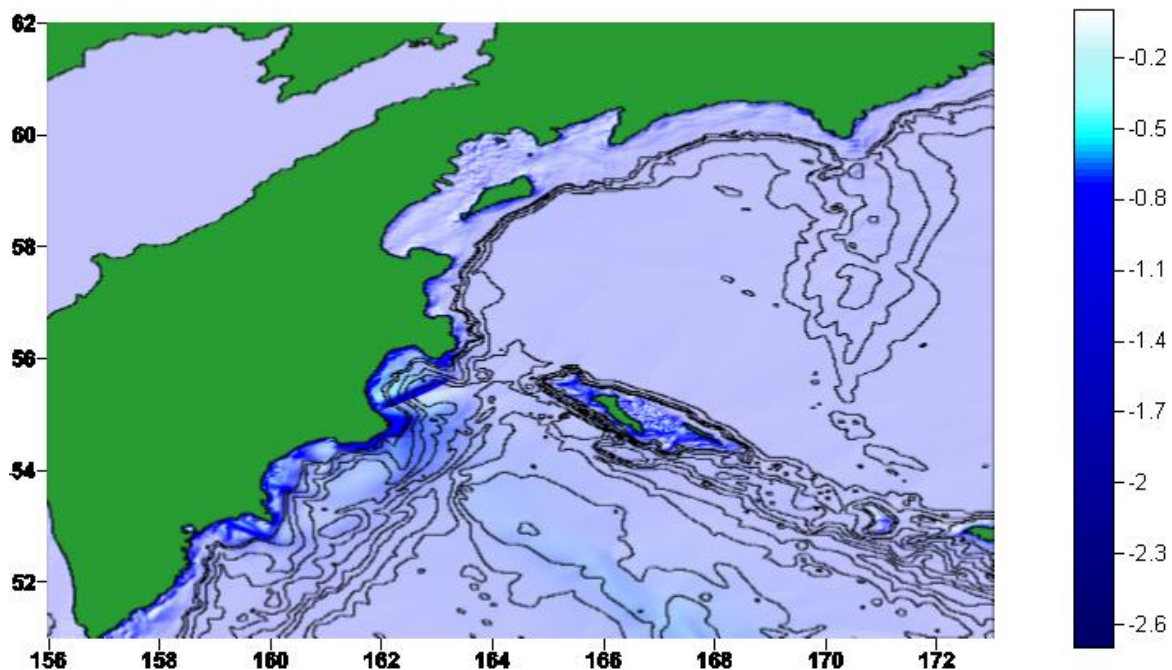
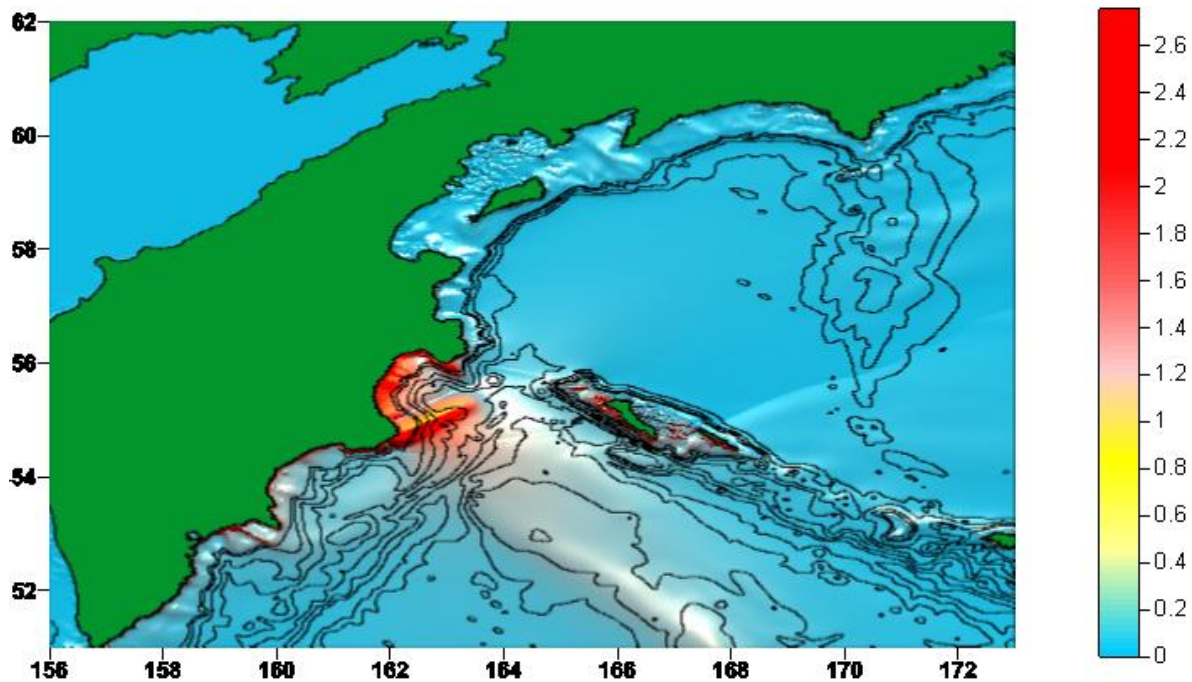


Рисунок 15.

11c-78



7.8

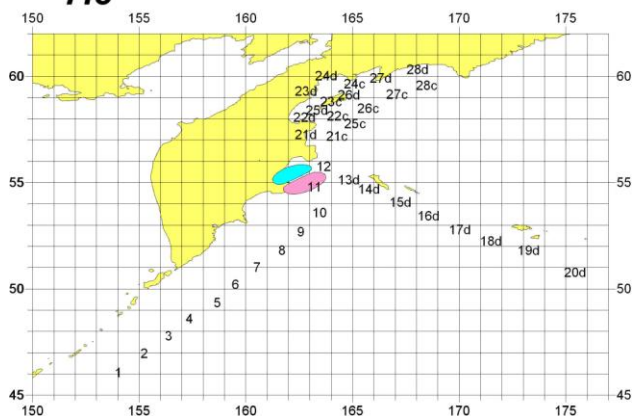
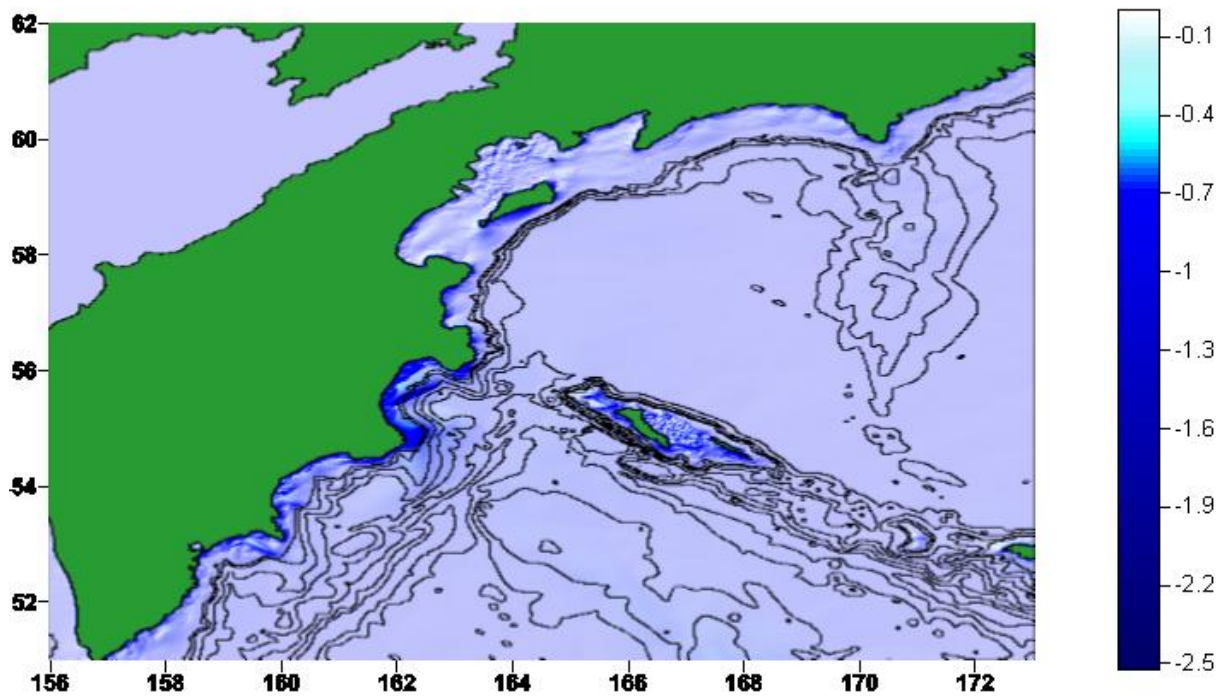
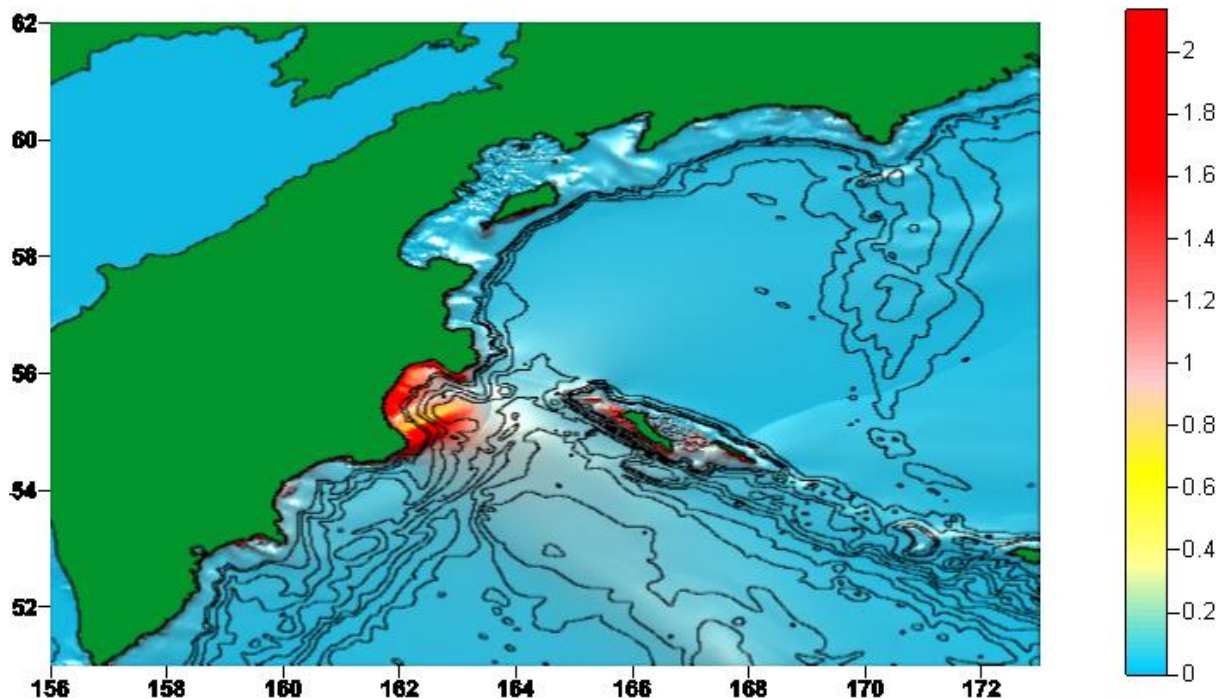


Рисунок 16.

11d-78



7.8

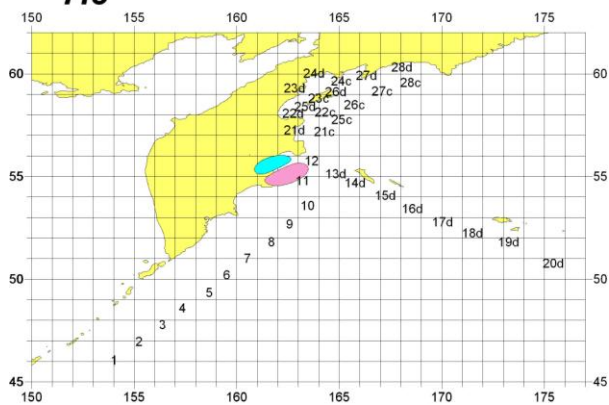


Рисунок 17.

21c-78

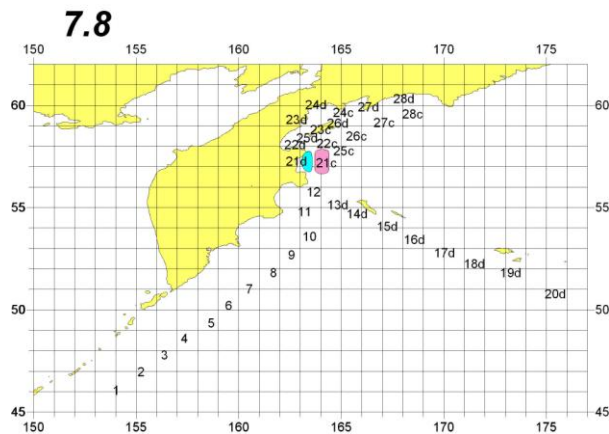
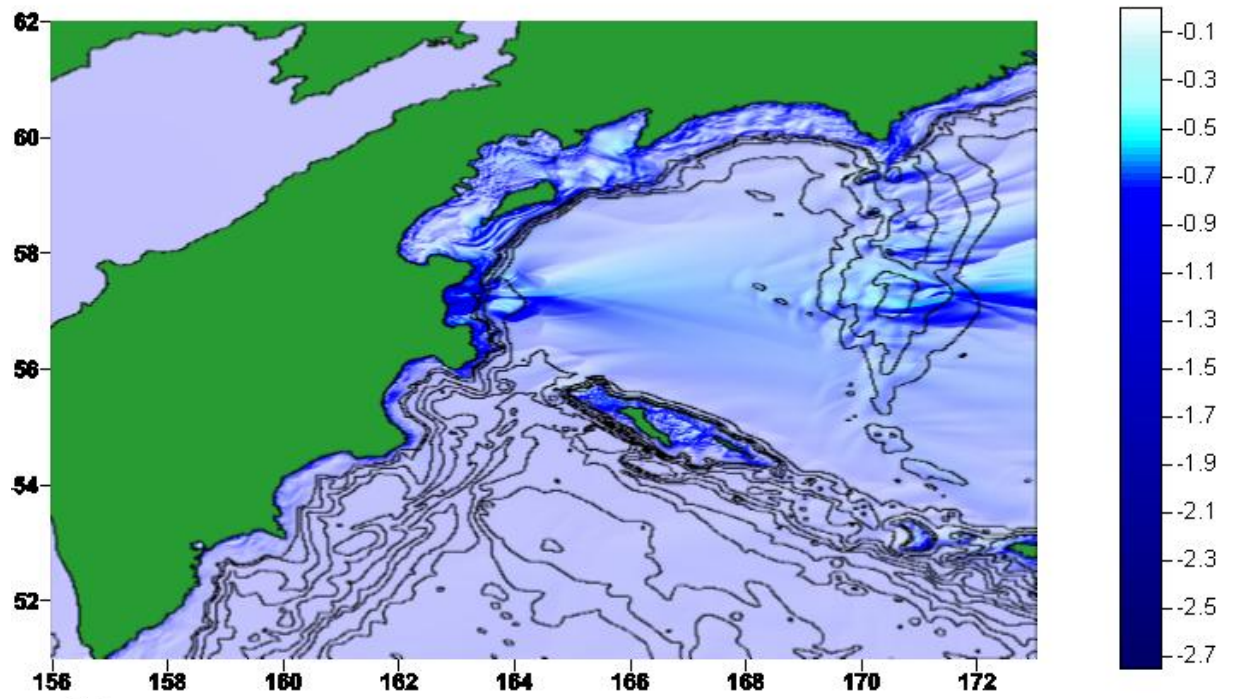
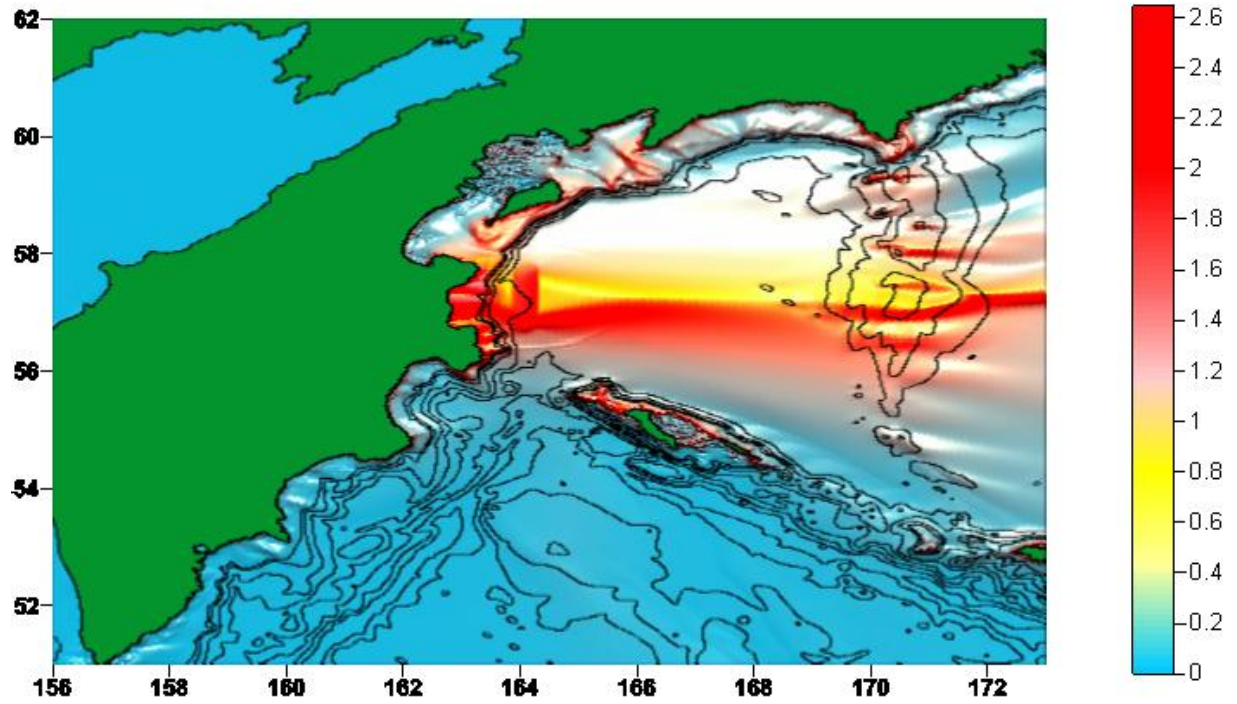


Рисунок 18.

21d-78

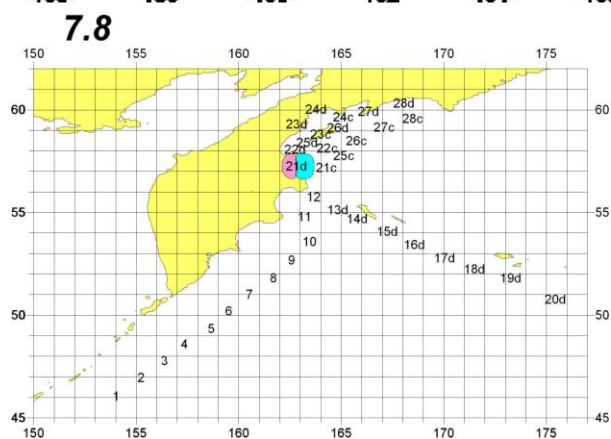
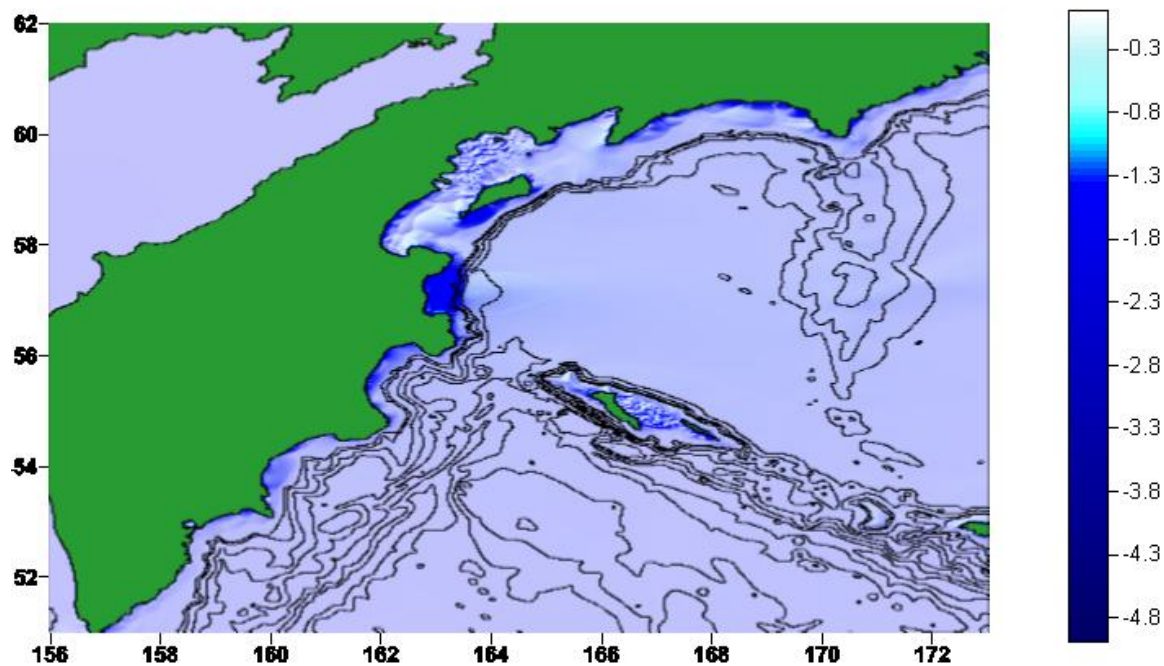
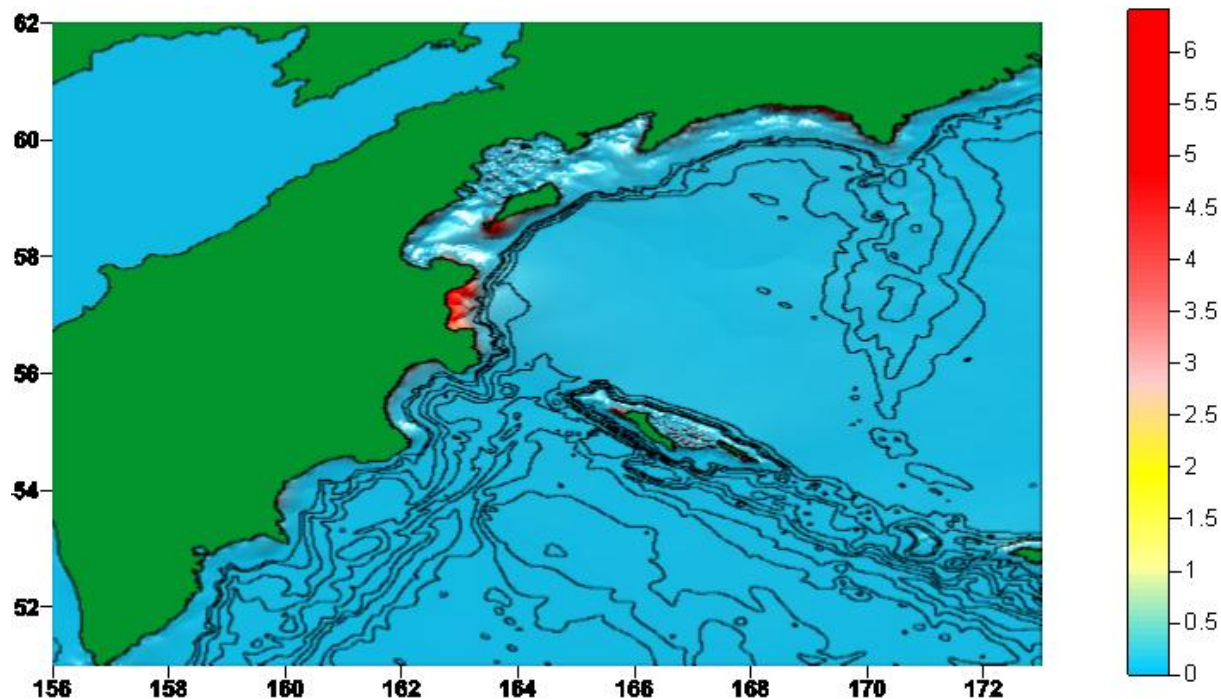


Рисунок 19.

22d-78

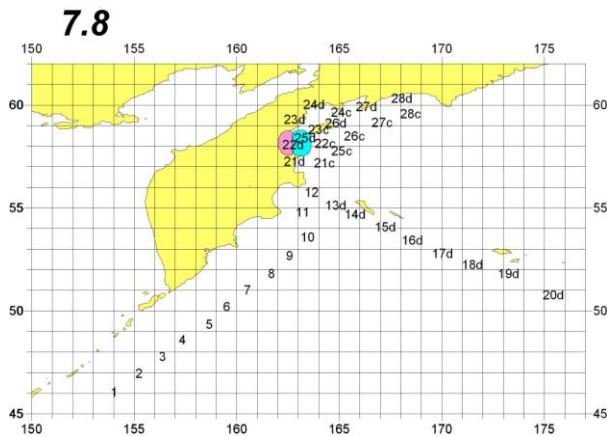
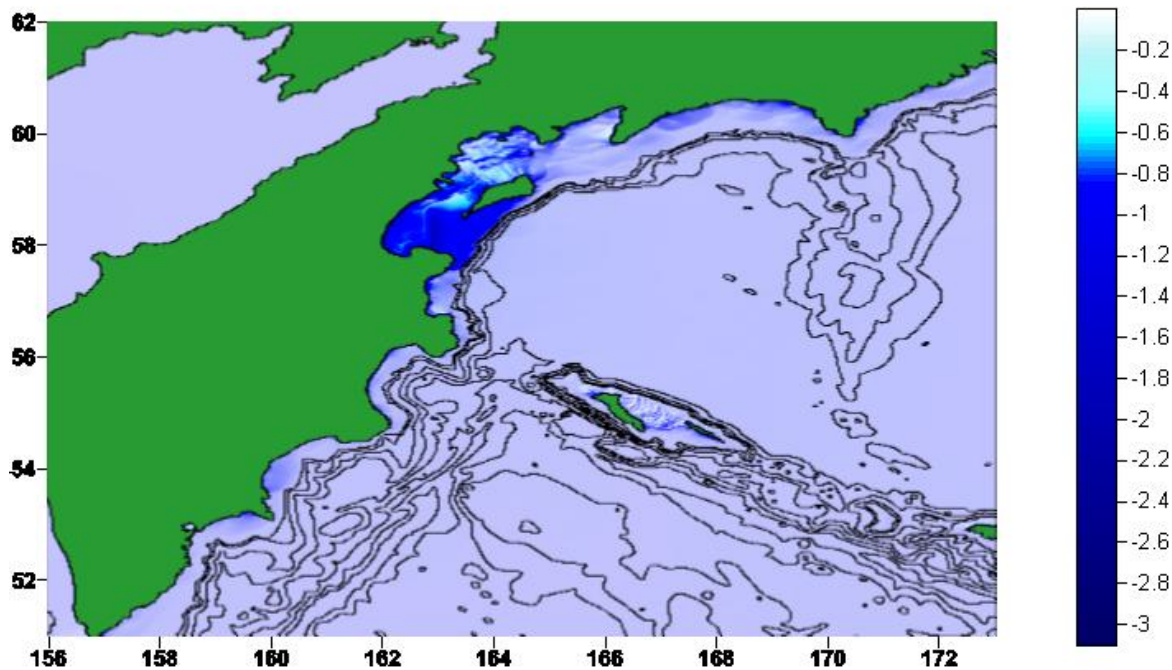
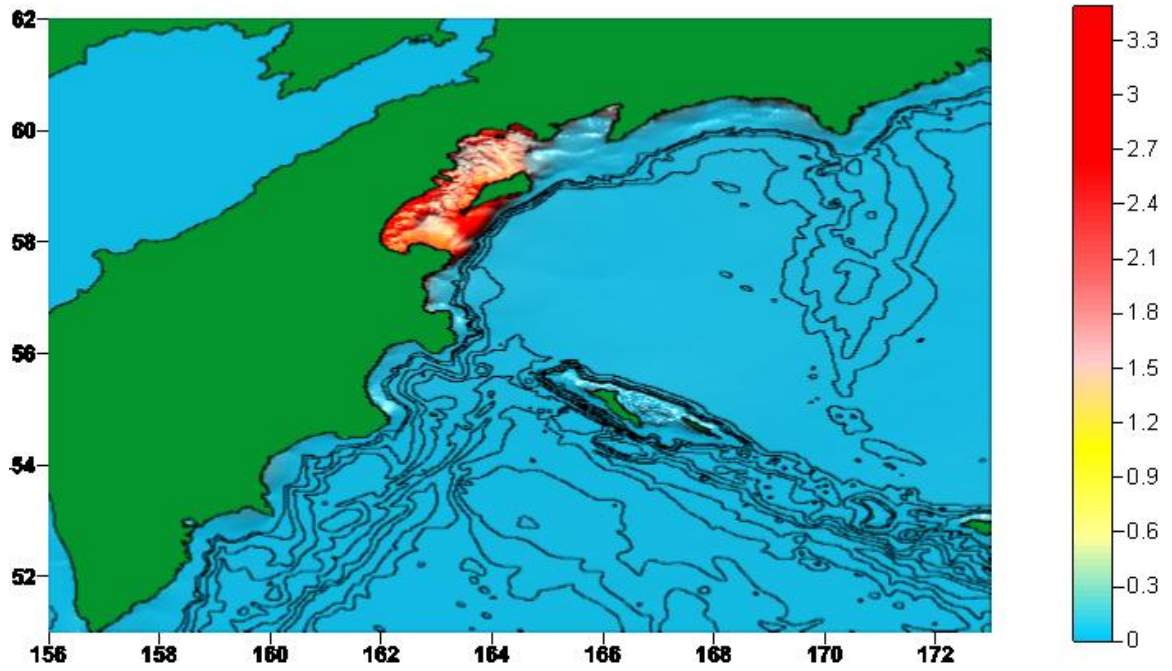


Рисунок 20.

23c-78

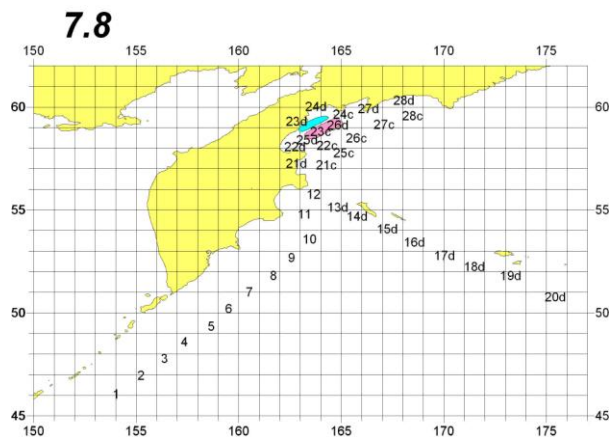
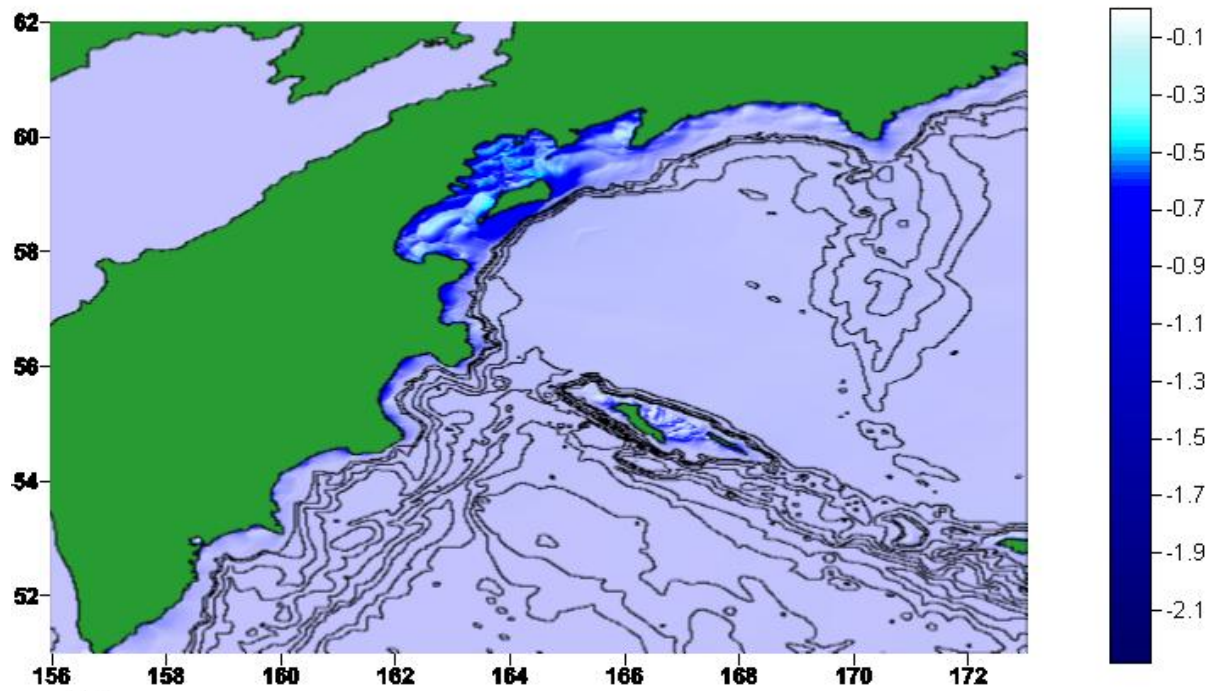
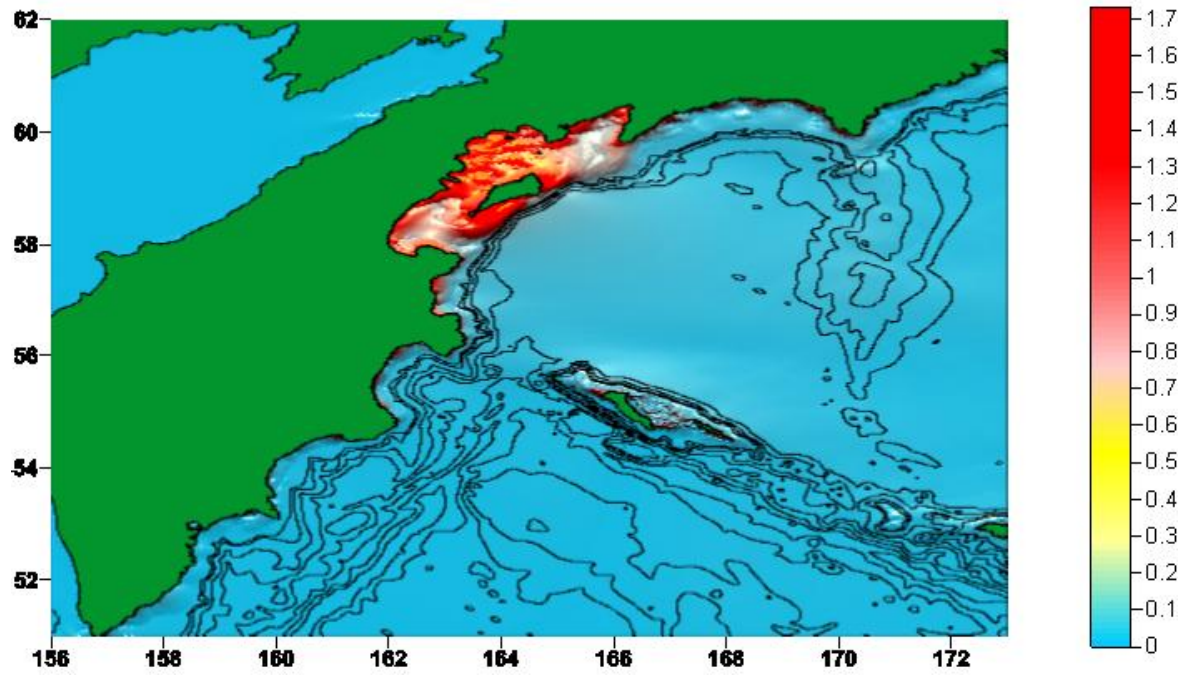


Рисунок 21.

24c-78

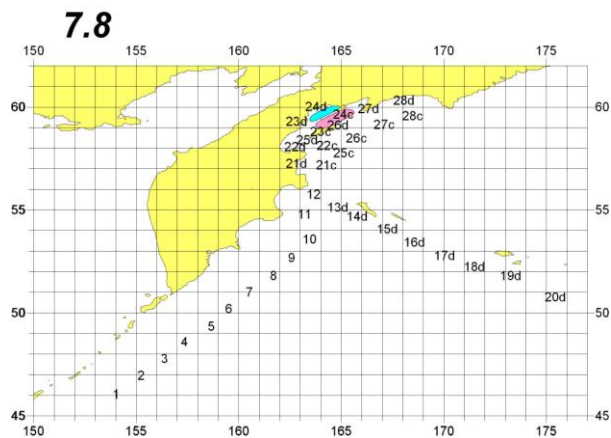
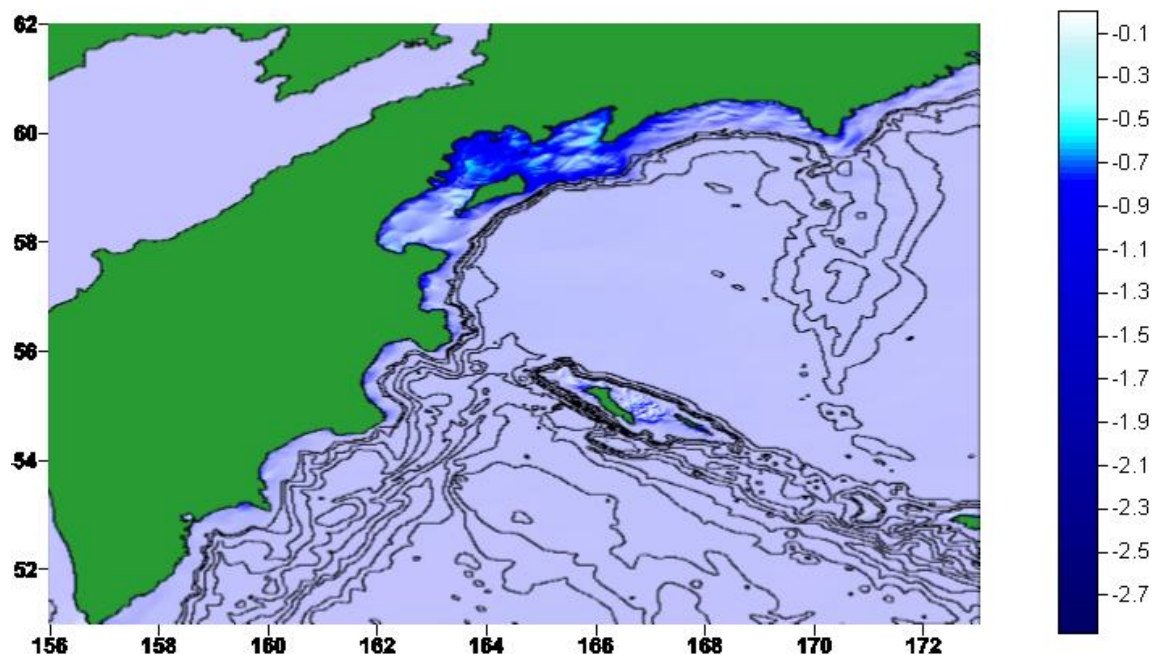
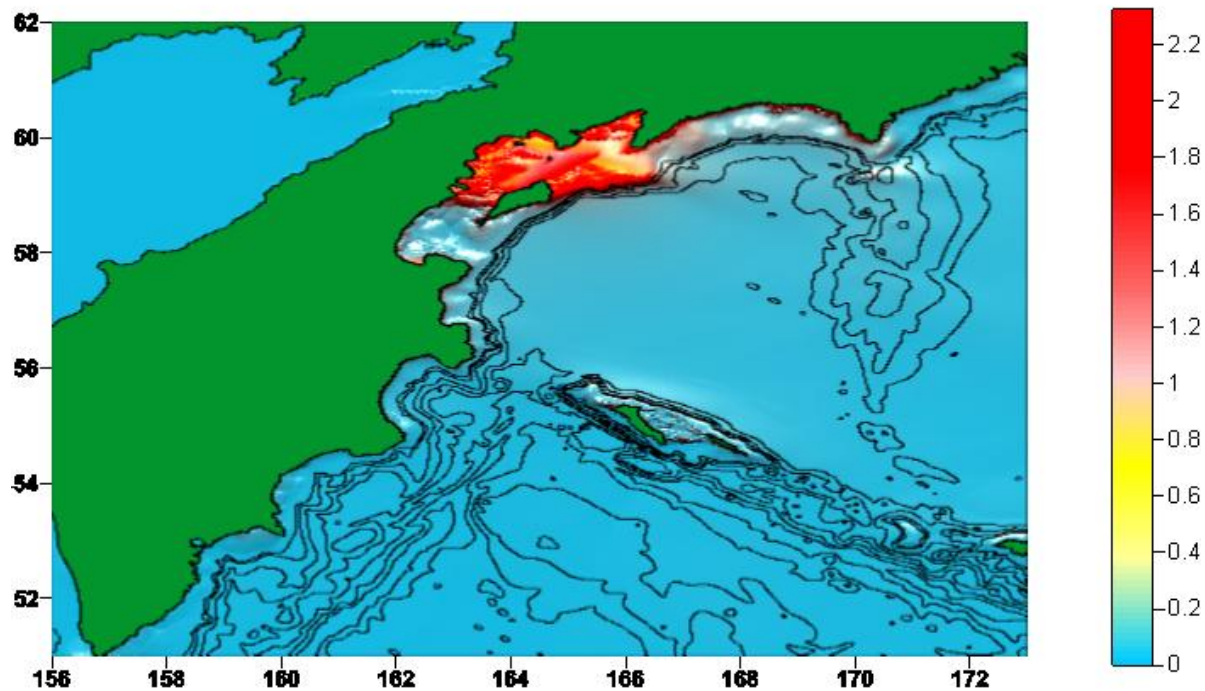
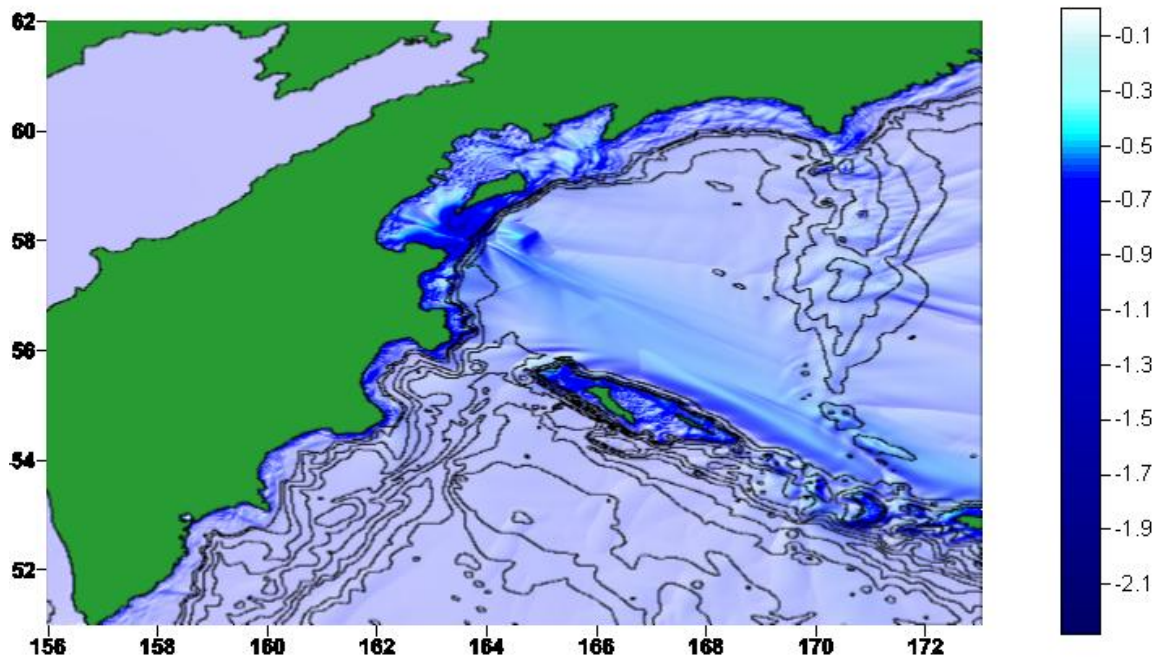
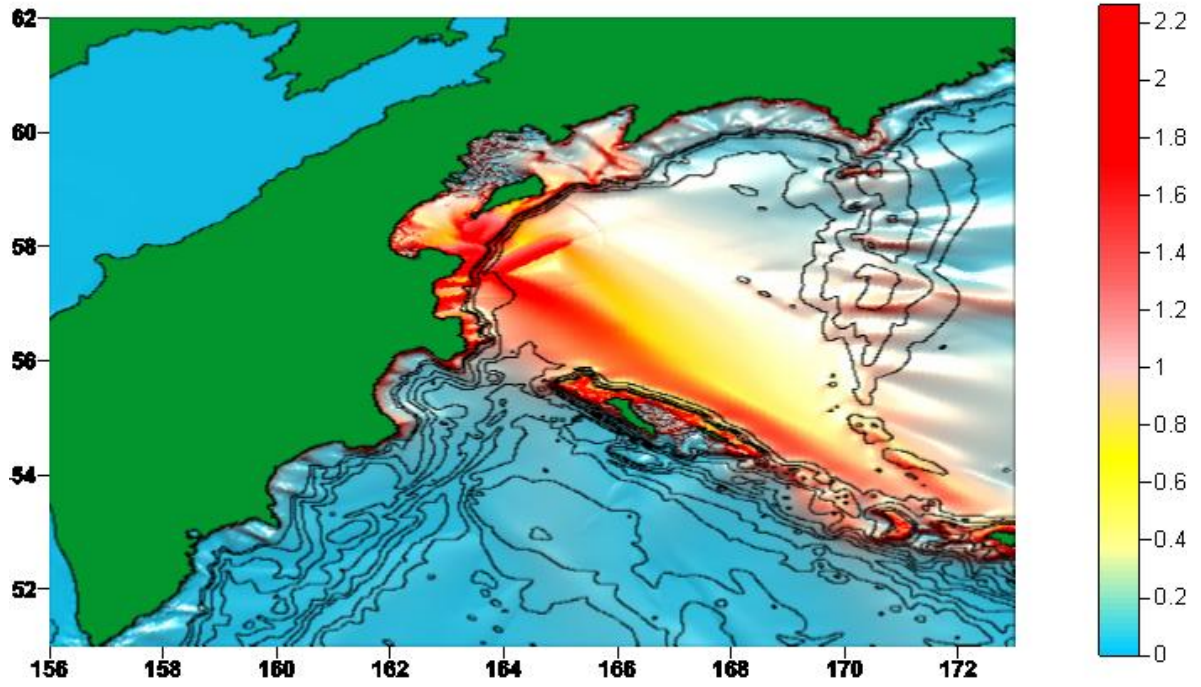


Рисунок 22.

25c-78



7.8

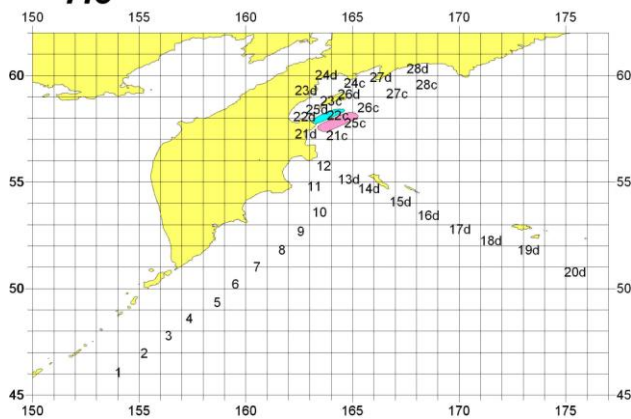


Рисунок 23.

26d-78

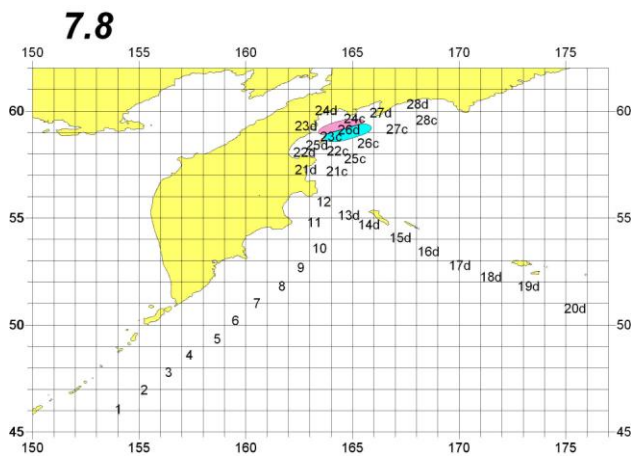
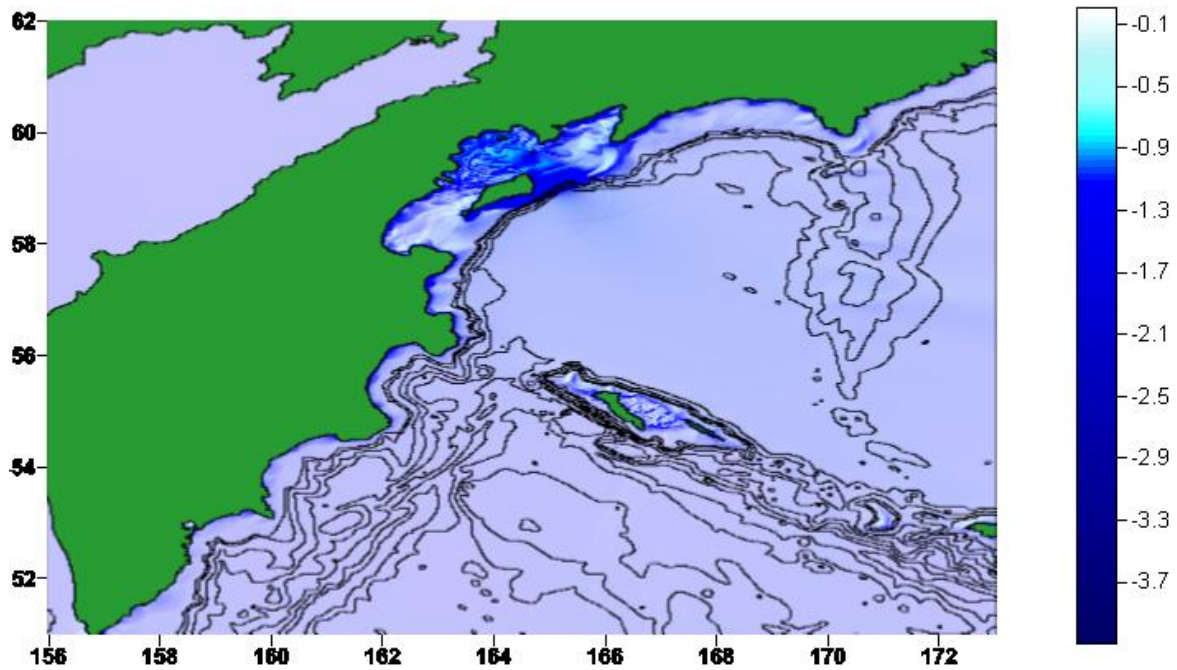
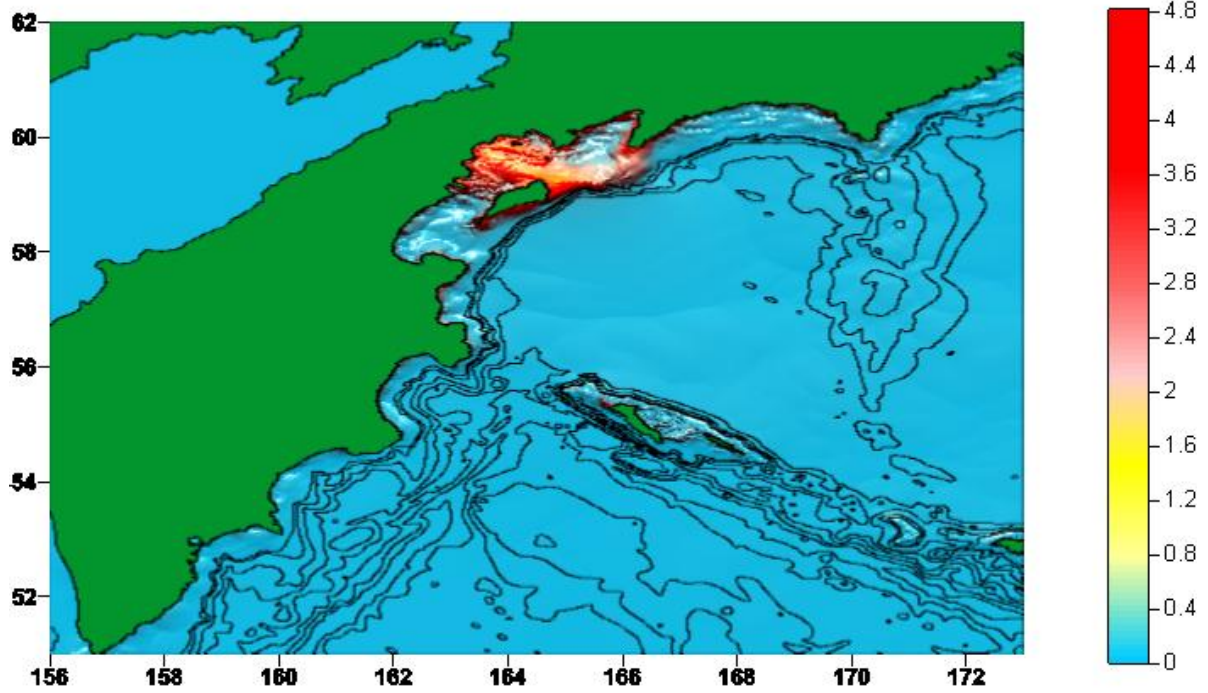
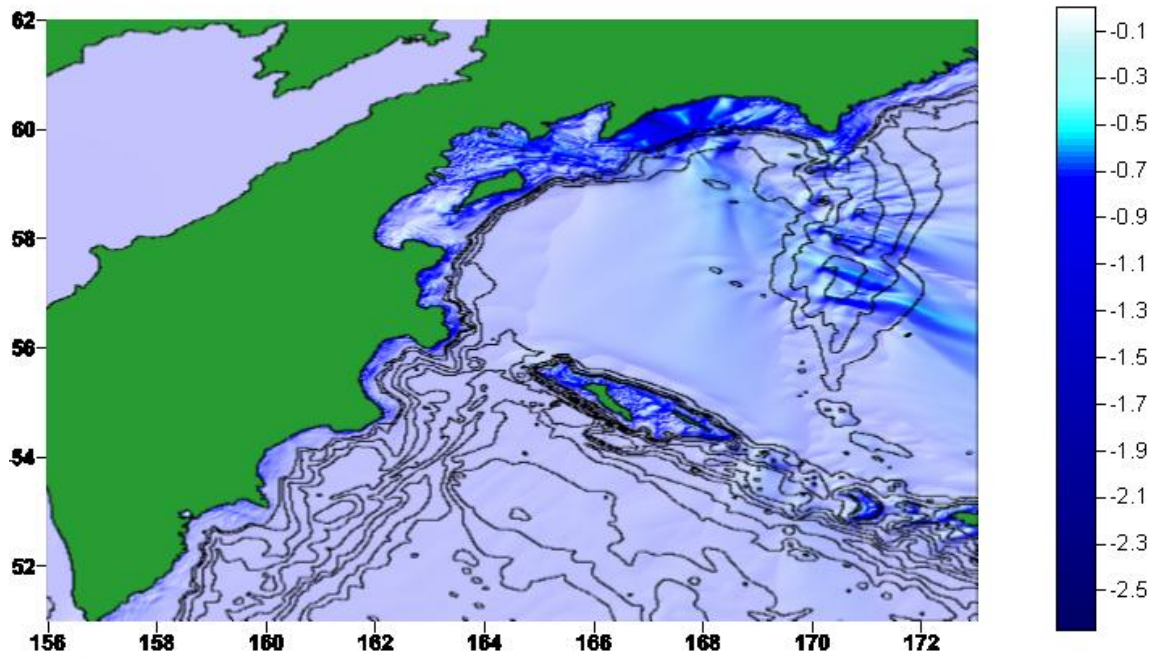
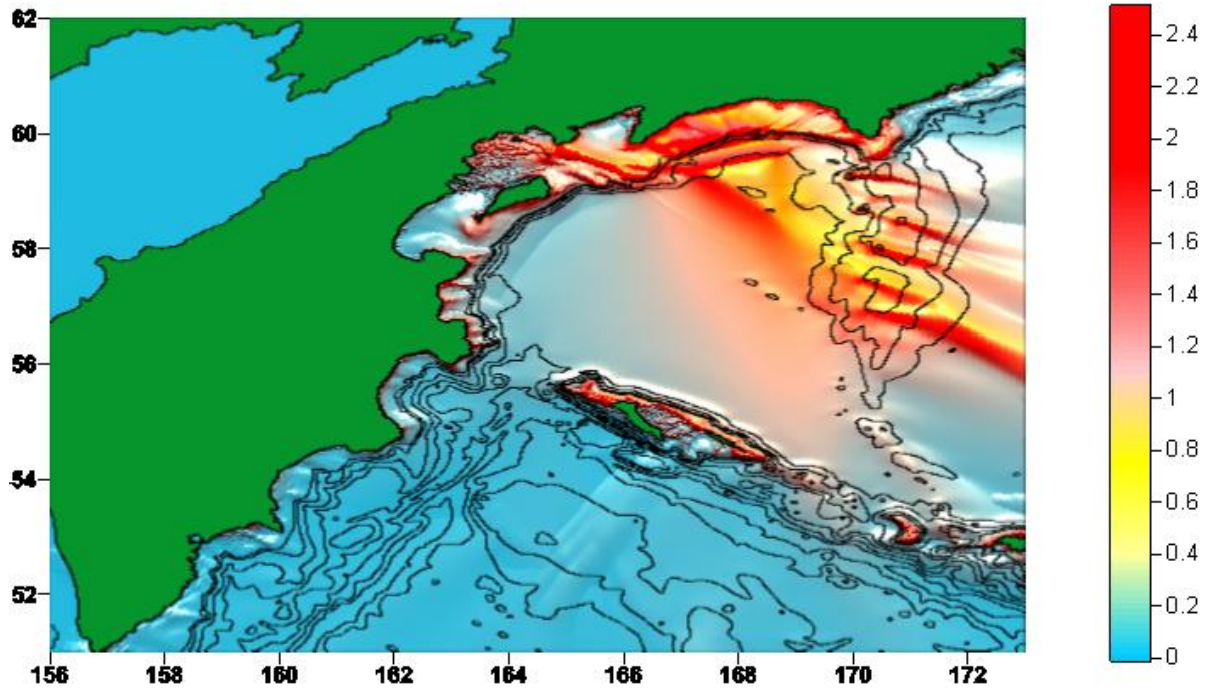


Рисунок 24.

28c-78



7.8

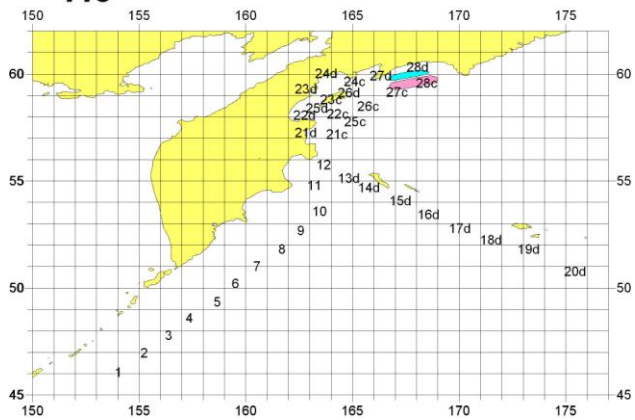
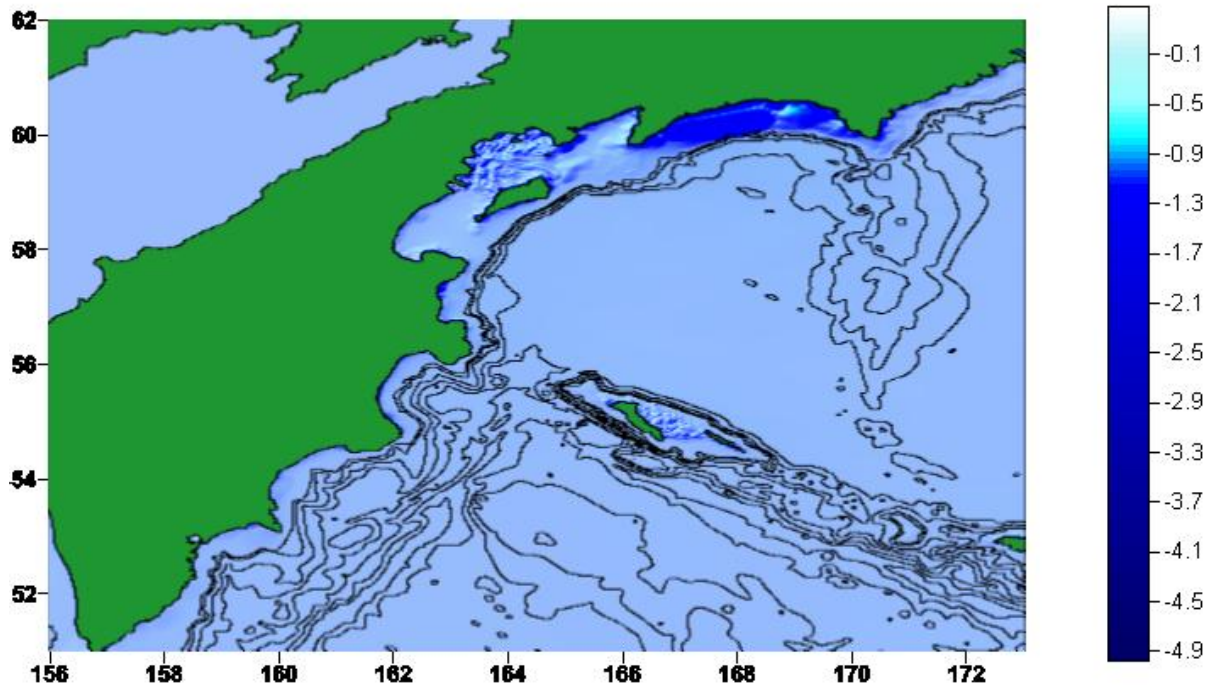
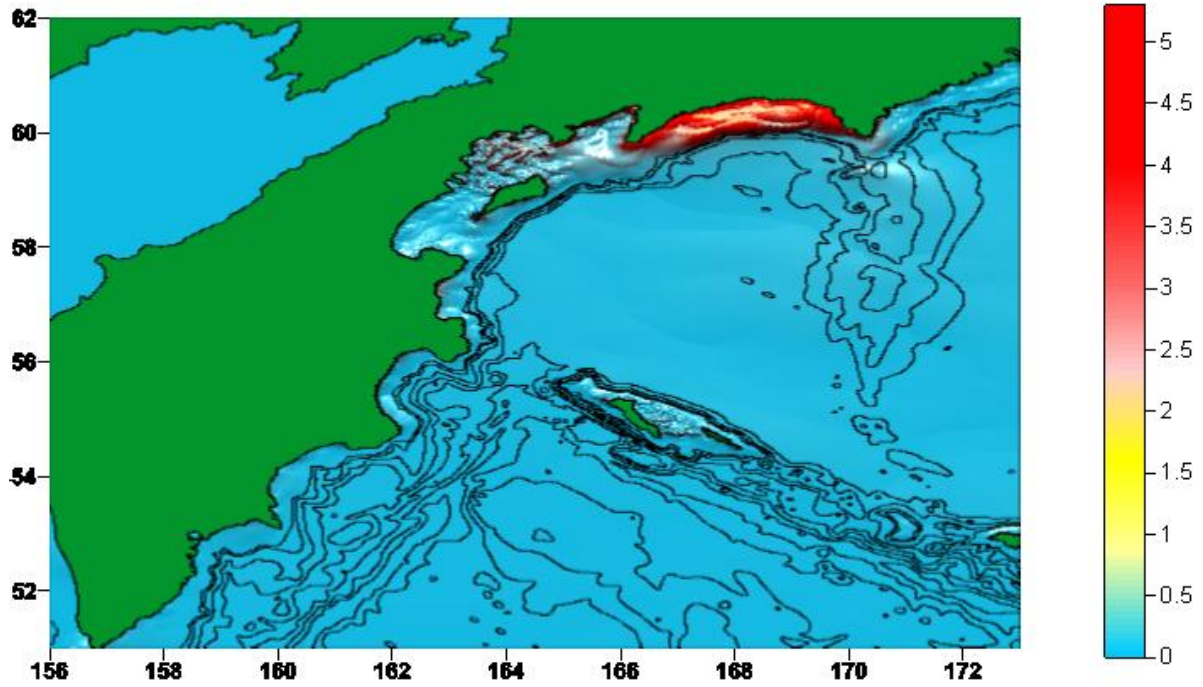


Рисунок 25.

28d-78



7.8

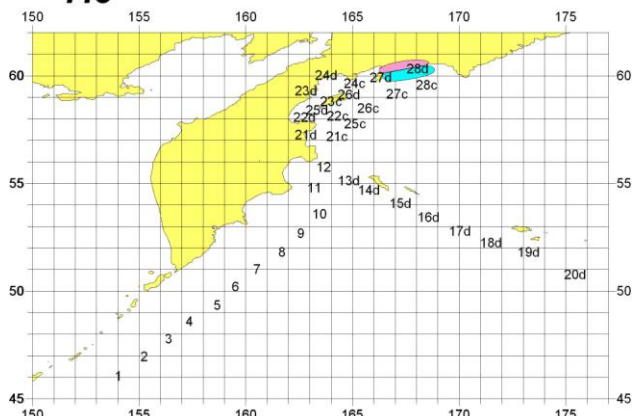


Рисунок 26.

10. Литература

- Aki K. (1972). Earthquake mechanism // *Tectonophysics*, 13, N 1-4, 423-446.
- Bernard E.N., Gonzalez F.I. (1994). Tsunami inundation modeling workshop report (November 16-18, 1993) // NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-100, PMEL, Seattle, Washington, 139p.
- Comer R.P. (1984). Tsunami generation: a comparison of traditional and normal mode approaches // *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 77, N 1, 29-41.
- Eletskii S.V. (2007) Program system NEREUS for simulation of tsunami waves, experience of development: applicability and realization // In: Study of natural catastrophes in Sakhalin and Kuril Islands. Proceedings of the I (XIX) International Conference of Young Scientists. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FES RAS. P. 230–236. (In Russian).
- Fedotova Z. I. (2006) On application of MacCormack difference scheme for long wave hydrodynamics // *Computation Technologies*, V. 11. Special issue. Part II. P. 53 – 63. (In Russian).
- Gusev, A.A. (2005) The schematic map of the source zones of large Kamchatka earthquakes of the instrumental epoch. *Kompleksnyye seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya Kamchatki, Petropavlovsk-Kamchatskiy*, 75-80 (In Russian)
- Gusiakov V.K. (1974). On the relation of tsunami waves with the source parameters of a submarine earthquakes. *Matematicheskie problemy geofiziki*, Novosibirsk, Computing Center, Issue 5, Part I, P.118-140. (in Russian).
- ITDB/WLD (2007) Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007. CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS, Novosibirsk, Russia.
- Johnson, J.M. and Satake, K. (1999) Asperity distribution of the 1952 Great Kamchatka earthquake and its relation to the future earthquake potential in Kamchatka. *Pure and Applied Geophysics*, **154**, 541-553.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space. *Bull. Seis. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Podyapolsky G.S. (1968). Generation of long wave in an ocean by a seismic source within the crust *Fizika Zemli*, N 1, P.7-24. (in Russian).
- Ward S. (1980). Relationships of tsunami generation and an earthquake source // *J.Phys. Earth.* V.28. N 5. P.441-474.
- Yamashita T., Sato R. (1974). Generation of tsunami by a fault model // *J. Phys. Earth*, V.22, N 4, P.415-440.

- Атлас максимальных заплесков цунами (1978). Отв.ред. С.Л.Соловьев // Владивосток: МГИ АН УССР, ДВНИГМИ, 61с.
- Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н. и др. (1984). Методы расчета цунамиопасности побережья // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. Труды 27-го Геологического конгресса, Москва, 4-14 августа 1984г., т.6, М.: Наука.
- Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. (1986). Прогноз цунамиопасности для побережья Камчатки // Метеорология и гидрология, N 7, 74-81.
- Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Симонов К.В. (1984). Предварительные данные о цунамиопасности побережья Японского моря // Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курильских островов, Владивосток: ИМГиГ ДВНЦ АН СССР, 138-141.
- Гусяков В.К. (1978). Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 23-51.
- Гусяков В.К., Марчук Ан.Г. (1993). Цунамирайонирование Берингоморского побережья Карагинского и Олюторского районов Корякского автономного округа // Предварительный отчет по х/д 2-93 "Уточнение карты сейсмического районирования КАО. Этап накопления и обработки полученных данных.", Н-ск: ВЦ СО РАН, 27с.
- Гусяков В.К., Марчук Ан.Г. (1994). Цунамирайонирование Берингоморского побережья Карагинского и Олюторского районов Корякского автономного округа, Промежуточный отчет по х/д 1-94 "Уточнение карты сейсмического районирования КАО", Новосибирск: ВЦ СО РАН, 42с.
- Иконникова Л.Н. (1963). Атлас цунами, Владивосток: ДВНИГМИ, 59с.
- Мелекесцев И.В., Курбатов А.В. (1993). Оценка палеосейсмичности КАО по результатам исследований 1992-1993 гг. // Отчет о работе в 1993 г. по х/д 2-93 "Уточнение карты общего сейсмического районирования КАО. Этап накопления и обработки полученных данных", Петропавловск-Камчатский: ОМСП ИВ ДВО РАН.
- Мелекесцев И.В., Курбатов А.В. (1994). Частота проявления крупнейших палеосейсмических событий // Отчет о работе в 1994 г. по х/д 1-94 "Уточнение карты общего сейсмического районирования КАО", П-Камчатский: ОМСП ИВ ДВО РАН.
- Пелиновский Е.Н., Плинк Н.Л. (1980). Предварительная схема цунамирайонирования побережья Курило-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг) // Препринт ИПФ АН СССР, N 5, Горький, 18с.