

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИВТ СО РАН

академик \_\_\_\_\_ Ю. И. Шокин

15 ноября 2008 года

Коды УДК:  
Коды ВКГ ОКП: 508900

**«Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов  
Сахалинской области и Приморского края».  
Курило-Камчатская, Сахалинская, Япономорская зоны.**

**ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ**

**о выполнении НИОКР для государственных нужд по  
Федеральной целевой программе**

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

**(контракт № 2н-08 от 21 мая 2008 г.)**

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Л. Б. Чубаров

Новосибирск, 2008 г

Исполнители:

д.ф.-м.н.

с.н.с., к.ф.-м.н.

м.н.с.

инженер-исследователь

инженер-исследователь

инженер-исследователь

В.К.Гусяков

З.И.Федотова

Д.Л.Чубаров

В.В.Бабайлов

С.А.Бейзель

С.В.Елецкий

1. Введение .....	4
2. Методика разработки базы данных модельных очагов цунамигенных землетрясений .....	5
2.1. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской, Сахалинской и Японской зон. ....	5
2.1.1. Курило-Камчатская зона .....	5
2.1.2. Японская и Сахалинская зоны .....	9
2.2. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений удаленной зоны. ....	10
3. Методика расчета мареограмм для мареографов в пунктах их установки для модельных очагов цунамигенных землетрясений. ....	17
3.1. Общая характеристика вычислительной технологии. ....	17
3.2. Результаты определения характеристик воздействия волн цунами у побережья Камчатки, Курильских островов, Сахалина и Приморья. Общая характеристика. ....	24
3.3. Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования с использованием расчетных областей различной детальности. ....	26
3.3.1 Общая характеристика проблемы. ....	27
3.3.2 Два алгоритмических способа решения проблемы и результаты их тестовых испытаний. ....	29
3.4. Разработка методики проведения большого объема численных экспериментов с использованием программного комплекса MassGlobalCalcul на многопроцессорных ЭВМ. ....	38
3.4.1. Перечень сокращений, условных обозначений, символов и терминов. ....	38
3.4.2. Основные стратегии. ....	38
3.4.2. Организация одновременных расчетов. ....	39
3.4.3. Особенности программ комплекса MassGlobalCalcul. ....	40
3.4.4. Автоматизация одновременных расчетов. ....	40
3.4.5. Предварительные результаты распараллеливания алгоритма. ....	40
3.4.6. Продолжение исследований. ....	42
4. Результаты испытания методики моделирования воздействия удаленных цунами на защищаемые участки побережья .....	42
4.1. Постановка задачи и общие характеристики результатов расчетов. ....	42
5. Методика разработки базы данных максимальных высот волн на изобатах 10 метров для модельных очагов цунамигенных землетрясений для защищаемых пунктов побережья Сахалинской области и Приморского края. ....	48
Библиография .....	48
Приложение А. Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования Чилийского цунами 1960 г. ....	1
Приложение В. Сравнение результатов расчетов по нелинейной и линейной моделям для некоторых модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8. ....	1
Приложение С. Сравнение результатов расчетов по нелинейной и линейной моделям, вычисленных для некоторых модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4 в частично перекрывающихся подобластях. ....	1

## 1. Введение

В ходе заключительного этапа работ по контракту выполнялись пробные расчеты распространения волн цунами от удаленных источников, потребовавшие значительных вычислительных ресурсов. В ходе этих расчетов использовались разработанные авторами модифицированные вычислительные методики, предназначенные для обеспечения необходимой точности расчетов в прибрежной зоне в условиях естественных ограничений на оперативную память и быстродействие доступных вычислительных ресурсов. Моделирование трансокеанских цунами осуществлялось на быстродействующих компьютерах Института вычислительных технологий СО РАН и Новосибирского государственного университета. Последний занимает 18-ю позицию в перечне 50 наиболее мощных вычислительных комплексов России (Top 50, 2008). Его тактико-технические данные характеризуются следующими значениями: разработчик Hewlett-Packard, количество процессоров/ядер 128/512, архитектура узлов: 64 (2xXeon 5355 2.66 GHz 16.384 GB RAM), сеть Infiniband 4x DDR/Gigabit Ethernet/Gigabit Ethernet, производительность на тесте Linpack – 4085 teraflops, пиковая производительность – 5447.7 teraflops. Этот суперкомпьютер был введен в эксплуатацию в первые дни сентября 2008 г., так что задачи настоящего проекта были одними из первых, решенных с его помощью.

Согласно календарному плану, в итоговый отчет включены разделы, связанные с методиками:

- разработки базы данных модельных очагов цунамигенных землетрясений для Курило-Камчатской, Сахалинской, Япономорской и удаленных зон;
- разработки базы данных максимальных высот волн на изобатах 10 метров у защищаемых пунктов побережья Сахалинской области и Приморского края для модельных очагов цунамигенных землетрясений,
- расчета мареограмм для мареографов в пунктах их установки для модельных очагов цунамигенных землетрясений.

Наиболее полно в настоящем отчете изложены подходы к построению систем модельных очагов цунамигенных землетрясений. Дана общая характеристика вычислительной технологии, разработанной и реализованной для решения задач проекта. Подробно представлены способы повышения эффективности применяемых вычислительных технологий, включая технологии параллельных расчетов. Указаны также незначительные модификации информационного обеспечения, облегчающие интерпретацию результатов расчетов, включены и некоторые материалы моделирования удаленных цунами. Основная часть вычислительных работ в этом направлении планируется на 2009 – 2010 гг.

Результаты 2008 г. были использованы в основном для оценки качества алгоритмов на классе задач, связанных с моделированием удаленных цунами, определения необходимых для решения таких задач вычислительных ресурсов. Следует заметить, что постановка задачи на определение характеристик проявления удаленных цунами у Дальневосточного побережья России потребовала моделирования динамики волнового процесса на протяжении более чем 40 часов физического времени распространения волны. Это обстоятельство, в свою очередь, значительно увеличило время расчетов. Так, проведение эталонного калибровочного расчета на достаточно детальной двухминутной расчетной сетке занимает около 40 часов процессорного времени.

## 2. Методика разработки базы данных модельных очагов цунамигенных землетрясений

### 2.1. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской, Сахалинской и Японской зон.

#### 2.1.1. Курило-Камчатская зона

Непосредственную угрозу цунами для восточного побережья Камчатки и Курильских островов представляют очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сейсмотектонической зоне, которая протягивается вдоль всего восточного побережья Курильских островов и Камчатки и располагается между внешним краем шельфа и осью глубоководного желоба (Рис. 1).

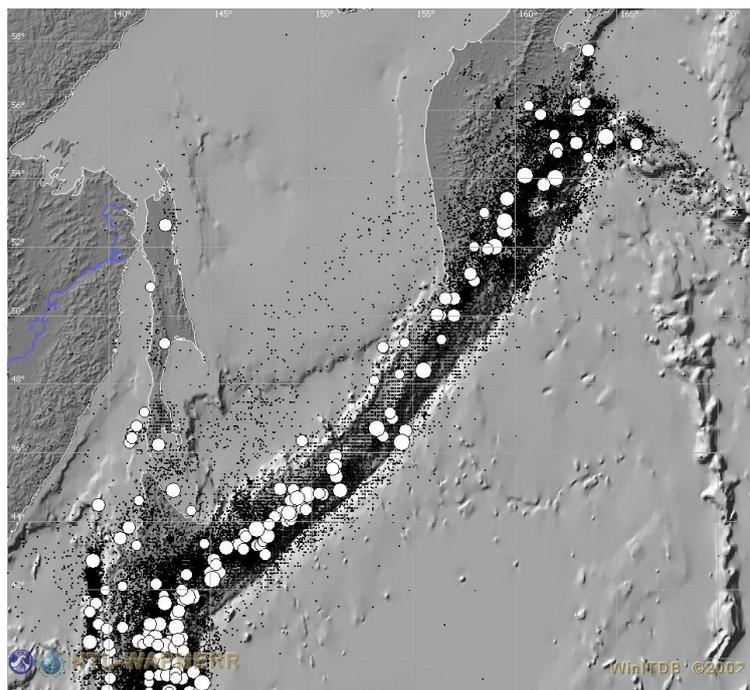


Рис. 1. Карта сейсмичности и очаги цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской зоны. Черными точками показаны очаги инструментально определенных исторических землетрясений, происшедших в этом районе с 1900 по 2007 год. Большими белыми кружками показано положение очагов цунамигенных землетрясений, происшедших с 1737 по 2007 год. Источник данных – WinITDB (2007).

На севере эта зона примыкает к Алеутско-Аляскинской сейсмической зоне, подходящей к ней под прямым углом в районе полуострова Камчатский, образуя здесь сложный сейсмотектонический узел стыка трех плит – Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотской. На юге Курило-Камчатская зона плавно (при небольшом угловом несогласии) сочленяется с Японской сейсмоактивной зоной в районе пролива Цугару, разделяющего острова Хоккайдо и Хонсю. Общая протяженность зоны составляет около 2300 км при средней ширине порядка 150 км.

За время исторических наблюдений (с 1737 года по настоящее время) в этой зоне произошло 89 цунамигенных землетрясений, среди которых были сильнейшие Камчатские землетрясения 1737 и 1952 годов, с магнитудами  $M_w$  более 8.5, породившие разрушительные цунами с высотами более 20 метров. В центральной и южной частях Курило-Камчатской зоны землетрясений с такими большими магнитудами не наблюдалось. Сильнейшие цунамигенные землетрясения, происшедшие здесь в 1848, 1918, 1958, 1963, 1969 и 2007 годах, имели магнитуды  $M_w$  в диапазоне 8.1 – 8.4. Максимальные высоты цунами от них на ближайших участках побережья составляли 12 – 15 метров.

Согласно широко распространенному представлению, вытекающему из концепции тектоники плит, сейсмические процессы в периферийных частях Тихого океана обусловлены поддвигом океанической плиты под континентальную в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. Типичным примером такой зоны является Курильская островная дуга. Оча-

ги мелкофокусных землетрясений располагаются здесь в широкой полосе, протягивающейся от глубоководного желоба до фронтальной невулканической гряды, морфологически выраженной хребтом Витязя в центральной и северной частях зоны и Малой Курильской грядой в ее южной части. Собственно наклонная фокальная зона (зона Заварицкого-Беньюфа), падающая под континент под углом  $45^\circ - 60^\circ$ , формируется ниже глубины 50 – 100 км, смещена от оси желоба в сторону островной дуги и хорошо прослеживается лишь до глубин 200 – 300 км (Балакина, 1979; Тараканов, Ким, 1980).

Основное представление о сейсмичности, вытекающее из этой схемы, состоит в том, что очаги землетрясений должны располагаться на границе между погружающейся океанической и надвигающейся континентальной литосферой, а плоскости разрывов в очагах сильных землетрясений ориентированы вдоль этой границы, причем направление подвижек в очагах соответствует направлению относительного перемещения плит, то есть преобладающим механизмом в очагах должен быть пологий надвиг.

На основании сейсмических данных механизм очагов определяется с точностью до двух равновероятных плоскостей, перпендикулярных друг другу. Какая из них реализуется в очаге землетрясения – этого по сейсмическим данным сказать нельзя, поэтому необходимо использовать дополнительную информацию. Иногда выбор можно сделать, учитывая простирание обеих плоскостей и сеймотектонические особенности зоны. Однако, если говорить об очагах землетрясений в Курило-Камчатской зоне, то для них, как правило, оказывается, что одна из плоскостей ориентирована вдоль дуги и круто падает под океан, вторая, в среднем с таким же простиранием, имеет пологое падение под континент (Балакина, 1972, 1979). Следовательно, идентификация одной из плоскостей в качестве истинной требует выбора типа механизма между крутым взбросом и пологим надвигом.

Сторонники плитовой тектоники делают этот выбор обычно в пользу надвига, полагая, что разрывы в очагах развиваются вдоль зоны субдукции, отделяющей океаническую литосферу от континентальной. Противники этой концепции делают выбор чаще всего в пользу взбросов, основываясь, как правило, на лучшем совпадении простирания крутой плоскости с простиранием островной дуги. При этом подчас привлекаются данные о цунами, например, анализ знаков первых смещений в головной волне (Hatori, 1974), а также делаются ссылки на результаты теоретических расчетов, показывающих, что цунами наибольшей интенсивности должны возбуждаться субвертикальными взбросами. Однако, как следует из Рис. 2, наибольшая разница в амплитудах цунами существует между взбросами и сдвигами, уменьшение же угла падения, переводящее подвижку из взброса в надвиг, лишь в очень небольшой мере влияет на амплитуды цунами. Уменьшение амплитуд для надвига (примерно в 1.5 раза в примере, представленном на Рис. 2), в значительной мере обусловлено тем, что в расчетах при изменении угла падения пространственного разрыва фиксировалась глубина его нижнего края, при этом разрыв в виде пологого надвига оказывается в целом более удаленным от поверхности, чем разрыв в виде субвертикального взброса, что в соответствии с быстрым убыванием амплитуд цунами при увеличении глубины источника должно приводить к уменьшению амплитуд цунами.

Пологий надвиг оказывается почти идентичен крутому взбросу и по отношению к картине остаточных смещений дна. На Рис. 2 эти смещения, вычисленные для разрыва с размерами  $L = 100$  км,  $W = 50$  км, представлены в виде картины деформированной поверхности (вверху) и карт изолиний тех же деформаций (в центре). Хотя детали несколько различны, общая картина поля смещений одинакова – континентальное крыло (при ориентации разрывов вдоль островной дуги) оказывается опущенным, океаническое крыло – приподнятым, причем поднятие по амплитуде примерно в 2.5 раза превышает опускание. Как следствие, мареограммы (показанные на этом же рисунке внизу), вычисленные для обоих источников с учетом реальной топографии дна в районе Южных Курильских островов, оказываются одинаковыми как по знакам первых вступлений, так и по амплитуде. Это говорит о том, что источники, неразличимые по сейсмическим данным, являются неразличимыми и по отношению к цунами.

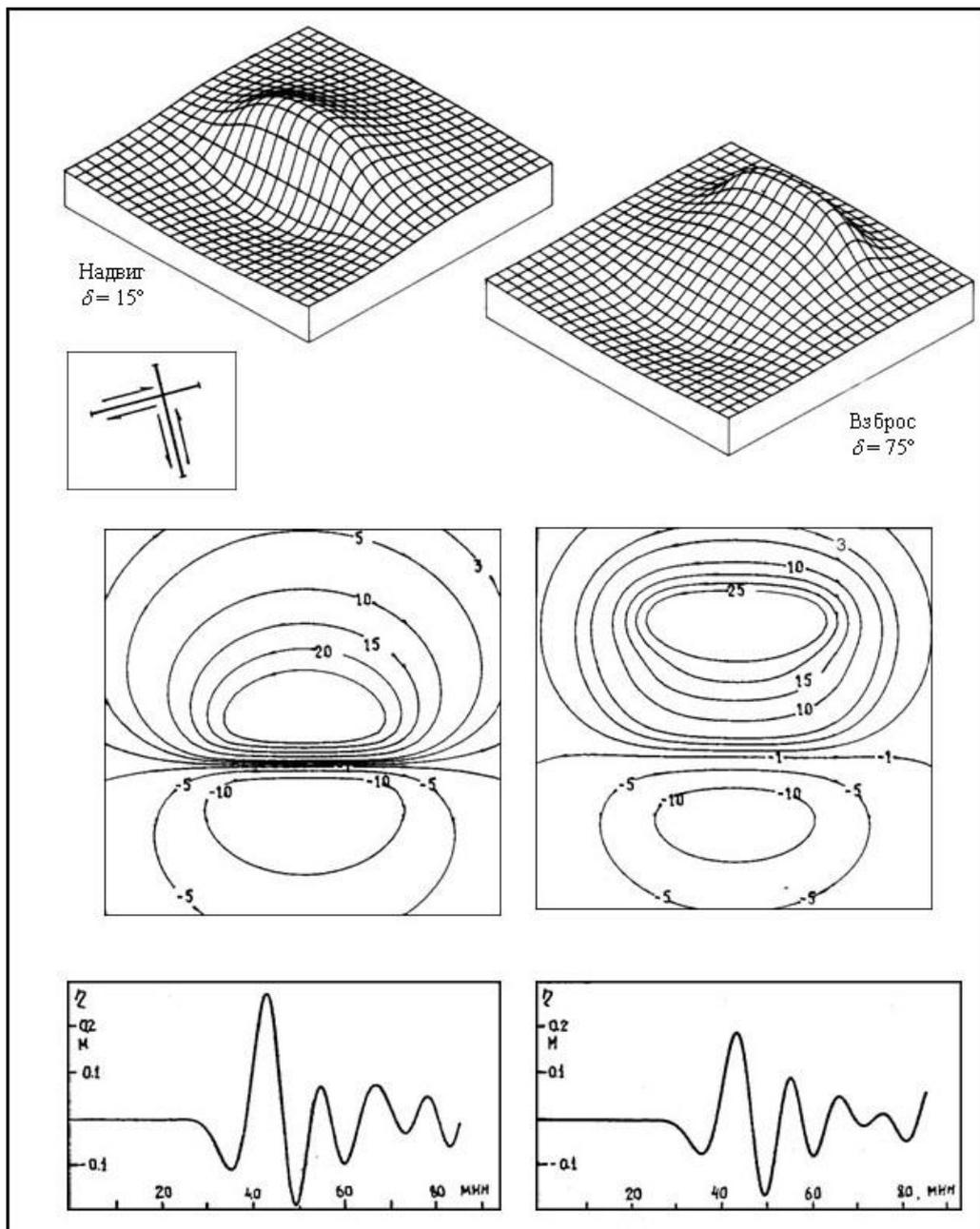


Рис. 2. Остаточные смещения дна (вверху) и расчетные мареограммы цунами (внизу) для крутого взброса (справа) и пологого надвига (слева).

Несмотря на неопределенность в выборе истинной плоскости разрыва, система напряжений, обеспечивающая подвижки по возможным плоскостям, устанавливается на основании тех же сейсмических данных однозначно. При этом оказывается (Балакина, 1972), что в зонах островных дуг (в том числе Курильской) напряжения сжатия близгоризонтальны и ориентированы преимущественно ортогонально простиранию дуги, напряжения же растяжения в большинстве случаев являются субвертикальными. Такая система напряжений согласуется в целом с концепцией поддвига плит и приводит к взбросам по крутым (либо надвигам по пологим) плоскостям разрывов, ориентированных вдоль островной дуги. Гораздо реже встречаются случаи, когда вертикальным оказывается промежуточное напряжение, а напряжения сжатия и растяжения близгоризонтальны и ориентированы, соответственно, вкрест и вдоль простирания дуги. Эта система напряжений должна приводить к землетрясениям со сдвиговыми подвижками по плоскостям, секущим островную дугу. Время от времени такие землетрясения действительно происходят, их положение хорошо увязывается с выявленными поперечными разломами, рассекающими островные дуги на отдельные сегменты (Аверьянова, 1968), однако их магнитуды во всех случаях были недостаточными для возбуждения ощутимого цунами.

Наличие в очагах мелкофокусных курильских землетрясений крупных разрывов с падением под океан, а также разрывов со сдвиговым механизмом, секущим островную дугу, находит свое объяснение в рамках геодинамической модели поддвига, разработанной в Институте океанологии РАН (Лобковский, Сорохтин, 1979, 1980; Лобковский, Баранов, 1982). В основе этой модели лежит концепция поддвига океанической плиты под островные дуги и активные континентальные окраины. При этом считается, что мелкофокусная сейсмичность фронтальной области островной дуги обусловлена взаимодействием поддвигаемой океанической плиты с перекрывающим ее островодужным выступом, простирающимся от глубоководного желоба до невулканической гряды, в районе которой погружающаяся плита испытывает резкий излом за счет развития в ее теле сдвиговых пластических деформаций. Это взаимодействие осуществляется вдоль узкой контактной зоны трения между поддвигаемой плитой и покрывающим ее литосферным выступом. В этой зоне происходят все наиболее сильные землетрясения с магнитудами более 7.5 и преимущественно поддвиговым типом механизма, представляющие наибольшую угрозу с точки зрения возникновения опасного цунами.

В соответствии с принятым в настоящей работе подходом к задаче моделирования цунамигенных землетрясений, основная Курило-Камчатская сейсмогенная зона аппроксимировалась системой модельных очагов (Рис. 3), механизмы которых выбирались на основе генерализации механизмов исторических цунамигенных землетрясений этого региона.

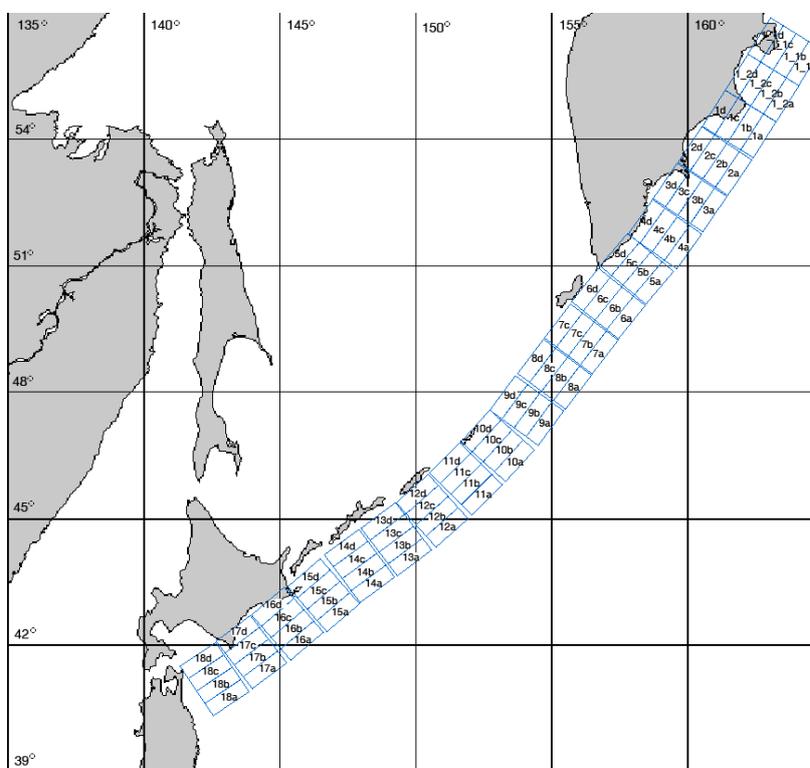


Рис. 3. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w = 7.8$  в Курило-Камчатской зоне.

За основу было принято распределение модельных очагов землетрясений с магнитудой  $M_w$ , равной 7.8. Изучение статистики исторических цунами, собранных в базе данных WinITDB (WinITDB, 2007), показывает, что именно такая магнитуда является пороговой для возбуждения цунами, опасных для восточного побережья Курил и Камчатки. Размеры плоскости разрыва для очагов данной магнитуды были приняты равными  $L = 108$  км,  $W = 38$  км при величине подвижки  $D_0 = 2.74$  м. Сейсмический момент такого источника равен  $5.6 \cdot 10^{20}$  Н·м. В качестве основного механизма очагов был принят пологий надвиг по главной литосферной границе раздела этой зоны, т.е. границе между поддвигаемой океанической корой и надвигающимся на нее островодужным выступом континентальной литосферы. Соответственно, углы падения плоскости разлома были приняты равными  $\delta = 15^\circ$ , направление подвижки  $\lambda = 90^\circ$ , что соответствует пологому надвику. Четыре полосы таких модельных очагов, с 20 очагами в каждой полосе, равномерно располагаются в зоне субдукции тихоокеанской океанической плиты под азиатскую кон-

тинентальную плиту. Глубина верхнего края разрыва каждой следующей полосы закономерно увеличивается (в соответствии с углом падения плоскости разрыва) по мере удаления от оси глубоководного желоба.

Помимо этой основной системы модельных очагов были рассмотрены очаги с магнитудами  $M_W$ , равными 8.4, представляющими максимально возможные подводные землетрясения в данном регионе. Изучение регионального сейсмического каталога показывает, что за весь период инструментальных наблюдений только два события имели магнитуды, превышающие это значение – Камчатские землетрясения 1923 и 1952 годов. В остальной части Курило-Камчатской зоны землетрясений с магнитудами  $M_W$  выше 8.4 не происходило. Модельный очаг такого землетрясения получается путем удвоения размеров площадки разрыва и величины подвижки модельного очага с магнитудой 7.8. В каждом блоке поперек простирания сейсмоактивной зоны располагаются по два таких очага, вдоль простирания на всем протяжении зоны располагается девять блоков (Рис. 4). Сейсмический момент такого источника равен  $4.4 \cdot 10^{21}$  Н·м. Механизм этих модельных очагов был принят таким же, как и для более слабых землетрясений с магнитудами  $M_W = 7.8$ , т.е. пологие надвижки, происходящие по основной литосферной границе раздела, с углом падения  $\delta = 15^\circ$  и направлением подвижки  $\lambda = 90^\circ$ .

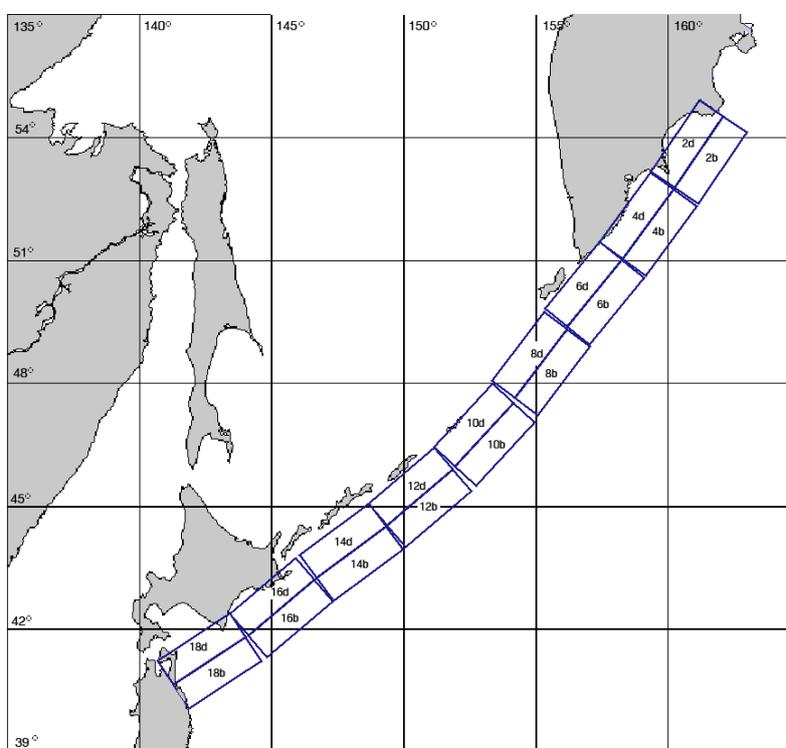


Рис. 4. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_W = 8.4$  в Курило-Камчатской зоне.

### 2.1.2. Японская и Сахалинская зоны

Очаги подводных землетрясений в восточной части Японского моря, определенные на основе анализа исторических данных (Рис. 5) аппроксимировались системой взбросо-сбросовых подвижек ( $\lambda = 90^\circ$ ) по крутопадающим (в обоих возможных направлениях) плоскостям разрывов ( $\delta = \pm 70^\circ$ ), происходящих вдоль зоны контакта поддвигающихся Тихоокеанской и Филиппинской плит с надвигающейся Азиатской плитой. Размеры плоскостей разрыва для этих землетрясений были приняты такими же, как и для основной системы очагов с магнитудой 7.8, располагающихся вдоль глубоководного желоба, т.е.  $L = 108$  км,  $W = 38$  км,  $D_0 = 2.74$  м. Цепочка этих очагов протягивается вдоль западного побережья Японии от Цусимского пролива на юге примерно до района расположения г.Холмск на юго-западном побережье Сахалина, где эта контактная граница уходит с морской акватории вглубь полуострова. Дополнительно к этой основной системе была рассмотрена цепочка очагов, расположенных между Сахалином и Хоккайдо, где в прошлом (в 1956 г. и дважды в 1969 г.) происходили подводные землетрясения, давшие незначительные цунами на юге Сахалина (Рис. 6). Землетрясений с магнитудами 8.4 в

Японской и Сахалинской зонах за время исторических наблюдений не происходило, поэтому модельные источники с такими магнитудами для этих зон не рассматривались.

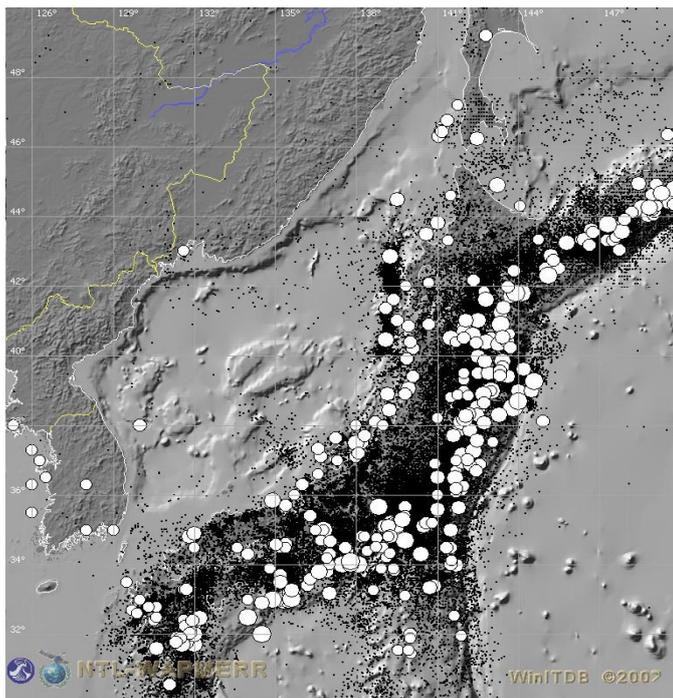


Рис. 5. Карта сейсмичности и очаги цунамигенных землетрясений Японской и Сахалинской зон. Черными точками показаны очаги инструментально определенных исторических землетрясений, происшедших в этом районе с 1900 по 2007 год. Белыми кружками показано положение очагов цунамигенных землетрясений, происшедших с 701 по 2007 год. Источник данных – WinITDB (2007).

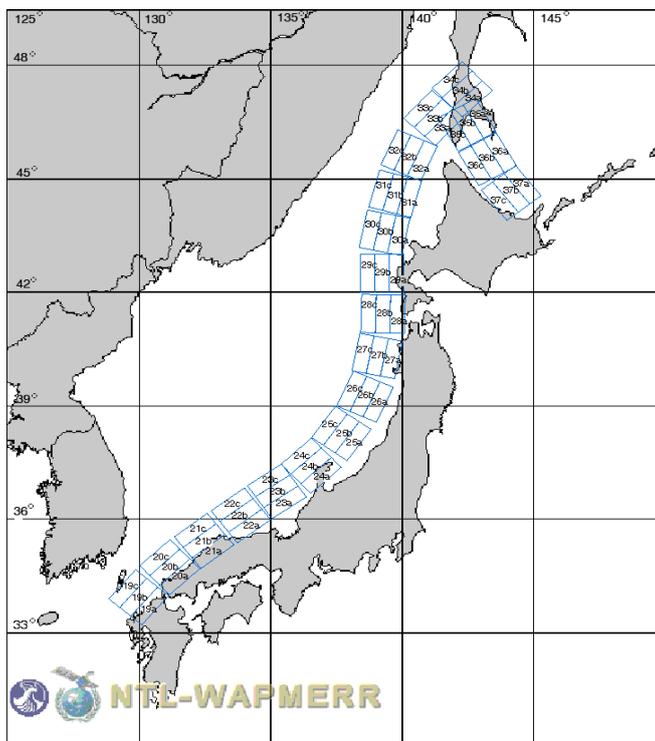


Рис. 6. Карта расположения очагов модельных землетрясений с  $M_w=7.8$  в Японской и Сахалинской зонах.

## 2.2. Сейсмичность и очаги исторических цунамигенных землетрясений удаленной зоны.

В задаче оценки цунамиопасности прибрежных территорий особого рассмотрения требует проблема удаленных цунами, генерируемых очагами, расположенными за тысячи километров от защищаемого побережья. Способность цунами распространяться на большие расстояния с минимально возможным с точки зрения закона сохранения энергии затуханием (в

пределе пропорциональным  $1/\sqrt{r}$ , где  $r$  – расстояние) является одной из наиболее известных их особенностей и позволяет им пересекать весь океанский бассейн, сохраняя свою разрушительную способность. Именно в необходимости учета удаленных очагов состоит существенное отличие задачи оценки цунами риска от во многом аналогичной задачи оценки сейсмического риска, в которой разрушительный потенциал имеют только достаточно близкие землетрясения.

Однако такого рода трансокеанские цунами являются, к счастью, весьма редкими событиями. Глобальный каталог цунами, покрывающий более 4000 лет, содержит только 11 достоверных случаев, когда волны, возбужденные сейсмическим очагом вблизи одного берега океана производили разрушительный эффект на противоположном берегу (Таблица 1). Этот список не является исчерпывающим, т.к. глобальный каталог может считаться более или менее полным (даже в отношении сильнейших событий) на временном отрезке не более последних 400 лет.

Девять из одиннадцати известных нам трансокеанских цунами произошли в Тихом океане, причем пять из них в течение XX века на достаточно коротком временном интервале в 18 лет – с 1946 по 1964 год. Очаги этих цунами располагались на Алеутах (в 1946 и 1957 годах), в Чили (в 1960 году), на Аляске (в 1964 году) и на Камчатке (в 1952 году). Цунами 1952 года для рассматриваемого региона не являлось удаленным, т.к. было вызвано очагом сильного (с магнитудой  $M_w=8.5$ ) подводного землетрясения непосредственно вблизи восточного побережья Камчатки. Трансокеанские цунами от Алеутских землетрясений 1946 и 1957 года не наблюдались на Курило-Камчатском побережье. Аляскинское цунами 1964 года, хотя и было зарегистрировано на побережье Курильских островов с высотами до 1 метра (Соловьев, 1978), не вызвало здесь сколько-нибудь ощутимого эффекта.

**Таблица 1. Список исторических трансокеанских цунами.  $M$  – магнитуда (макросейсмическая,  $M_S$  или  $M_w$ ),  $I$  – интенсивность цунами по шкале Соловьева-Имамуры,  $H_{maxNF}$  – максимальная зарегистрированная высота заплеска в ближней зоне в метрах,  $H_{maxFF}$  – максимальная зарегистрированная высота заплеска в дальней зоне (более 5000 км) в м, FAT – число жертв цунами.**

Дата и место	$M$	$I$	$H_{maxNF}$ , м	$H_{maxFF}$ , м	FAT
1 ноября, 1755, Лиссабон	8.5	4.0	30.0	7.0	30000
7 ноября, 1837, Чили	8.5	3.0	8.0	6.0	many
13 августа, 1868, Чили	9.1	3.5	15.0	5.5	612
10 мая, 1877, Чили	9.0	4.0	21.00	3.7	512
15 июня, 1896, Япония	7.4	3.8	38.2	5.5	27122
3 февраля, 1923, Камчатка	8.3	3.5	8.0	6.1	3
1 апреля, 1946, Алеуты	7.9	4.0	42.2	20.0	165
4 ноября, 1952, Камчатка	9.0	4.0	18.0	9.1	>10000
9 марта, 1957, Алеуты	9.1	3.5	22.8	16.1	none
22 мая, 1960, Чили	9.5	4.0	15.2	10.7	1400
28 марта, 28 1964, Аляска	9.2	4.5	68.0	4.9	221
26 декабря, 2004, Суматра	9.3	4.5	50.9	9.6	229866

Для Курило-Камчатского побережья особого рассмотрения требует проблема оценки опасности цунами от Южно-Американских землетрясений. Благодаря специфике взаимного расположения области источника и области воздействия (удаленность по направлению почти точно на  $180^\circ$ , в силу чего происходит заметная конвергенция фронта цунами при распространении на сфере) и малому затуханию с расстоянием, сильнейшие южно-американские цунами оказывают разрушительное воздействие на побережье Японии, Курильских остров и Камчатки. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана.

Наиболее сильное из инструментально зарегистрированных Чилийское землетрясение 22 мая 1960 года с момент-магнитудой  $M_w = 9.5$  вызвало сильнейшее в этом столетии цунами во

всем бассейне Тихого океана. У берегов Чили высота цунами достигала 15 – 20 метров, число жертв достигло 1200 человек. Через 15 часов волны, имея высоту от 5 до 10 метров, достигли Гавайских островов, вызвав там гибель 61 человека и свыше 75 миллионов долларов ущерба (Lander, Lockridge, 1989). Через 21 – 22 часа, преодолев около 16 тысяч километров, волны цунами подошли к побережью Японии, Курил и Камчатки (Рис. 7).

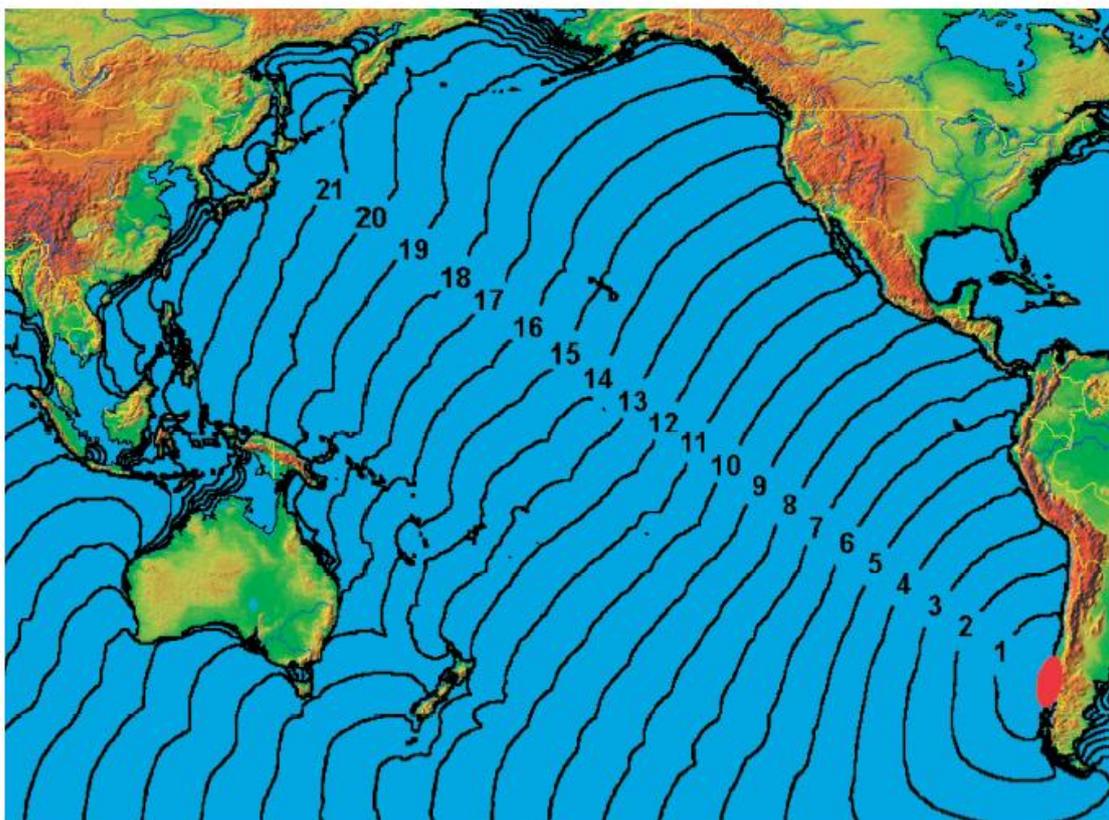


Рис. 7. Карта изохрон времен распространения Чилийского цунами 22 мая 1960 года. Цифры у изохрон показывают время распространения в часах. Сплошной эллипс показывает положение очага цунами.

Волны с высотами до 7 – 8 метров наблюдались практически на всем протяжении восточного побережья Японии (The Chilean Tsunami..., 1961). Они нанесли материальный ущерб в десятки миллионов долларов и унесли жизни 138 человек (Iida, 1984). На Курило-Камчатском побережье это цунами наблюдалось повсеместно со средними высотами 3 – 4 метра (Заякин, Лучинина, 1987). Волны наибольшей высоты (до 7 метров) наблюдались на Камчатке в бухтах Моржовая и Русская (Соловьев, 1978). Данные о размерах материального ущерба и жертвах в советских каталогах отсутствуют. В каталоге Камчатских цунами (Заякин, Лучинина, 1987) приводятся следующие сведения о проявлении этого цунами на Беринговоморском побережье.

*«В вершине бухты Лаврова цунами вызвало подтопление разгрузочных территорий, сильными течениями были сорваны и повреждены мелкие плавсредства бывшего рыбкомбината. Пароход "Полина Осипенко", стоявший в бухте на глубине 2.5 м под килем, в результате прохождения цунами ударился об дно, получив серьезные повреждения корпуса.»*

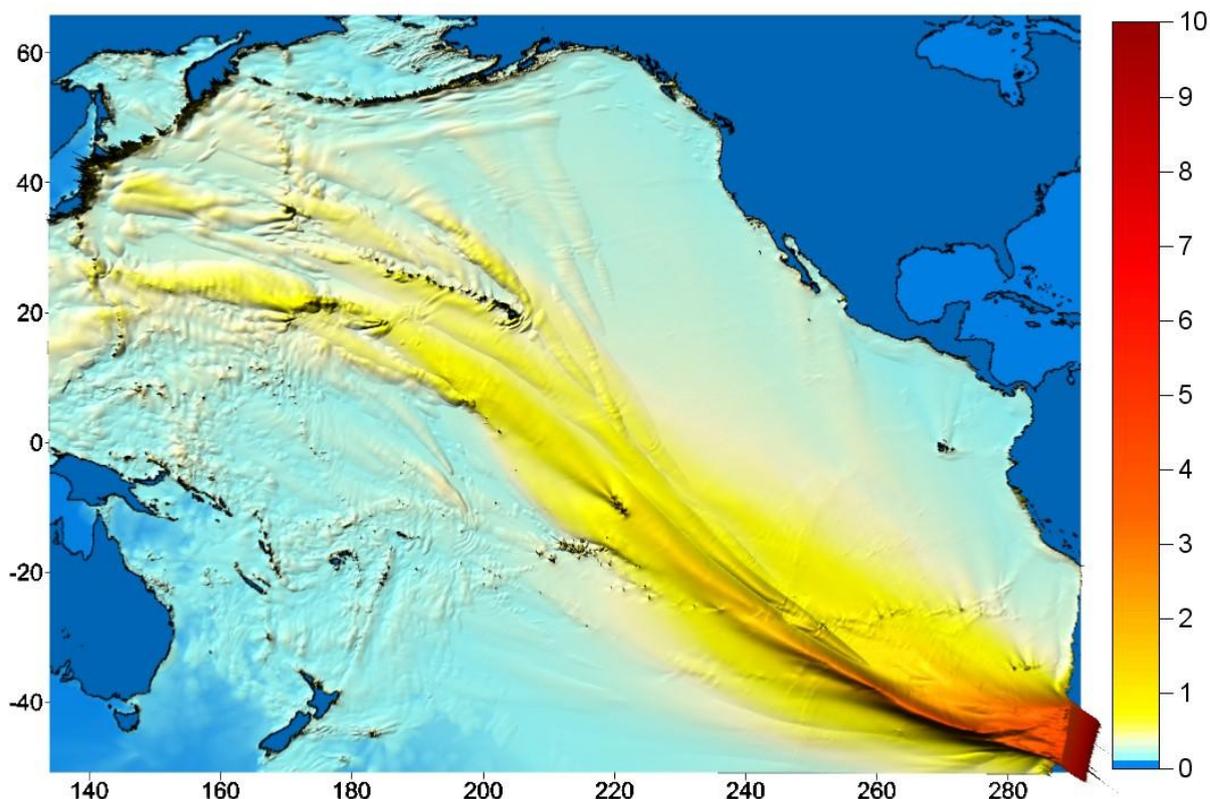
*«В районе поселка Апука у ледяного берегового вала на косе, на которой расположен поселок, наблюдались громадные взбросы воды, как при сильном шторме. Вода отступала от берега на 500 м. Были замечены три волны, выбросившие на берег глыбы льда. Период колебаний уровня составлял около 30 мин.»*

*«На полуострове Озерном глыбы льда вынесены вверх по реке Ольховой на расстояние до 500 м от устья.»*

*«На острове Беринга в районе села Никольского цунами началось с отхода воды от берега, который местами составил 30 – 50 м. Высота подъема воды не превышала 3.0 – 3.5 м. В устье реки Гаванской был сорван и заброшен волной вглубь суши на 500 м небольшой деревянный мост.»*

Колебания воды с амплитудой в несколько метров наблюдались также на южной оконечности острова Карагинский, в поселке Оссора (взломан лед в заливе), в бухте Ложных Вестей. Есть сведения о проявлении этого цунами на большом протяжении побережья Охотского моря, в частности, в районе Охотска и Магадана (Иконникова, 1964).

Во время посещения Корякии (район пос. Пахачи) летом 1992 года одним из авторов настоящего отчета были собраны некоторые дополнительные сведения о проявлении цунами 1960 года на побережье Олюторского залива. Оказалось, что старожилы обоих поселков (Пахачи и Апука) хорошо помнят это событие. Цунами наблюдалось 24 мая рано утром (по местному времени) в виде нескольких подъемов и опусканий уровня моря, вызывавших сильные течения и водовороты в протоках и устьевых частях рек, причем амплитуда понижения, по-видимому, превышала амплитуду поднятия. Наибольшая осушка наблюдалась между второй и третьей волной. В протоке у пос. Апука многие из находившихся у причалов рыболовецких сейнеров и катеров при первом же откате воды легли на дно (отсюда можно сделать вывод, что понижение уровня было не менее 3 – 4 метров), при последовавшем через 10 – 15 минут подъеме уровня воды часть из них затонула. Многие катера получили повреждения от столкновений с причалами и друг с другом, будучи сорваны со швартовов и беспорядочно перемещаясь по протоке. Явление сопровождалось сильным шумом и гулом со стороны залива (вероятно, создаваемым перемещаемыми водой массивами льда).



**Рис. 8.** Численное моделирование Чилийского цунами 22 мая 1960 года. Изображение демонстрирует распределение максимальных высот волн в каждой расчетной точке, достигнутых за все время расчета (41 час). Отчетливо видно формирование максимального потока энергии, направленного на Филиппины, Японию, Курилы и Камчатку.

В рамках настоящего контракта было выполнено численное моделирование Чилийского цунами 1960 года. Сейсмический очаг этого землетрясения моделировался разломом вдоль

главной литосферной границы раздела, полого (под углом  $20^\circ$ ) падающим под континент, длиной 1000 км и шириной 100 км и величиной подвижки по нему 20 м. Сейсмический момент  $M_0$  такого источника равен  $2 \cdot 10^{30}$  дин·см, что по корреляционному соотношению (Kanamori, 1977)  $M_W = (\lg M_0 - 16.1)/1.5$  соответствует магнитуде  $M_W = 9.5$ .

Остаточные смещения дна, создаваемые таким источником, вводились в качестве исходных данных в программу расчета начального смещения свободной поверхности океана. Расчет распространения цунами на 41 час физического времени развития процесса проводился в рамках линейной модели мелкой воды, записанной в географических координатах, по программе MassGlobalCalcul на сетках различной детальности, построенных на основе известного атласа цифровой батиметрии GEBCO.

Представленный здесь результат расчета (Рис. 8) показывает распределение максимальных высот волн, достигнутых в каждом узле сетки за все время расчета. Это распределение с наглядностью демонстрирует формирование максимального потока энергии, направленного на Филиппины, Японию, Курилы и Камчатку. Формирование такой выраженной направленности является совокупным эффектом действия начальной диаграммы излучения энергии сейсмическим источником, его ориентации, сферичности Земли и эффектами рефракции волн на неоднородностях рельефа дна Тихого океана. Имеющиеся наблюдаемые данные о фактическом распределении высот цунами вдоль побережья Тихого океана (Berkman, Symons, 1961) в общем подтверждают расчетные результаты.

Следующим по силе цунамигенным землетрясением вблизи берегов Южной Америки было землетрясение, произошедшее 10 мая 1877 года вблизи северного побережья Чили. Магнитуда этого землетрясения оценивается величиной 9.0. Оно вызвало разрушительное цунами с высотами до 20 – 24 метров на более чем 600 километровом участке Чилийского побережья между городами Икике и Антофагаста (Соловьев, Го, 1975). Волны с высотами до 3.7 м наблюдались в Хило (Гавайи), до 3.0 м в Акороа (Новая Зеландия) и до 2.4 м в Хакодате (Япония). Данные о появлении этого цунами на Курило-Камчатском побережье отсутствуют. С 1877 года, т.е. теперь уже в течение более 130 лет в этом районе не происходило сильных землетрясений, в связи с чем этот район считается наиболее опасной «сейсмической брешью» на всем протяжении Южно-Американского побережья (Kelleher, 1972; Kulikov et al., 2005).

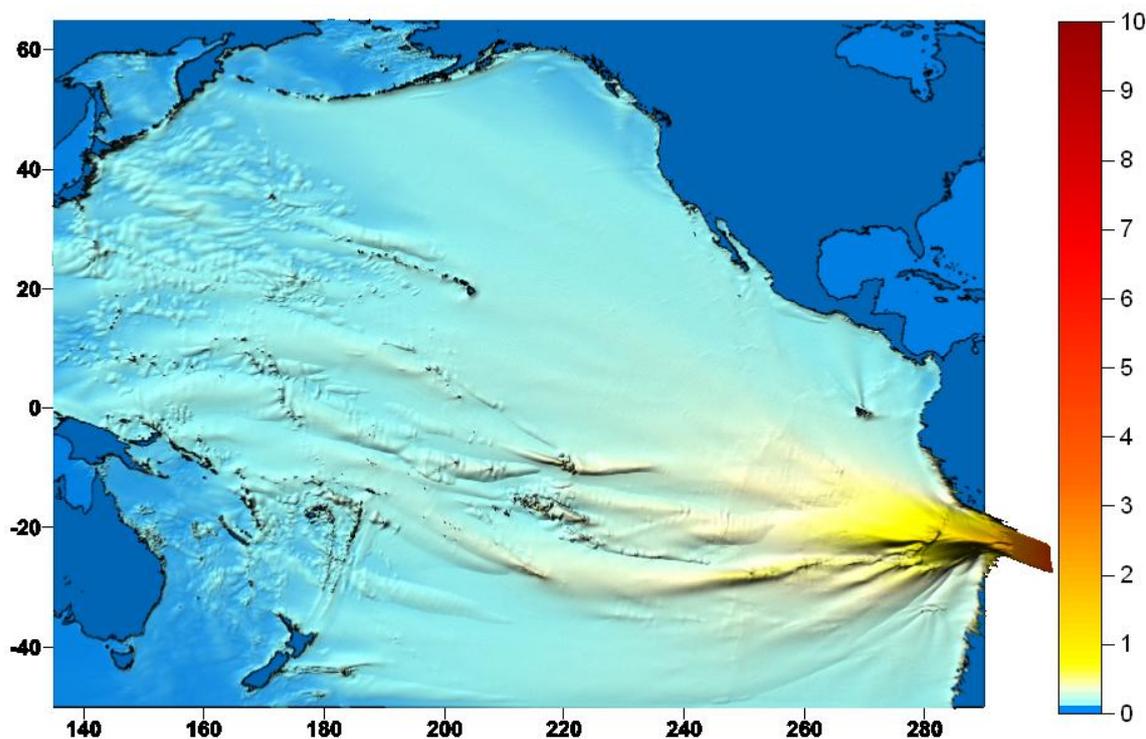


Рис. 9. Численное моделирование цунами 10 мая 1877 года в районе Икике-Антофагаста. Изображение демонстрирует распределение максимальных высот волн в каждой расчетной точке, достигнутых за все время расчета (41 час). Видно формирование максимального потока энергии, направленного на острова Полинезии и Микронезии в южной части Тихого океана.

Результат численного моделирования этого цунами представлен на Рис. 9. Очаг землетрясения здесь моделировался разломом длиной 500 км и шириной 100 км, полого (под углом 20°) падающим под континент, с подвижкой по нему величиной в 10 м. На рисунке видно формирование «луча свечения» (максимального потока энергии), направленного на острова Полинезии и Микронезии, расположенные южнее экватора. В северную часть Тихого океана в этом случае попадает значительно меньше энергии, в связи с чем землетрясения вдоль Перуанского и северной части Чилийского побережья следует считать менее опасными для Курил и Камчатки, хотя приход волн с высотами в 1 – 2 метра вполне возможен.

На побережье Перу-Чили за время исторических наблюдений (1500 – 1995 гг.) сильные ( $M > 8.0$ ) цунамигенные ( $I > 3.0$ ) землетрясения происходили около 15 раз (Таблица 2).

**Таблица 2. Список сильных южно-американских цунамигенных землетрясений по данным каталогов (Соловьев, Го, 1975; Lockridge, 1985, Iida, 1984).**

Дата	Район источника	M	I	Высота (м) на Южно-Американском побережье	Высота (м) на Японском побережье
1562.10.28	Центральное Чили	8.0	3.5	16	
1570.02.08	Центральное Чили	8.0	3.0	4	
1575.12.16	Центральное Чили	7.7	2.5	4	
1586.07.09	Перу	8.5	3.5	26	2 – 3
1604.11.24	Перу	8.5	4.0	16	
1657.03.15	Центральное Чили	8.0	2.5	8	
1687.10.20	Перу	8.5	3.0	8	2 – 3
1730.07.08	Центральное Чили	8.2	3.5	16	1 – 2
1746.10.28	Перу	8.0	4.0	24	
1751.05.24	Центральное Чили	8.2	3.5	4	2
1835.02.20	Центральное Чили	8.2	3.0	15	
1837.11.07	Южное Чили	8.2	3.0	8	<1
1868.08.13	Северное Чили	8.5	3.0	21	1 – 3
1877.05.09	Северное Чили	8.0	3.5	24	2 – 3
1906.08.17	Центральное Чили	8.6	2.0	4	<1
1960.05.22	Центральное Чили	8.5	4.0	25	3 – 6

Из этого списка по крайней мере 7 событий в каталоге (Iida, 1984) отмечены как вызвавшие разрушительные волны цунами на побережья Японских островов. К сожалению, мы не имеем аналогичных данных для этих событий по Курило-Камчатскому побережью. Однако, основываясь на модельных представлениях о распространении трансстихоокеанских цунами и на результатах наблюдения цунами 1960 года, можно предполагать, что средние высоты волн Южно-Американских цунами на Японском и Курило-Камчатском побережьях примерно одинаковы.

По данным (Таблица 2) можно оценить средний период повторяемости наблюдения Южно-Американских цунами с высотами 2 и более метров у берегов Японии. За последние 400 лет (с 1586 по 1995 год) он оказывается равным 58 годам, что сравнимо или даже существенно меньше ожидаемого периода повторяемости местных землетрясений с магнитудой 7.5 (порядка 100 – 150 лет). Отсюда следует, что вероятность проявления удаленного цунами для любой точки восточного побережья Курил и Камчатки является, по крайней мере, сопоставимой с вероятностью цунами высотой более 2 метров от местного землетрясения. Для западного же побережья Курил и Камчатки, а также всего Охотоморского побережья, которые практически полностью экранированы от воздействия цунами, порожденных подводными землетрясениями Курило-Камчатской сейсмической зоны, риск цунами от удаленных Южно-Американских источников может быть даже выше риска региональных цунами.

Другим районом с потенциальной угрозой возникновения трансокеанских цунами следу-

ет считать западное побережье США вблизи штатов Вашингтон и Орегон. По сравнению с расположенным к югу от них штатом Калифорния, этот район обладает существенно более слабой фоновой сейсмичностью, однако геологическими работами и изучением следов палеоцунами было доказано, что здесь также возможны сильные (с магнитудой до 9.0) землетрясения, период повторяемости которых варьируется в интервале 250 – 300 лет (Atwater, 1987). Последнее по времени такое землетрясение произошло в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон) в конце января 1700 года (Рис. 10). Письменных свидетельств о нем не осталось (поскольку землетрясение произошло еще до прибытия первых европейцев на эти земли). Само событие было идентифицировано исключительно по геологическим признакам, его точную дату удалось установить путем корреляции с японскими хрониками, сообщавшими о необычных волнах с высотами до 4 – 5 метров, наблюдавшихся в различных пунктах восточного побережья Японии, причем о каких-либо сейсмических событиях в то время не сообщалось (Atwater et al., 2005).

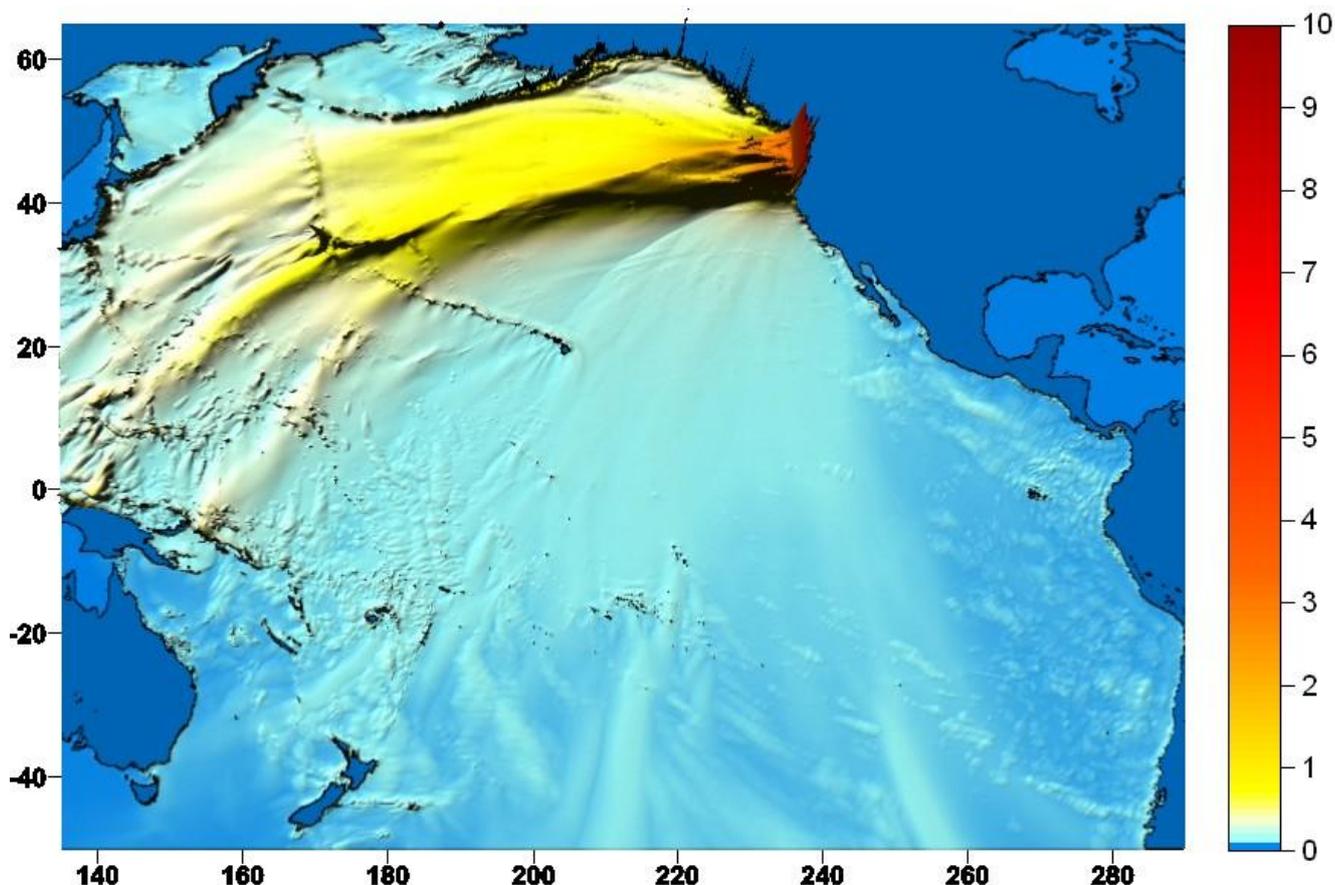


Рис. 10. Численное моделирование цунами, происшедшего в январе 1700 года в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон). Волны с большими амплитудами охватили практически всю северную часть Тихого океана.

Сведений о проявлении этого цунами на побережье Курил и Камчатки также не имеется (что не удивительно, учитывая отсутствие русских поселенцев, прибывших на это побережье только спустя несколько десятилетий). Каких-либо катастрофических последствий там, очевидно, и не было, но волны высотой 2 – 3 метра вполне могли наблюдаться практически на всем восточном побережье Курильских островов. Повторение такого события в современных условиях, помимо катастрофических последствий для населения западного побережья США, представляет определенную опасность и для северо-западных берегов Тихого океана, включая побережье Камчатки и Курильских островов.



принятой модели механизма цунамигенного землетрясения приведены в таблице (Таблица 4). Собственно математическая модель, использованная для расчета начальных смещений поверхности океана, порождаемых модельными цунамигенными землетрясениями, изложена в отчете исполнителей по контракту № 1н-07 (Итоговый отчет, 2007).

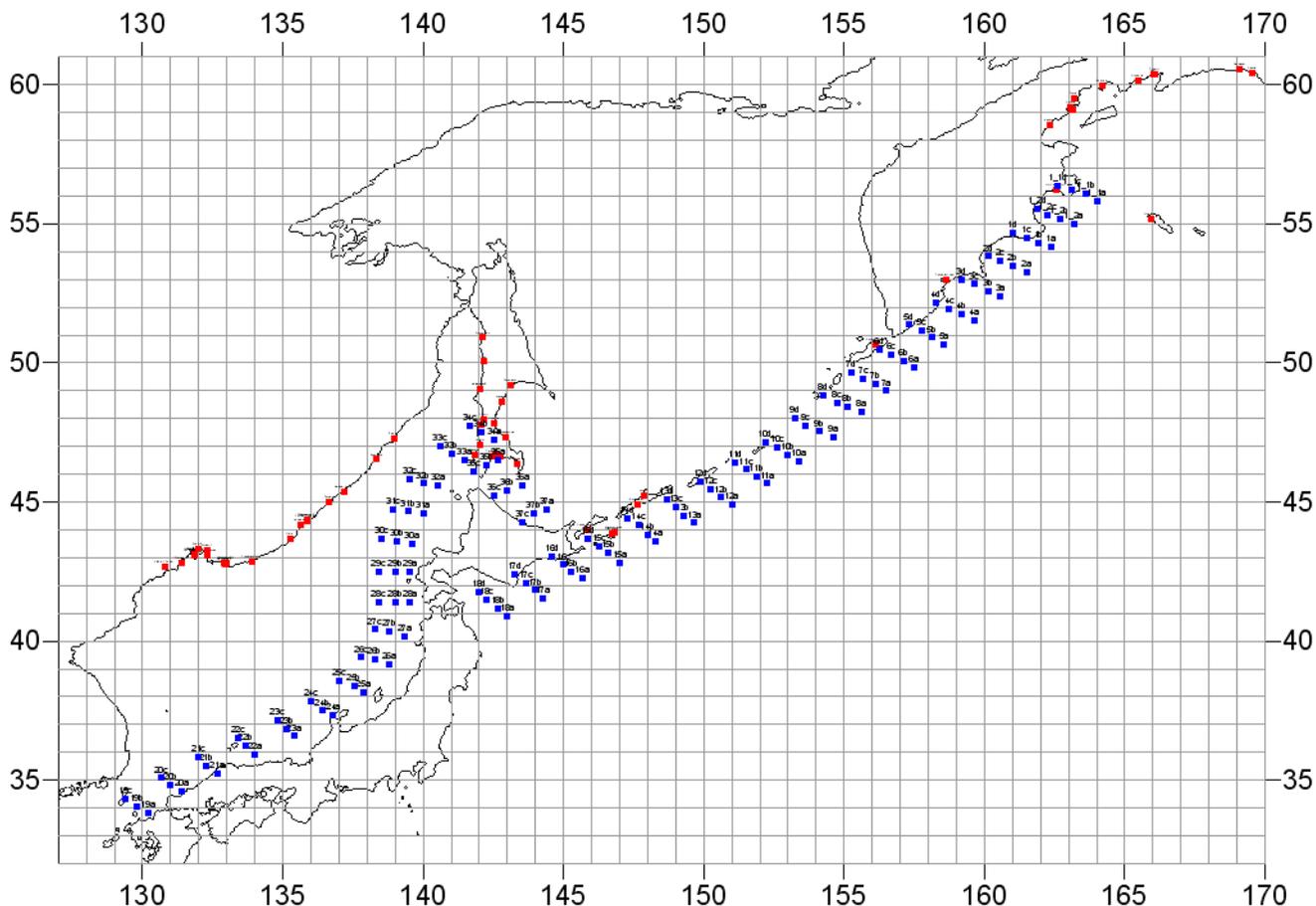


Рис. 12. Схема глобальной расчетной области. Указаны точки привязки очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8 и защищаемых пунктов.

Схематическое расположение этих подобластей (Рис. 13), рельеф дна которых был оцифрован с шагом 15 секунд, показывает, что они, частично пересекаясь, включают все защищаемые пункты и все модельные землетрясения. Географические координаты подобластей таковы:

Таблица 3.

ID	Географические координаты расчетных подобластей для цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8				Рельеф дна
	Минимальная Восточная долгота	Максимальная Восточная долгота	Минимальная Северная широта	Максимальная Северная широта	
78-1a	155.1	167	49.9	58	Рис. 14
78-1b	151	161	46	53	
78-2	139.6	155.5	39.5	48.5	Рис. 15
78-3	135	149.5	41	51.5	
78-4	127	142	32	47	Рис. 16
78-5	160	170	53	61	

**Таблица 4. Параметры очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8.**

<b>ID</b>	<b>y</b>	<b>x</b>	<b>L</b>	<b>W</b>	<b>DE</b>	<b>LA</b>	<b>TE</b>	<b>D0</b>	<b>H_top</b>
1_1a	55.83	164.00	108	38	15	90	33	3.42	5
1_1b	56.08	163.63	108	38	15	90	33	2.74	15
1_1c	56.25	163.13	108	38	15	90	33	2.74	25
1_1d	56.38	162.63	108	38	15	90	33	2.74	35
1_2a	55.00	163.19	108	38	15	90	33	3.42	5
1_2b	55.17	162.69	108	38	15	90	33	2.74	15
1_2c	55.33	162.25	108	38	15	90	33	2.74	25
1_2d	55.54	161.88	108	38	15	90	33	2.74	35
1a	54.17	162.38	108	38	15	90	33	3.42	5
1b	54.33	161.94	108	38	15	90	33	2.74	15
1c	54.50	161.50	108	38	15	90	33	2.74	25
1d	54.67	161.00	108	38	15	90	33	2.74	35
2a	53.25	161.50	108	38	15	90	30	3.42	5
2b	53.50	161.00	108	38	15	90	30	2.74	15
2c	53.67	160.56	108	38	15	90	30	2.74	25
2d	53.83	160.13	108	38	15	90	30	2.74	35
3a	52.42	160.56	108	38	15	90	33	3.42	5
3b	52.58	160.13	108	38	15	90	33	2.74	15
3c	52.83	159.63	108	38	15	90	33	2.74	25
3d	53.00	159.19	108	38	15	90	33	2.74	35
4a	51.54	159.63	108	38	15	90	35	3.42	5
4b	51.75	159.19	108	38	15	90	35	2.74	15
4c	51.96	158.75	108	38	15	90	35	2.74	25
4d	52.17	158.25	108	38	15	90	35	2.74	35
5a	50.67	158.56	108	38	15	90	37	3.42	5
5b	50.92	158.13	108	38	15	90	37	2.74	15
5c	51.17	157.75	108	38	15	90	37	2.74	25
5d	51.38	157.31	108	38	15	90	37	2.74	35
6a	49.83	157.50	108	38	15	90	37	3.42	5
6b	50.08	157.13	108	38	15	90	37	2.74	15
6c	50.29	156.69	108	38	15	90	37	2.74	25
6d	50.50	156.25	108	38	15	90	37	2.74	35
7a	49.00	156.50	108	38	15	90	35	3.42	5
7b	49.25	156.13	108	38	15	90	35	2.74	15
7c	49.42	155.69	108	38	15	90	35	2.74	25
7d	49.67	155.25	108	38	15	90	35	2.74	35
8a	48.25	155.63	108	38	15	90	35	3.42	5
8b	48.42	155.13	108	38	15	90	35	2.74	15
8c	48.58	154.75	108	38	15	90	35	2.74	25
8d	48.83	154.25	108	38	15	90	35	2.74	35
9a	47.33	154.63	108	38	15	90	41	3.42	5
9b	47.54	154.13	108	38	15	90	41	2.74	15
9c	47.75	153.63	108	38	15	90	41	2.74	25
9d	48.00	153.25	108	38	15	90	41	2.74	35
10a	46.46	153.38	108	38	15	90	42	3.42	5
10b	46.71	153.00	108	38	15	90	42	2.74	15
10c	46.96	152.63	108	38	15	90	42	2.74	25
10d	47.17	152.19	108	38	15	90	42	2.74	35
11a	45.67	152.25	108	38	15	90	46	3.42	5
11b	45.92	151.88	108	38	15	90	46	2.74	15
11c	46.17	151.50	108	38	15	90	46	2.74	25
11d	46.42	151.13	108	38	15	90	46	2.74	35
12a	44.92	151.00	108	38	15	90	48	3.42	5
12b	45.17	150.63	108	38	15	90	48	2.74	15

<b>12c</b>	45.46	150.25	108	38	15	90	48	2.74	25
<b>12d</b>	45.75	149.88	108	38	15	90	48	2.74	35
<b>13a</b>	44.25	149.67	108	38	15	90	52	3.42	5
<b>13b</b>	44.50	149.27	108	38	15	90	52	2.74	15
<b>13c</b>	44.83	149.00	108	38	15	90	52	2.74	25
<b>13d</b>	45.08	148.67	108	38	15	90	52	2.74	35
<b>14a</b>	43.58	148.27	108	38	15	90	56	3.42	5
<b>14b</b>	43.83	148.00	108	38	15	90	56	2.74	15
<b>14c</b>	44.17	147.67	108	38	15	90	56	2.74	25
<b>14d</b>	44.42	147.27	108	38	15	90	56	2.74	35
<b>15a</b>	42.83	147.00	108	38	15	90	56	3.42	5
<b>15b</b>	43.17	146.60	108	38	15	90	56	2.74	15
<b>15c</b>	43.42	146.27	108	38	15	90	56	2.74	25
<b>15d</b>	43.67	145.87	108	38	15	90	56	2.74	35
<b>16a</b>	42.25	145.67	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>16b</b>	42.50	145.27	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>16c</b>	42.75	145.00	108	38	15	90	58	2.74	25
<b>16d</b>	43.04	144.60	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>17a</b>	41.54	144.27	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>17b</b>	41.83	144.00	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>17c</b>	42.08	143.67	108	38	15	90	58	2.74	25
<b>17d</b>	42.42	143.27	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>18a</b>	40.92	143.00	108	38	15	90	58	3.42	5
<b>18b</b>	41.17	142.67	108	38	15	90	58	2.74	15
<b>18c</b>	41.50	142.27	108	38	15	90	58	2.74	25
<b>18d</b>	41.75	142.00	108	38	15	90	58	2.74	35
<b>19a</b>	33.83	130.20	108	38	70	90	44	2.74	5
<b>19b</b>	34.04	129.80	108	38	90	90	44	2.74	5
<b>19c</b>	34.33	129.40	108	38	110	90	44	2.74	5
<b>20a</b>	34.58	131.40	108	38	70	90	52	2.74	5
<b>20b</b>	34.83	131.00	108	38	90	90	52	2.74	5
<b>20c</b>	35.08	130.67	108	38	110	90	52	2.74	5
<b>21a</b>	35.25	132.67	108	38	70	90	59	2.74	5
<b>21b</b>	35.50	132.27	108	38	90	90	59	2.74	5
<b>21c</b>	35.83	132.00	108	38	110	90	59	2.74	5
<b>22a</b>	35.92	134.00	108	38	70	90	61	2.74	5
<b>22b</b>	36.25	133.67	108	38	90	90	61	2.74	5
<b>22c</b>	36.50	133.40	108	38	110	90	61	2.74	5
<b>23a</b>	36.58	135.40	108	38	70	90	61	2.74	5
<b>23b</b>	36.83	135.13	108	38	90	90	61	2.74	5
<b>23c</b>	37.17	134.80	108	38	110	90	61	2.74	5
<b>24a</b>	37.33	136.80	108	38	70	90	53	2.74	5
<b>24b</b>	37.50	136.40	108	38	90	90	53	2.74	5
<b>24c</b>	37.83	136.00	108	38	110	90	53	2.74	5
<b>25a</b>	38.17	137.87	108	38	70	90	40	2.74	5
<b>25b</b>	38.38	137.53	108	38	90	90	40	2.74	5
<b>25c</b>	38.58	137.00	108	38	110	90	40	2.74	5
<b>26a</b>	39.17	138.80	108	38	70	90	30	2.74	5
<b>26b</b>	39.33	138.27	108	38	90	90	30	2.74	5
<b>26c</b>	39.42	137.80	108	38	110	90	30	2.74	5
<b>27a</b>	40.17	139.33	108	38	70	90	16	2.74	5
<b>27b</b>	40.33	138.80	108	38	90	90	16	2.74	5
<b>27c</b>	40.42	138.27	108	38	110	90	16	2.74	5
<b>28a</b>	41.42	139.53	108	38	70	90	0	2.74	5
<b>28b</b>	41.42	139.00	108	38	90	90	0	2.74	5
<b>28c</b>	41.42	138.40	108	38	110	90	0	2.74	5

<b>29a</b>	42.50	139.53	108	38	70	90	2	2.74	5
<b>29b</b>	42.50	139.00	108	38	90	90	2	2.74	5
<b>29c</b>	42.50	138.40	108	38	110	90	2	2.74	5
<b>30a</b>	43.50	139.60	108	38	70	90	9	2.74	5
<b>30b</b>	43.58	139.07	108	38	90	90	9	2.74	5
<b>30c</b>	43.67	138.53	108	38	110	90	9	2.74	5
<b>31a</b>	44.58	140.00	108	38	70	90	19	2.74	5
<b>31b</b>	44.67	139.47	108	38	90	90	19	2.74	5
<b>31c</b>	44.75	138.93	108	38	110	90	19	2.74	5
<b>32a</b>	45.58	140.53	108	38	70	90	28	2.74	5
<b>32b</b>	45.67	140.00	108	38	90	90	28	2.74	5
<b>32c</b>	45.83	139.53	108	38	110	90	28	2.74	5
<b>33a</b>	46.50	141.47	108	38	70	90	31	2.74	5
<b>33b</b>	46.75	141.00	108	38	90	90	31	2.74	5
<b>33c</b>	47.00	140.60	108	38	110	90	31	2.74	5
<b>34a</b>	47.25	142.53	108	38	70	90	34	2.74	5
<b>34b</b>	47.50	142.07	108	38	90	90	34	2.74	5
<b>34c</b>	47.75	141.67	108	38	110	90	34	2.74	5
<b>35a</b>	46.50	142.67	108	38	70	90	160	2.74	5
<b>35b</b>	46.33	142.27	108	38	90	90	160	2.74	5
<b>35c</b>	46.08	141.80	108	38	110	90	160	2.74	5
<b>36a</b>	45.58	143.53	108	38	70	90	151	2.74	5
<b>36b</b>	45.42	143.00	108	38	90	90	151	2.74	5
<b>36c</b>	45.25	142.53	108	38	110	90	151	2.74	5
<b>37a</b>	44.75	144.40	108	38	70	90	146	2.74	5
<b>37b</b>	44.58	143.93	108	38	90	90	146	2.74	5
<b>37c</b>	44.29	143.53	108	38	110	90	146	2.74	5

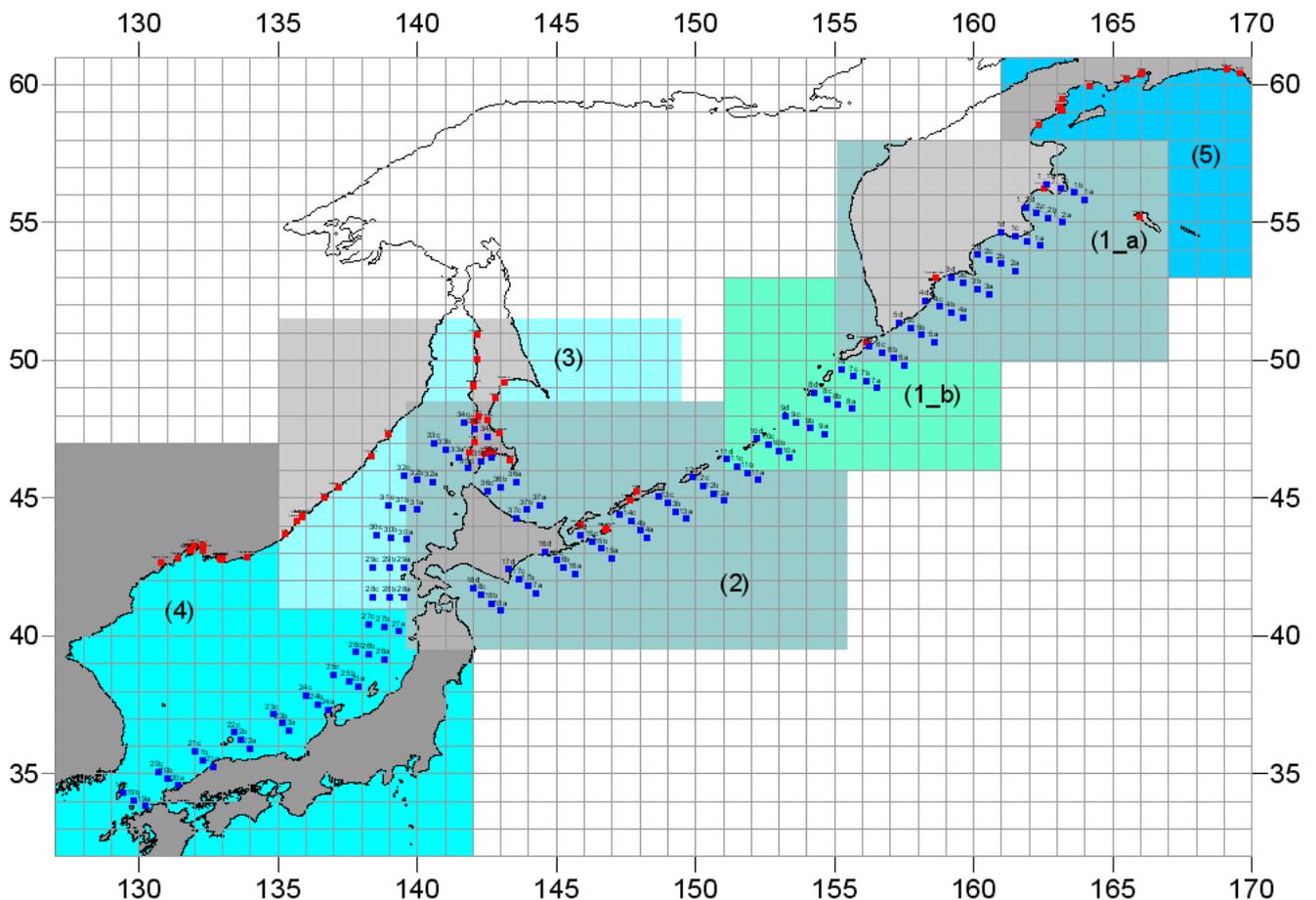


Рис. 13. Схема разбиения на подобласти для моделирования волн, порожденных модельными цунамигенными землетрясениями с магнитудой 7.8.

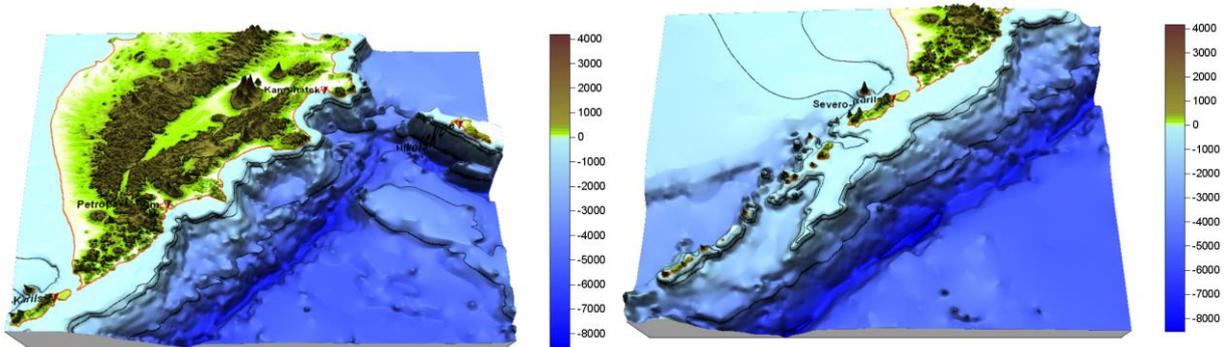


Рис. 14. Рельефы дна расчетных подобластей «78-1а» – слева и «78-1б» – справа. Указаны точки привязки защищаемых пунктов.

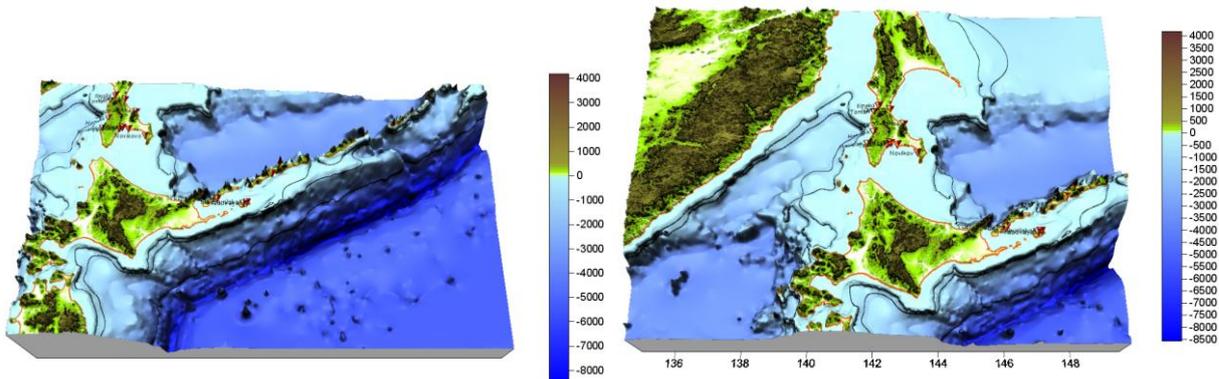


Рис. 15. Рельефы дна расчетных подобластей «78-2» – слева и «78-3» – справа. Указаны точки привязки защищаемых пунктов.

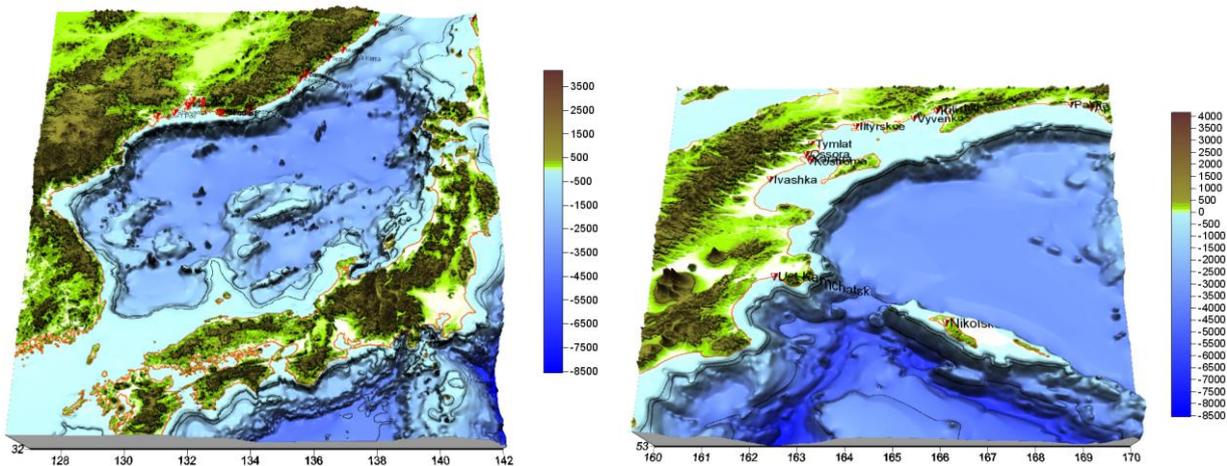


Рис. 16. Рельефы дна расчетных подобластей «78-4» – слева и «78-5» – справа. Указаны точки привязки защищаемых пунктов.

Аналогичная работа была выполнена для модельных источников с магнитудой 8.4. Таким образом, для совокупности модельных землетрясений с магнитудой 8.4 (Рис. 17) были выделены 3 расчетные подобласти. Параметры соответствующих источников в принятой модели механизма цунамигенного землетрясения приведены в таблице (Таблица 5).

Таблица 5 Параметры очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4.

ID	y	x	L	W	DE	LA	TE	D0	H_top
2b	53.40	161.25	215	75	15	90	30	6.1	5
2d	53.80	160.25	215	75	15	90	30	5.5	25
4b	51.70	159.25	215	75	15	90	35	6.1	5
4d	52.10	158.30	215	75	15	90	35	5.5	25
6b	50.10	157.28	215	75	15	90	37	6.1	5
6d	50.60	156.45	215	75	15	90	37	5.5	25
8b	48.35	155.45	215	75	15	90	35	6.1	5
8d	48.80	154.50	215	75	15	90	35	5.5	25

10b	46.75	153.35	215	75	15	90	42	6.1	5
10d	47.25	152.40	215	75	15	90	42	5.5	25
12b	45.20	150.85	215	75	15	90	48	6.1	5
12d	45.76	150.00	215	75	15	90	48	5.5	25
14b	43.75	148.20	215	75	15	90	56	6.1	5
14d	44.30	147.30	215	75	15	90	56	5.5	25
16b	42.40	145.40	215	75	15	90	58	6.1	5
16d	43.00	144.60	215	75	15	90	58	5.5	25
18b	41.36	142.71	215	75	15	90	58	6.1	5
18d	41.85	142.00	215	75	15	90	58	5.5	25

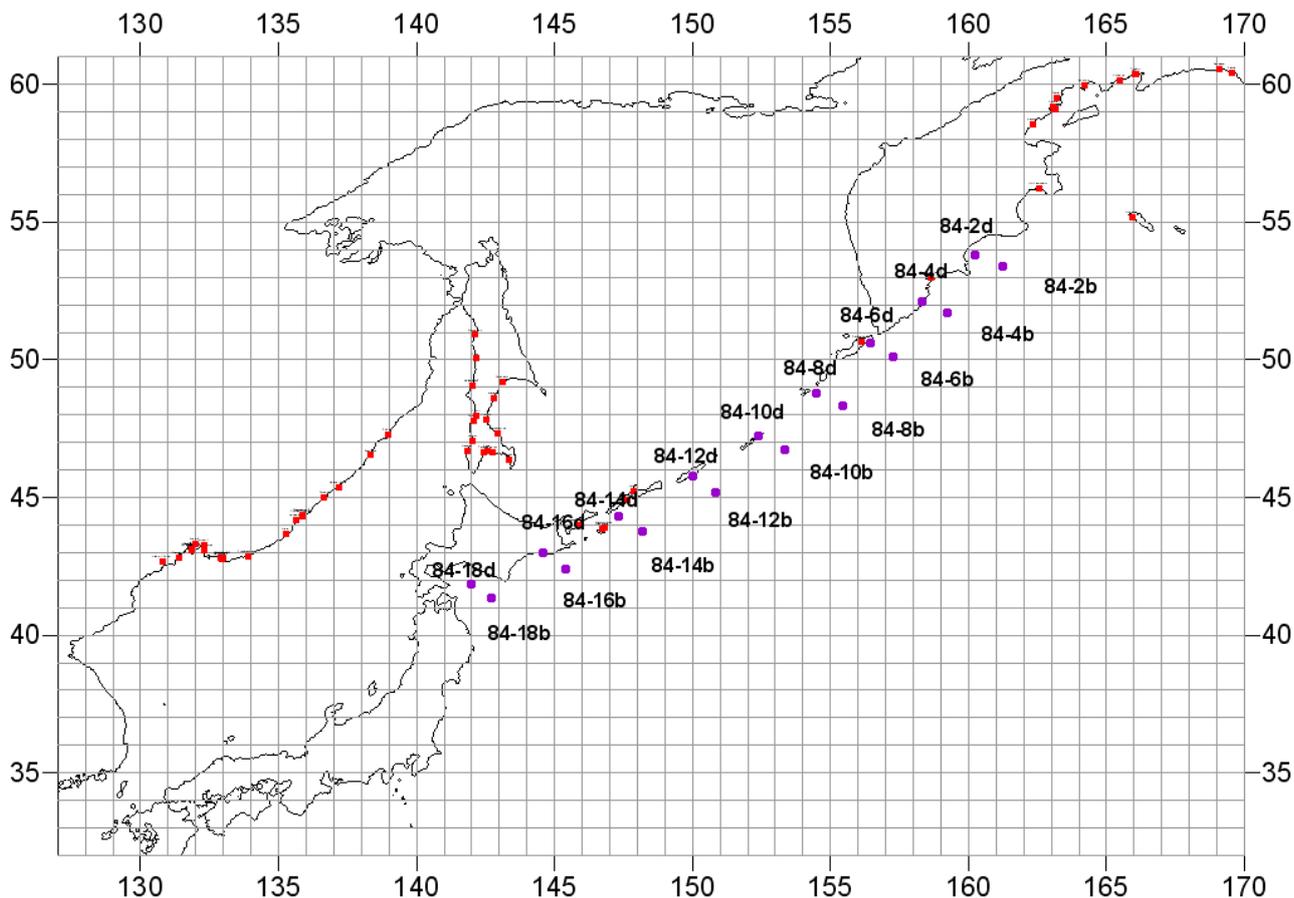


Рис. 17. Схема глобальной расчетной области. Указаны точки привязки очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4 и защищаемых пунктов.

Схематическое расположение этих подобластей (Рис. 18), рельеф дна которых был оцифрован с шагом 15 секунд, показывает, что они, частично пересекаясь, включают выбранные для этой части расчетов защищаемые пункты и модельные землетрясения. Анализ взаимного расположения системы очагов с магнитудой 8.4 и всей совокупности защищаемых пунктов приводит к выводу о нецелесообразности включения Приморских виртуальных мареографов в серию вычислительных экспериментов для этих очагов.

Географические координаты подобластей таковы:

ID	Географические координаты расчетных подобластей для цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4				Рельеф дна
	Минимальная Восточная долгота	Максимальная Восточная долгота	Минимальная Северная широта	Максимальная Северная широта	
84-1	155	170	49	61	Рис. 19
84-2	145	167	42.5	57	
84-3	139	161	39	53	

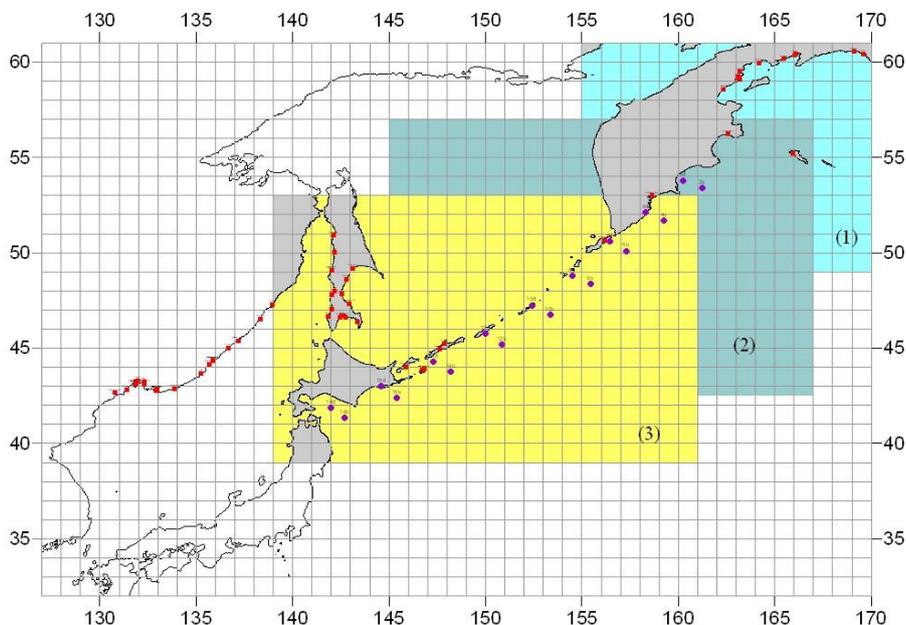


Рис. 18. Схема разбиения на подобласти для моделирования волн, порожденных модельными цунамигенными землетрясениями с магнитудой 8.4.

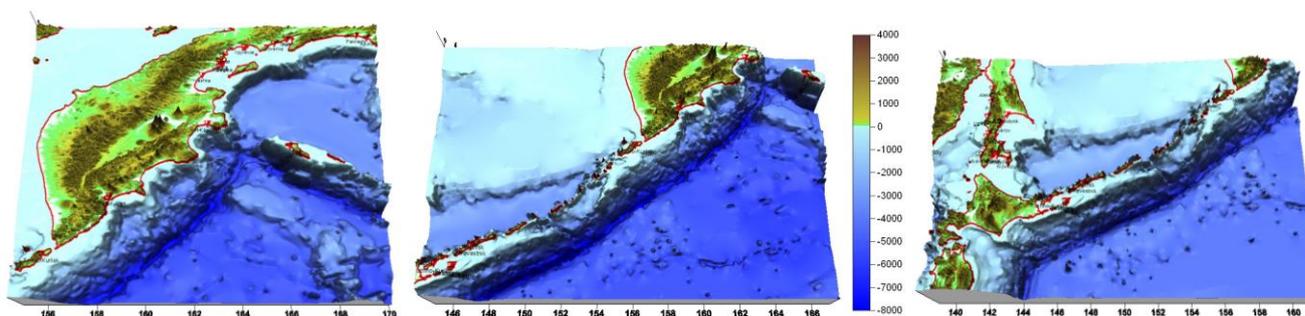


Рис. 19. Рельефы дна расчетных подобластей «84-1» – слева, «84-2» – в центре и «84-3» – справа. Указаны точки привязки защищаемых пунктов.

### 3.2. Результаты определения характеристик воздействия волн цунами у побережья Камчатки, Курильских островов, Сахалина и Приморья. Общая характеристика.

Собственно результаты расчетов были оформлены в виде соответствующих баз данных и переданы Заказчику в сентябре 2008 г. Материалы их предварительной обработки были представлены также в виде Приложений к соответствующему отчету. В качестве базовых были представлены результаты, рассчитанные на 15-секундных сетках в подобластях, перечисленных в предыдущем разделе.

Краткие аннотации приложенных к отчету материалов (файлов) были приведены в **Приложении 3** – файл List\_of\_Files.doc.

**Приложение 4** содержало иллюстрации результатов, рассчитанных на 15-секундной сетке в подобластях «78-1а», «78-1б», «78-2», «78-3», «78-4», «78-5» для источников магнитуды 7.8:

- общая схема расчетной области с размещением источников и защищаемых пунктов, схема последующего разбиения на подобласти,
- рельеф дна соответствующей расчетной подобласти,
- картины свечения для соответствующих источников,
- гистограммы с распределениями максимальных, минимальных высот волн, а также «размаха волн» – полусуммы абсолютных значений минимальных и максимальных высот волн по всем защищаемым пунктам,
- экстремальные мареограммы в пунктах их «наблюдения».

**Приложение 5** содержало иллюстрации результатов, рассчитанных на **15-секундной сетке в подобластях** «84-1», «84-2», «84-3» для источников магнитуды 8.4:

- общая схема расчетной области с размещением источников и защищаемых пунктов, схема последующего разбиения на подобласти,
- рельеф дна расчетной области,
- картины свечения для соответствующих источников,
- гистограммы с распределениями максимальных, минимальных высот волн, а также «размаха волн» – полусуммы абсолютных значений минимальных и максимальных высот волн по всем защищаемым пунктам,
- экстремальные мареограммы в пунктах их «наблюдения».

Принятая исполнителями методика расчета с выделением подобластей потребовала дополнительного обоснования и тщательного анализа, сравнения и сопоставления полученных результатов. Такая работа была выполнена и ее результаты были приведены в соответствующих Приложениях.

Так, **Приложение 6** содержало материалы упомянутых выше сравнений по материалам расчетов для источников магнитуды 7.8:

- Графики, размещенные в файле **78-3-Comp-29b.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «29b» с магнитудой 7.8 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и в подобласти «78-3» на одноминутной сетке (**синие** кривые с именем «1 m-sd»), а также с расчетом в этой же подобласти на 15-секундной сетке (**красные** кривые с именем «15s»).
- Графики, размещенные в файле **78-3-Comp-37b.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «37b» с магнитудой 7.8 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и в подобласти «78-3» на одноминутной сетке (**синие** кривые с именем «1 m-sd»), а также с расчетом в этой же подобласти на 15-секундной сетке (**красные** кривые с именем «15s»).
- Графики, размещенные в файле **78-4-Comp-19b.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «19b» с магнитудой 7.8 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и в подобласти «78-4» на одноминутной сетке (**синие** кривые с именем «1 m-4»), а также с расчетом в этой же подобласти на 15-секундной сетке (**красные** кривые с именем «15s»).
- Графики, размещенные в файле **78-4-Comp-28b.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «28b» с магнитудой 7.8 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и в подобласти «78-4» на одноминутной сетке (**синие** кривые с именем «1 m-4»), а также с расчетом в этой же подобласти на 15-секундной сетке (**красные** кривые с именем «15s»).

Близкие по характеру результаты, но уже для источников с магнитудой 8.4 были приведены в **Приложении 7**:

- Графики, размещенные в файле **Comp-2b-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «2b» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-1» (**зеленые** кривые с именем «15 s-1»), «84-2» (**красные** кривые с именем «15s-2»).
- Графики, размещенные в файле **Comp-2d-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «2d» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (**черные** кривые с именем «1 m») и на 15-

секундной сетке в подобластях «84-1» (зеленые кривые с именем «15 s-1»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)

- Графики, размещенные в файле **Comp-4b-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «4b» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-1» (зеленые кривые с именем «15 s-1»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)
- Графики, размещенные в файле **Comp-4d-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «4d» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-1» (зеленые кривые с именем «15 s-1»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)
- Графики, размещенные в файле **Comp-6b-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «6b» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-3» (синие кривые с именем «15 s-3»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)
- Графики, размещенные в файле **Comp-6d-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «6d» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-3» (синие кривые с именем «15 s-3»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)
- Графики, размещенные в файле **Comp-12d-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «12d» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-3» (синие кривые с именем «15 s-3»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)
- Графики, размещенные в файле **Comp-12b-84.doc**, иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «12b» с магнитудой 8.4 по глобальной области на одноминутной сетке (черные кривые с именем «1 m») и на 15-секундной сетке в подобластях «84-3» (синие кривые с именем «15 s-3»), «84-2» (красные кривые с именем «15s-2»)

Выбор источников здесь был сделан так, чтобы в каждой подобласти были рассмотрены достаточно удаленные друг от друга цунамигенные землетрясения.

К настоящему отчету прилагаются аналогичные базы данных, рассчитанные с использованием нелинейной модели, а также материалы сопоставления «линейных» и «нелинейных» результатов. Сравнение мареограмм, прилагаемых к настоящему отчету, показывает, что заметных отличий в результатах, полученных по линейной и нелинейной моделям, а также результатов, полученных для одних и тех же модельных очагов в различных расчетных подобластях, не наблюдалось. Этот вывод, с одной стороны, подтверждает выбранную исполнителями методологию вычислений с использованием частично пересекающихся подобластей, с другой, указывает на малость нелинейных эффектов в рассмотренной совокупности сценариев воздействия волн цунами на побережье.

Следует отметить, что подобное заключение не может быть автоматически распространено на сценарии удаленных цунами (в планах на 2009 – 2011 гг.), моделирование которых потребует сопоставления результатов, получаемых в линейной, нелинейной, а также, непременно, нелинейно-дисперсионной постановках.

### **3.3. Экономичные вычислительные технологии для повышения точности моделирования с использованием расчетных областей различной детальности.**

Целью работ, излагаемых в настоящем разделе, является достижение значительного ускорения выполнения численных экспериментов по расчету высот волн цунами, генерируемых

множеством модельных источников за счет организации вычислений с использованием комбинации расчетных областей различной детальности.

### 3.3.1 Общая характеристика проблемы.

Как было указано выше, исследование расчетных материалов и их сопоставление с известными историческими данными показали, что исходная минутная равномерная сетка не всегда обеспечивает требуемую точность. Рассчитанные на такой сетке в акваториях, содержащих протяженные мелководные зоны и резкие перепады глубин, значения амплитуд волн, порожденных источниками, расположенными на большой глубине, оказываются сильно заниженными в прибрежных мареографах.

Суть проблемы может быть продемонстрирована на примере задачи, связанной с реальным регионом – частью побережья Камчатки, омываемой Карагинским заливом, рельеф дна которого характеризуется обширным прибрежным мелководьем. Начальное возвышение свободной поверхности было рассчитано от двух сейсмических источников магнитуды 7.8, один из которых (25с, по терминологии контракта 01н-07) находился в глубоководной зоне акватории, другой (24с) – на мелководье. Численный эксперимент был выполнен на трех сетках (самая грубая – минутная, каждая последующая получена путем уменьшения шага сетки вдвое). Изменения уровня свободной поверхности регистрировались на виртуальных мареографах, установленных вдоль берега.

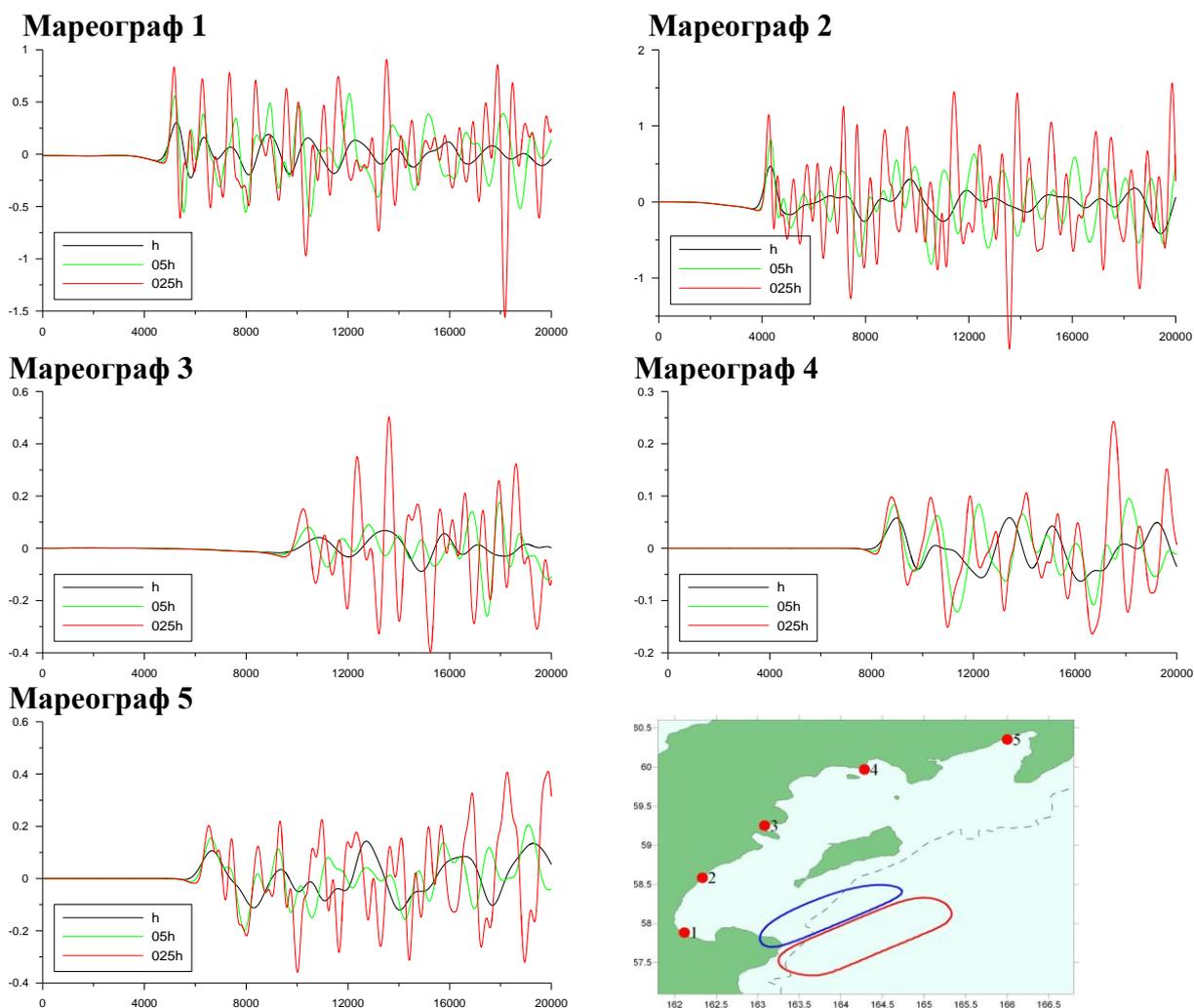
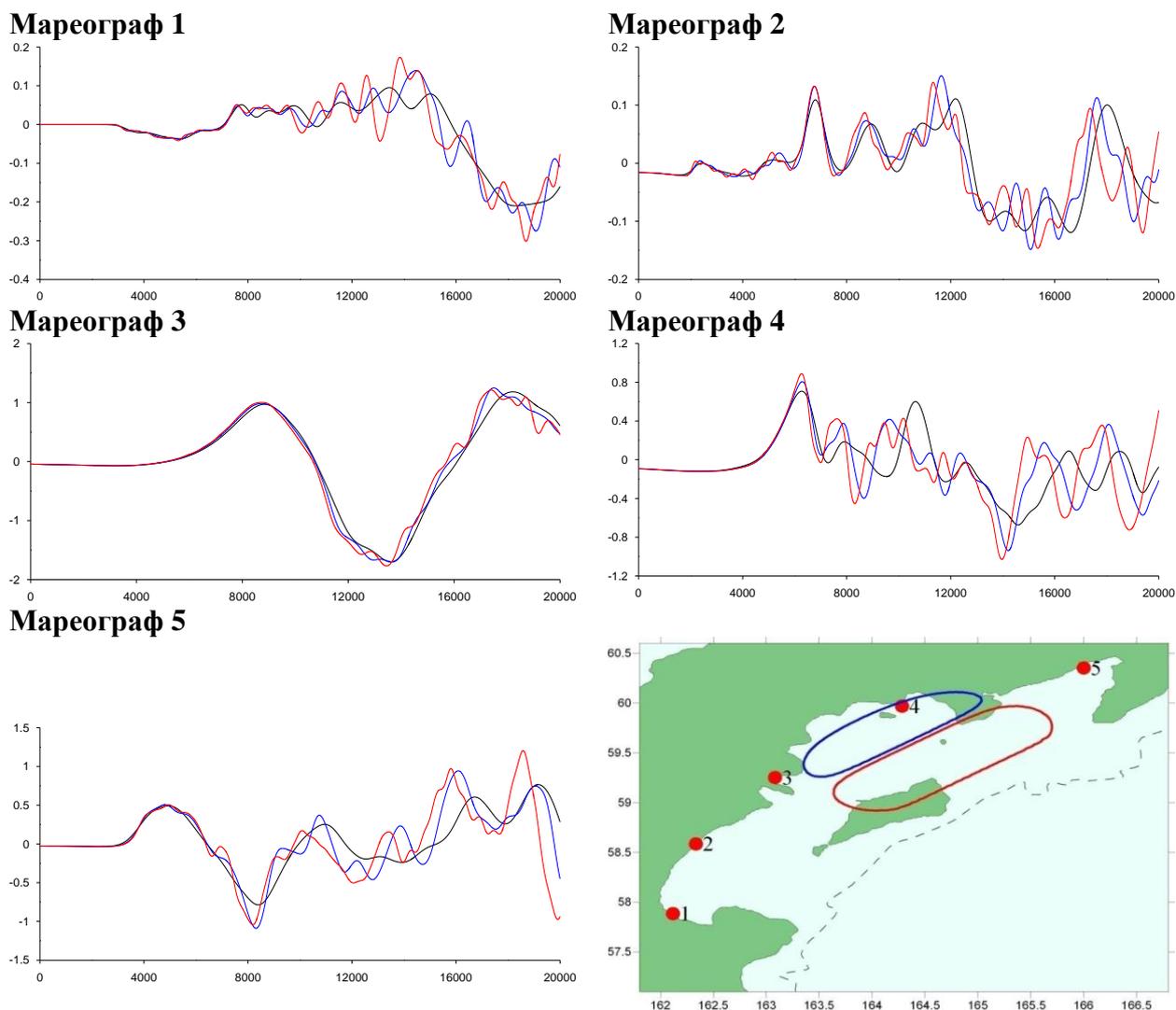


Рис. 20. Мареограммы, рассчитанные для «глубоководного» источника 25с на различных сетках: 1-минутной (черные линии), 30-секундной (зеленые), 15-секундой (красные). По горизонтальной оси отложено время (сек), по вертикальной – смещение уровня свободной поверхности (метры). Внизу справа – схема расчетной области «Карагинский залив», указаны: расположение мареографов (красные кружочки) и контуры «глубоководного» начального возвышения (25с), в котором область понижения уровня (синий контур) направлена в сторону берега. Пунктиром обозначена изобата 200 м. По осям отложены географические координаты в градусах.

Было обнаружено, что если источник находится на большой глубине, то результаты расчета на грубой сетке трансформации в прибрежной зоне волны, порожденной этим источником, оказываются очень неточными. Соответствующие мареограммы изображены на Рис. 20, где черными линиями изображены результаты, полученные на 1-минутной сетке ( $h$ ), зелеными – на 30-секундной ( $0.5h$ ), красными – на 15-секундой ( $0.25h$ ).



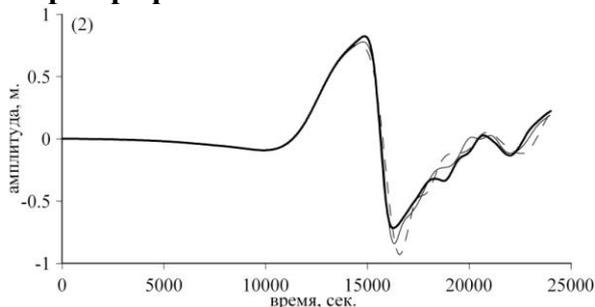
**Рис. 21.** Мареограммы, рассчитанные для «мелководного» источника 24с на различных сетках: 1-минутной (черные линии), 30-секундной (синие), 15-секундой (красные). По горизонтальной оси отложено время (сек), по вертикальной – смещение уровня свободной поверхности (метры). Внизу справа – схема расчетной области «Карагинский залив», указаны: расположение мареографов (красные кружочки) и контуры «мелководного» начального возвышения (24с), в котором область понижения уровня (синий контур) направлена в сторону берега. Пунктиром обозначена изобата 200 м. По осям отложены географические координаты в градусах.

Для источников, полностью расположенных в мелководной зоне, или, что то же, для волн, распространяющихся в акваториях с относительно однородным рельефом дна, ситуация кардинально изменяется. Этот тезис иллюстрируется результатами расчета для модельного источника 24с, полностью расположенного на мелководье. Так, мареограммы, рассчитанные в тех же пунктах на различных сетках (Рис. 21), находятся в удовлетворительном согласии и не показывают существенной зависимости от шага сетки.

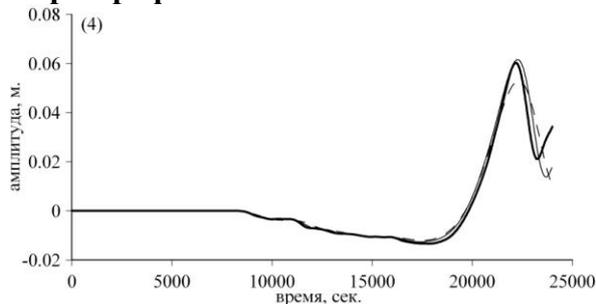
С целью проверки предположения о связи между неоднородностью дна в исследуемой акватории и необходимостью повышения разрешающей способности расчетной сетки были выполнены расчеты в области с дном постоянной глубины при одновременном сохранении контура границ «вода–суша», присущих расчетной области «Карагинский залив». Соответствующие вычислительные эксперименты выполнялись для «глубоководного» источника 25с с глубинами 10 и 2000 метров. Использование различных значений должно было подтвердить или опроверг-

нуть гипотезу о важности именно неоднородности распределения глубин, а не их абсолютного значения. Результаты этих экспериментов (Рис. 22) показали, что в акваториях с постоянной глубиной, независимо от ее значения, различий при расчетах на сетках с разной разрешающей способностью не наблюдается.

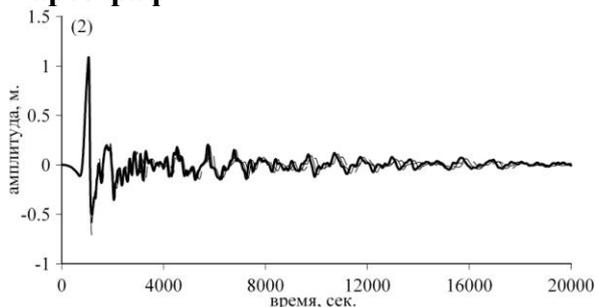
**Мареограф 2**



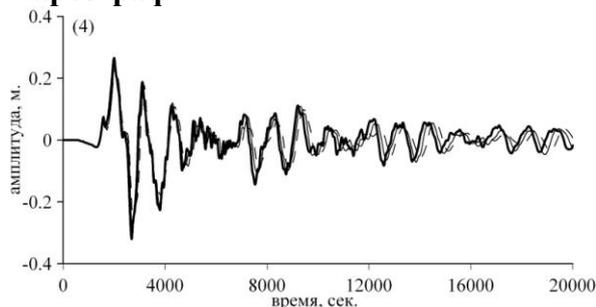
**Мареограф 4**



**Мареограф 2**



**Мареограф 4**



**Рис. 22.** Мареограммы, рассчитанные для «глубоководного» источника 25с в областях с постоянной глубиной на различных сетках: пунктирная линия – минутная сетка, сплошная тонкая – полуминутная, сплошная жирная – четвертьминутная. Верхние графики соответствуют постоянной глубине 10 м, нижние – 2000 м

### 3.2.2 Два алгоритмических способа решения проблемы и результаты их тестовых испытаний.

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

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

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

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

- расчет волнового режима в области  $\omega$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге алгоритма значений на  $\partial\omega$  в качестве краевых условий.

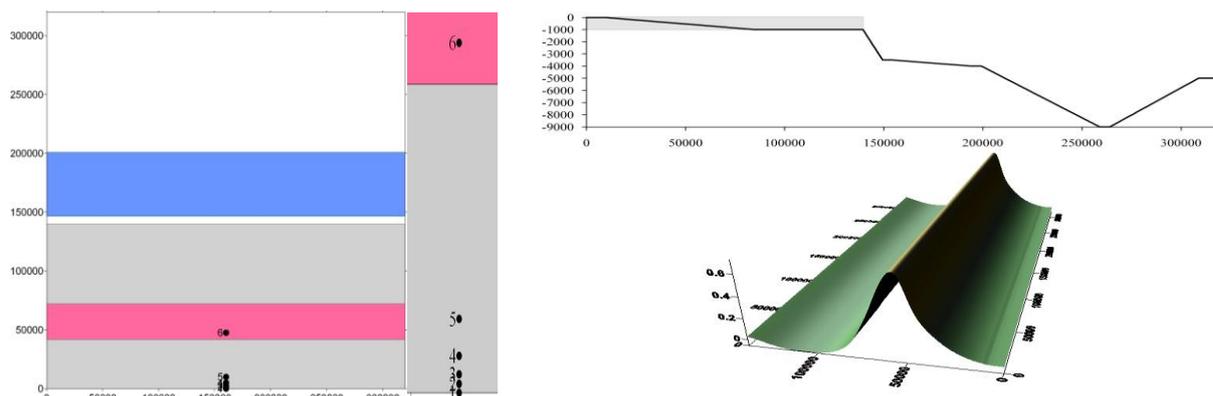


Рис. 23. Схема первой тестовой задачи: слева – начальное положение одиночной волны (контур залит синим цветом), возвышение свободной поверхности в момент «заморозки» (розовый цвет) и расположение мареографов, серым цветом выделена область «заморозки»; справа – схема рельефа дна и положение волны в момент «заморозки».

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

- выбор подобласти  $\omega$  и момента времени  $t_z$  на основе анализа результатов предварительных расчетов;
- расчет в области  $\Omega$  на грубой сетке с шагом  $h$  до момента времени  $t_z$  с сохранением всех рассчитанных волновых полей (высоты волн, скорости) в узлах сетки, принадлежащих части области  $\Omega$ , выделенной в качестве подобласти  $\omega$ ;
- пересчет (интерполяция) значений сохраненных волновых полей в области  $\omega$  на мелкую сетку с шагом  $h_1$ ;
- расчет в области  $\omega$  на мелкой сетке с шагом  $h_1$  до финального времени  $t_f$  с использованием пересчитанных на предыдущем шаге волновых полей в качестве начальных данных на момент времени  $t_z$ .

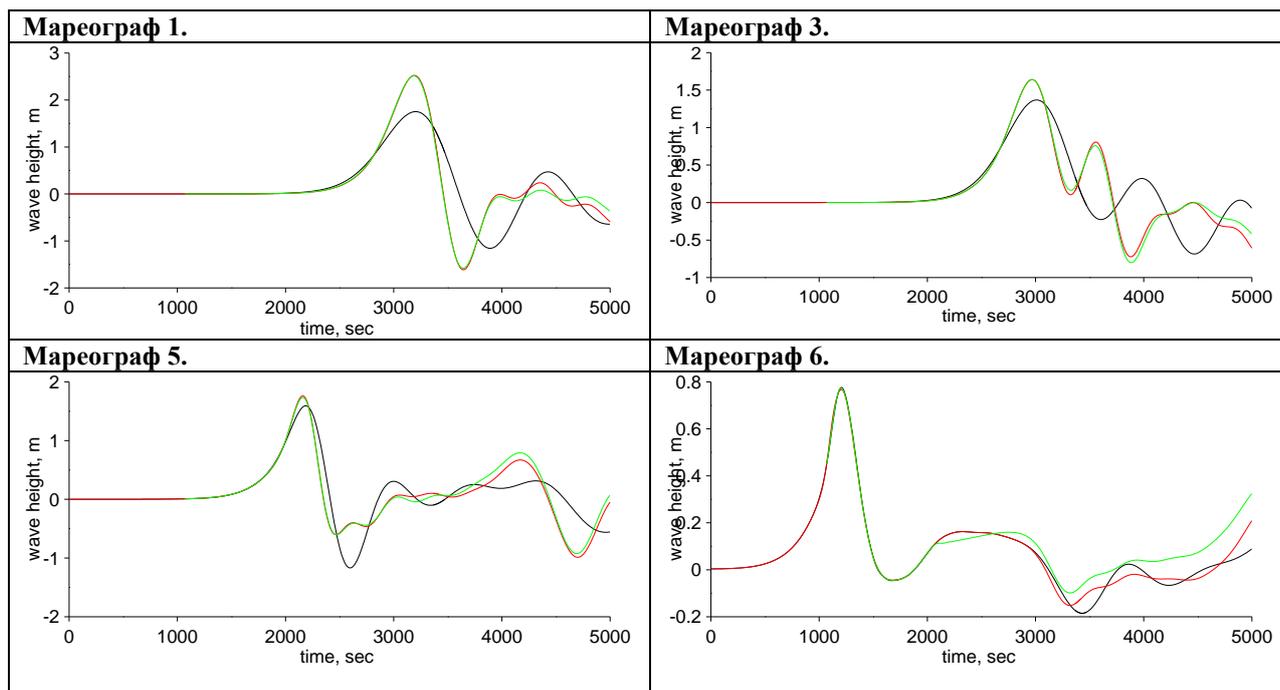


Рис. 24. Мареограммы, рассчитанные в ходе решения первой модельной задачи. Черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках соответственно во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой».

Иллюстрация возможностей указанных методик будет начата с задач о трансформации волн в модельной акватории (Рис. 23). Первая задача, на которой тестировалась технология «заморозки», – это задача о распространении одиночной волны. Гребень волны в начальный момент находился над точкой с координатой 175000 м по направлению  $OY$ .

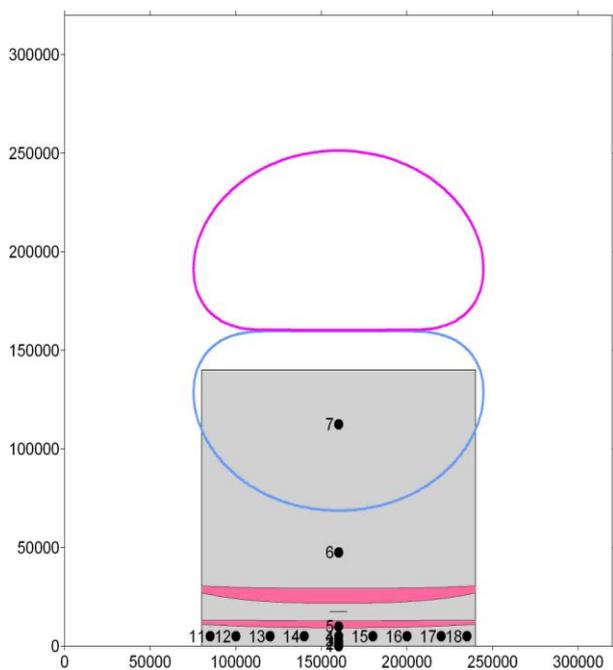
В ходе решения этой задачи сначала проводился расчет на грубой сетке, его результаты замораживались в момент времени  $t_z \approx 1070$  сек. «Замороженные» поля свободной поверхности и скорости вырезались по направлению  $OY$  от 0 до координаты 140000 м, что соответствует удаленному от берега краю площадки с постоянной глубиной 1000 м, и применялись в качестве начальных данных для расчета на мелкой сетке. Эталонными считались мареограммы, рассчитанные во всей области на мелкой сетке. Результаты сравнения (Рис. 24) показали, что во всех мареографных точках расчет с использованием технологии «заморозки» практически совпадает с эталонным, незначительное расхождение наблюдается только в «хвостах» мареограмм.

В первом варианте второй модельной задачи сейсмический источник (Таблица 6) был направлен своей отрицательной частью возмущения к берегу (Рис. 25). Здесь, в случае слишком поздней «заморозки» ( $t_z \approx 2140$  секунд, синяя кривая на графиках) в центральных прибрежных точках (мареографы 1 – 5) наблюдалось искажение результатов. Своевременная, оптимальная, «заморозка» при  $t_z \approx 1600$  сек. обеспечивает очень хорошую близость соответствующего результата эталонному. В приграничных, 11-ом и 12-ом боковых мареографах присутствуют отмеченные ранее расхождения.

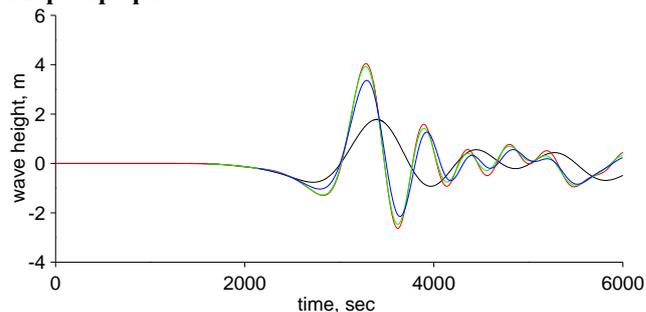
При решении второго варианта второй модельной задачи источник начального возмущения сохранил все свои параметры за исключением  $\Theta$  – угла, определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простирания разрыва, который был изменен на 90 градусов (Рис. 26). Такая ориентация источника привела к весьма специфическому характеру распространения волновой энергии, основная часть которой оказалась направлена в стороны боковых границ расчетной области. При этом к центральному фрагменту береговой линии подходили волны очень малой амплитуды – зафиксированные 1-ым – 5-ым мареографами амплитуды не превышали полутора миллиметров.

**Таблица 6.**

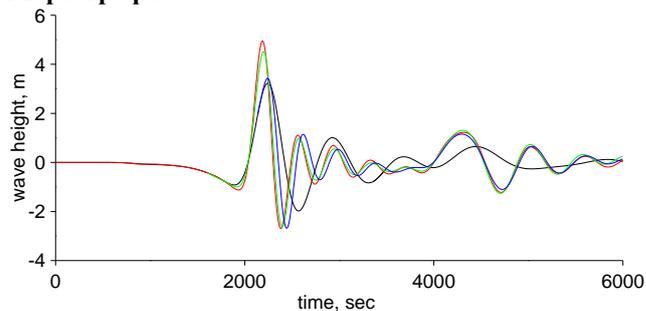
$x$ -координата гипоцентра (м)	160000	160000	160000
$y$ -координата гипоцентра (м)	175000	175000	175000
$L$ – длина в плоскости разлома (м)	100000	100000	100000
$W$ – ширина в плоскости разлома (м)	50000	50000	50000
$D_0$ – величина подвижки по плоскости разлома (м)	5	5	5
$\delta$ – угол падения плоскости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



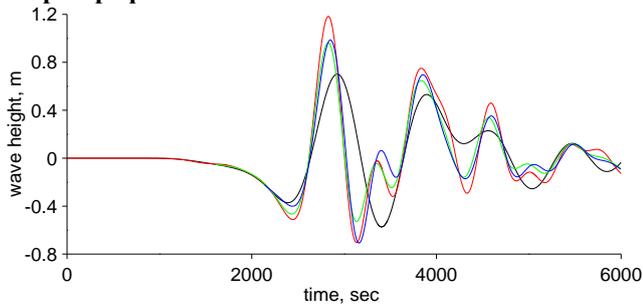
**Мареограф 1.**



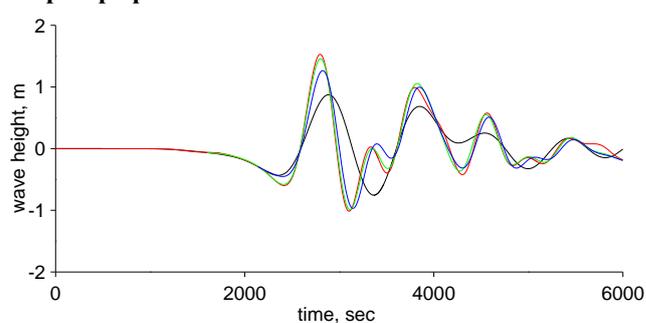
**Мареограф 5.**



**Мареограф 11.**

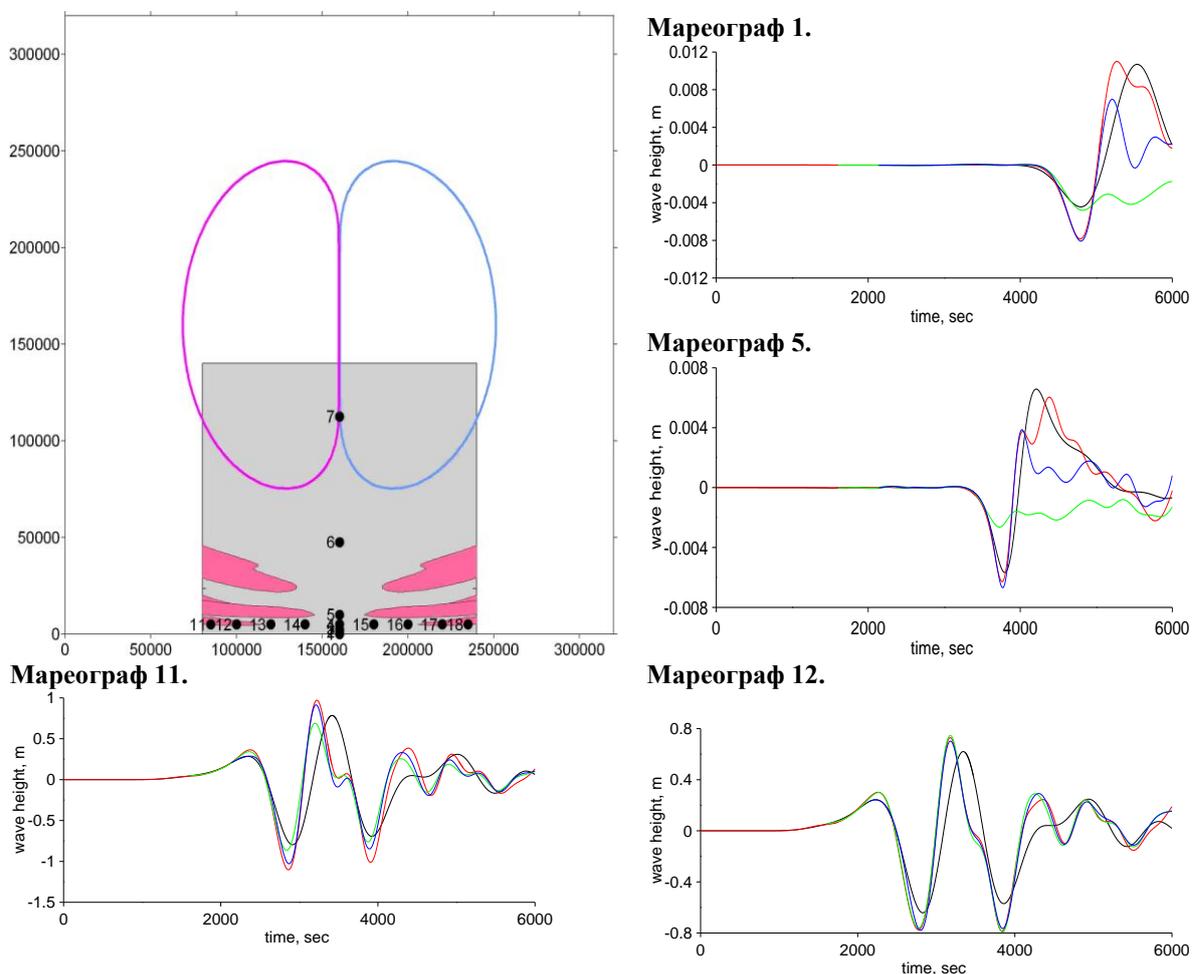


**Мареограф 12.**



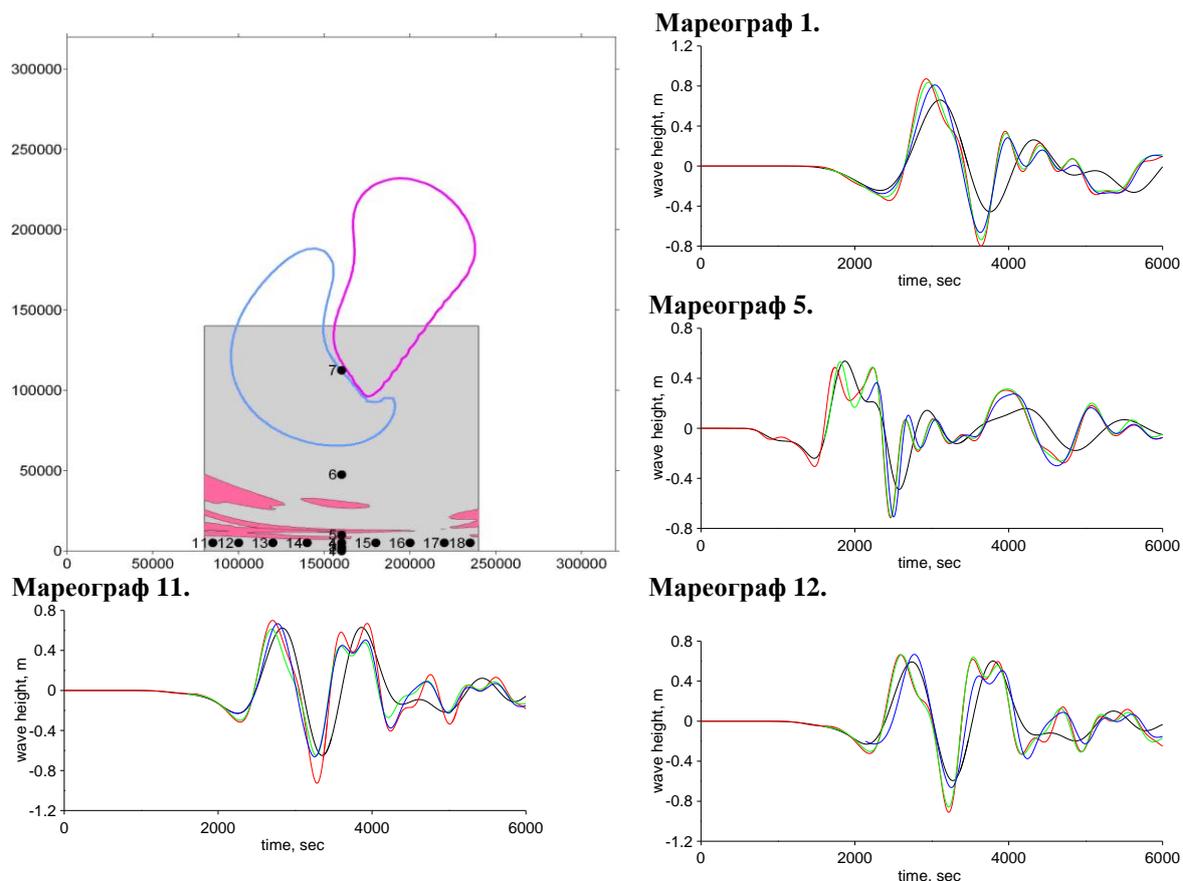
**Рис. 25.** Схема первого варианта второй модельной задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

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



**Рис. 26.** Схема второго варианта второй модельной задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

В *третьем* варианте задачи были изменены не только значение угла  $\Theta$ , определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва, которое было изменено на 30 градусов (Рис. 27). Несколько изменен был и механизм сейсмического источника: значения угла  $\delta$ , задающего угол падения плоскости разлома, и угла  $\lambda$ , определяющего направление подвижки в плоскости разлома, были изменены с 90 градусов на 30. Здесь как в центральном фрагменте береговой линии (мареографы 1 – 5), так и вблизи границ малой расчетной области (мареографы 11, 12) амплитуды волн имеют вполне ощутимые значения порядка 1 метра. Наилучшего результата удастся добиться при «ранней заморозке», так как достаточно сложный по своей конфигурации источник порождает волновое поле, содержащее весьма тонкие структуры, которые существенно искажаются при расчете на грубой сетке. Поэтому «ранняя заморозка», фиксирующая волновые поля на ранних стадиях грубого расчета, оказывается предпочтительней, уменьшая влияние грубой сетки.

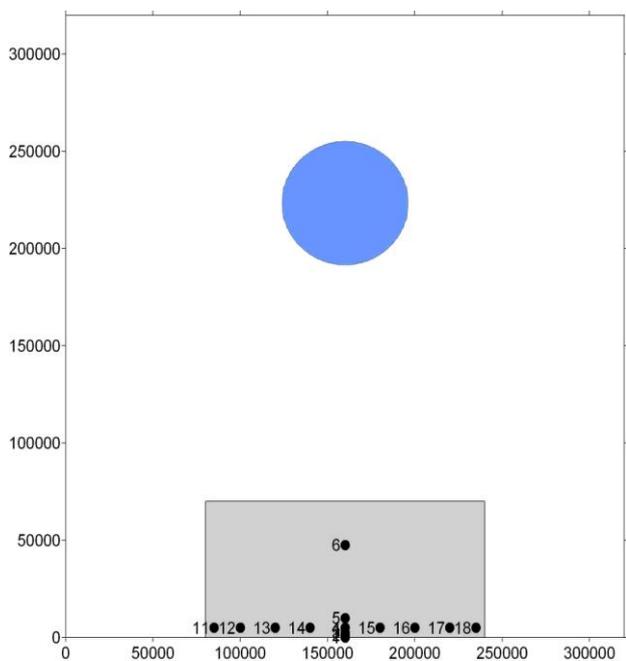


**Рис. 27.** Схема третьего варианта второй модельной задачи (слева сверху), контуры отрицательной части начального возвышения (синий цвет), положительной – розовый, малая расчетная область (серая заливка) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (розовая заливка) – верхний контур соответствует моменту  $t_z \approx 1600$  сек., нижний –  $t_z \approx 2140$  сек. На графиках мареограмм черным и красным цветом отрисованы кривые, соответствующие расчетам на грубой и мелкой сетках, соответственно, во всей области на всё время расчета, зеленым – расчету с «заморозкой» на момент времени  $t_z \approx 1600$  сек., синим –  $t_z \approx 2140$  сек.

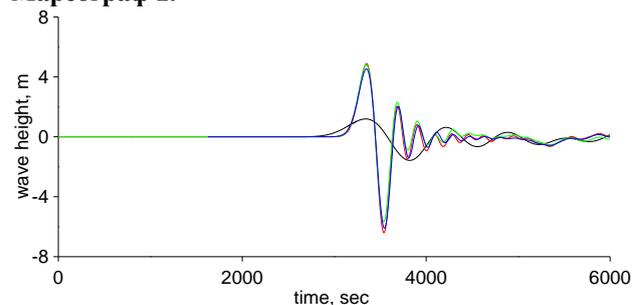
Сравнение экономических технологий «перехвата» и «заморозки», предназначенных для повышения эффективности моделирования трансформации волн цунами в реальных акваториях с необходимой точностью, проводилось в модельной акватории с использованием начального возмущения в виде верхней половины эллипсоида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

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

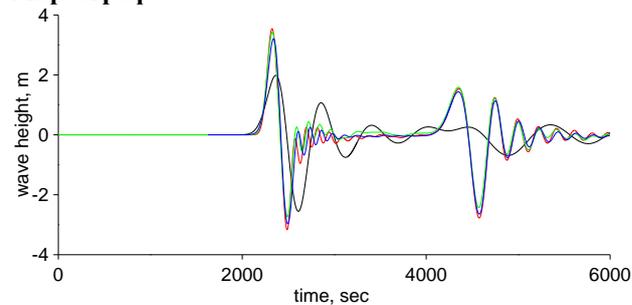
Малая область  $\omega$  была выбрана здесь несколько меньшей (Рис. 28), а «заморозка» проводилась в момент времени  $t_z \approx 1630$  секунд. На графиках, как и ранее, черным и красным цветом отрисованы мареограммы, рассчитанные во всей области на все время расчета с использованием грубой и мелкой сеток, соответственно. Зеленым цветом отрисованы результаты расчета с использованием метода «перехвата», синим – «заморозки».



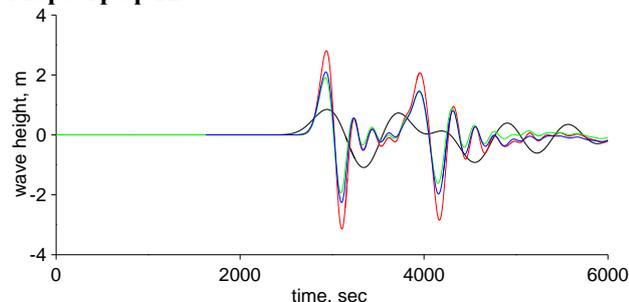
**Мареограф 1.**



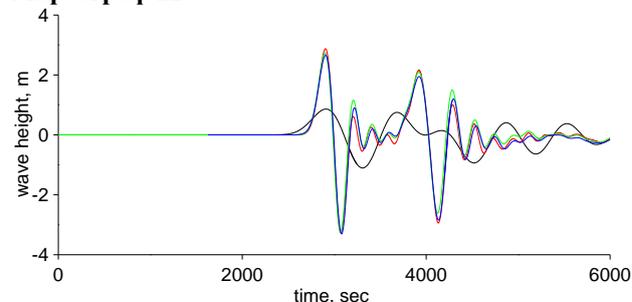
**Мареограф 5.**



**Мареограф 11.**



**Мареограф 12.**



**Рис. 28.** Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки» и «перехвата». Наверху слева изображена схема модельной задачи: контур начального возмущения (залит синим цветом), малая расчетная область (залита серым), точки расположения мареографов (черные кружочки). На графиках черными линиями изображены мареограммы, рассчитанные в большой области на грубой сетке, красными – на мелкой, зелеными – результаты расчетов с использованием метода «перехвата», синими – метода «заморозки».

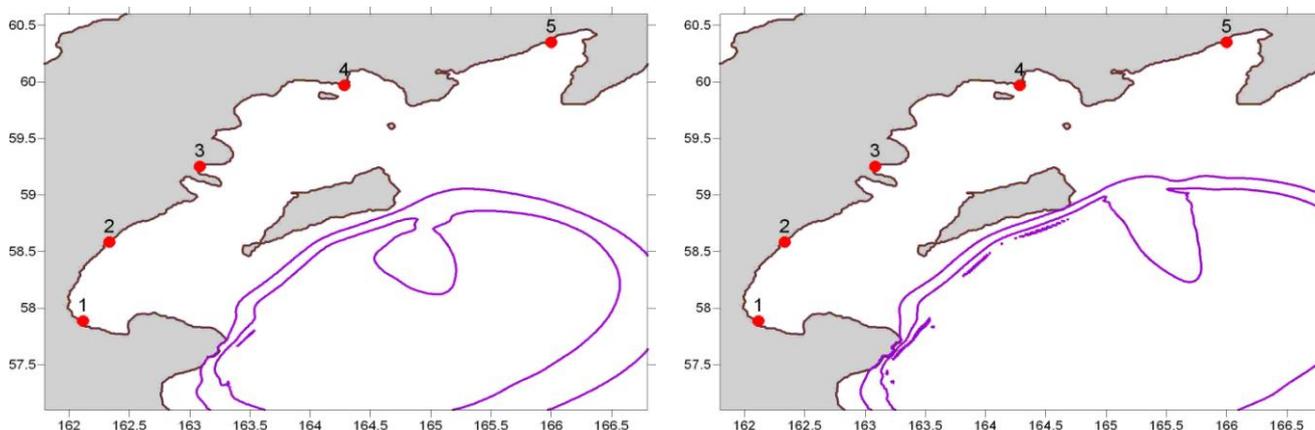
Анализ графиков показывает, что оба метода обладают практически одинаковыми возможностями. В мареографных точках, расположенных в центральной прибрежной зоне, соответствующие результаты почти совпадают с эталоном, причем головная волна повышения несколько лучше воспроизводится методом «перехвата», а волна понижения и последующий «хвост» мареограмм – методом «заморозки». По мере приближения к боковым границам малой области наблюдается некоторое снижение точности, при нескольких лучших результатах у метода «заморозки», как на положительных, так и на отрицательных амплитудах.

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

Реализация такого приема была выполнена для моделирования распространения волны цунами в области «Карагинский залив», простирающейся от 161.8 до 166.8 градусов Восточной долготы и от 57.1 до 60.6 градусов Северной широты. Этот фрагмент отчета иллюстрирует возможности применения одного из этих методов – метода «заморозки» – к решению практически

актуальной задачи о распространении волн в Карагинском заливе. Здесь качества методики проверяются в условиях реальной акватории.

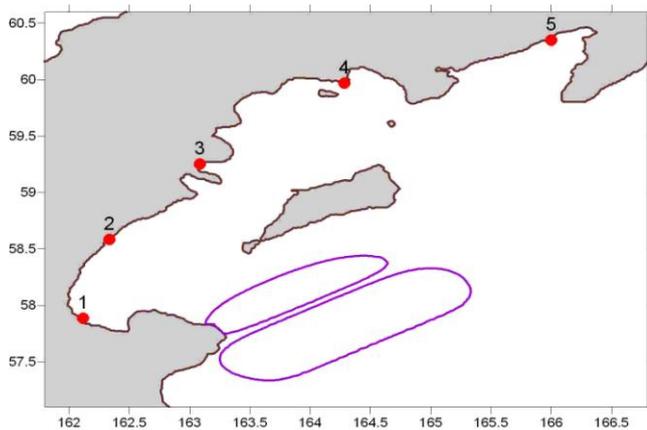
Начальное возмущение рассчитывалось с использованием модели «глубоководного» источника **25с**. Как было показано выше, точность расчета в прибрежных мареографах волн, порожденных этим источником, сильно зависит от детальности используемой сетки. Для оценки адекватности выбора момента «заморозки» волновых полей были проведены два вычислительных эксперимента, в первом из которых «заморозка» происходила в момент времени:  $t_z = 570$  секунд, а во втором – в момент  $t_z = 760$  секунд, что соответствовало 150 и 200 временным шагам в расчете на грубой 1-минутной сетке (Рис. 29).



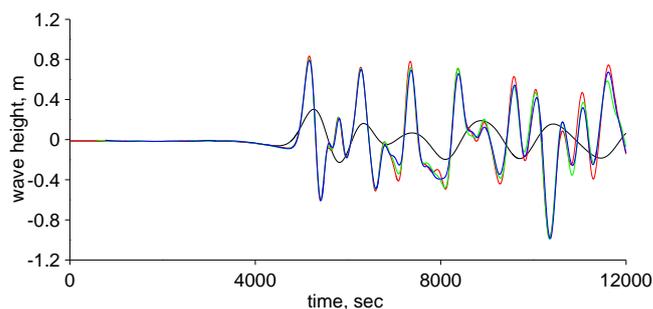
**Рис. 29.** Иллюстрация применения метода «заморозки» на задаче о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Контуры волновых полей, рассчитанных на грубой 1-минутной сетке: слева – «заморозка» на момент времени  $t_z = 570$  сек., справа – на момент  $t_z = 760$  сек. Красными кружочками отмечены расположения прибрежных мареографов.

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

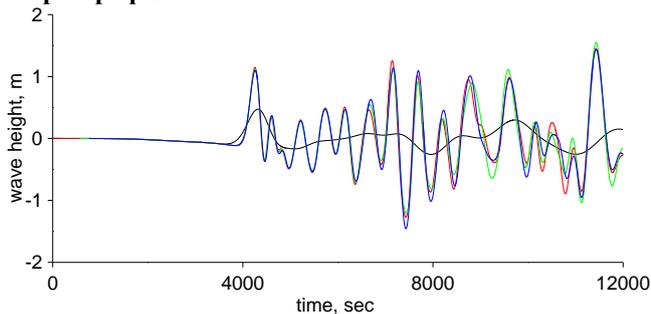
Как показывают графики (Рис. 30), результаты расчетов с «заморозкой» в обоих случаях очень близки к эталонным во всех мареографных точках. Все видимые расхождения синей и зеленой кривых с красной могут быть объяснены некоторым слабым искажением результатов вследствие применения грубой сетки. Так как эти различия оказались пренебрежимо малы, можно полагать, что метод достаточно устойчив к выбору момента «заморозки».



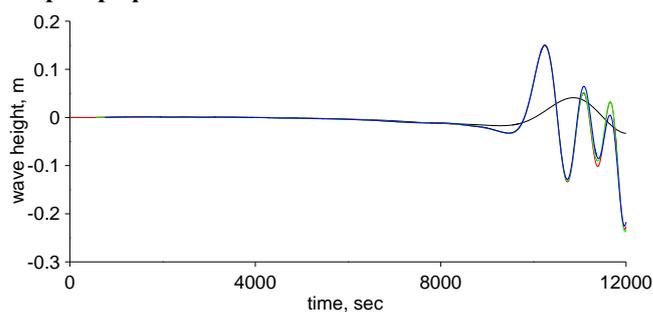
**Мареограф 1.**



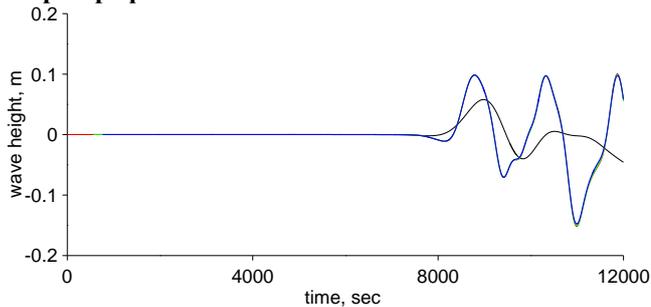
**Мареограф 2.**



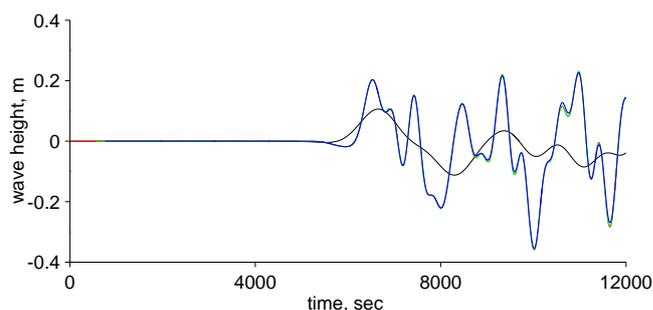
**Мареограф 3.**



**Мареограф 4.**



**Мареограф 5.**



**Рис. 30. Задача о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки», с эталонным решением. На графиках черными линиями изображены мареограммы, рассчитанные без «заморозки» на грубой сетке, красными – на мелкой, зелеными – результаты расчетов с использованием метода «заморозки» на момент времени  $t_z = 570$  сек., синими – на момент  $t_z = 760$  сек.**

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

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

Далее, в настоящем отчете будут приведены результаты моделирования трансокеанского цунами, в ходе которого использовалась детально изложенная здесь методика. Эти результаты

также подтвердили ее работоспособность. Таким образом, методологию планируемых на 2009 – 2010 гг. работ по исследованию воздействия на Дальневосточное побережье РФ удаленных цунами можно считать достаточно обоснованной.

### **3.4. Разработка методики проведения большого объема численных экспериментов с использованием программного комплекса MassGlobalCalcul на многопроцессорных ЭВМ.**

Целью работ, излагаемых в настоящем разделе, является достижение ускорения выполнения численных экспериментов по расчету высот волн цунами, генерируемых множеством модельных источников с использованием возможностей вычислительных комплексов (кластеров) с большим числом процессоров, обеспечивающих возможность одновременного (параллельного) решения однотипных задач, различающихся наборами входных данных (расчетных областей, начальных данных – источников цунами, точек записи результатов – виртуальных мареографов, привязанных к реальным защищаемым пунктам).

#### **3.4.1. Перечень сокращений, условных обозначений, символов и терминов.**

**Вычислительный кластер** – система, состоящая из нескольких ЭВМ, имеющих, как правило, общую файловую систему и объединенных единой средой передачи сообщений между отдельными ЭВМ.

**Вычислительный процессор** – элемент вычислительной машины, независимо обрабатывающий прерывания операционной системы. Роль вычислительного процессора может исполнять как отдельный процессор, так и процессорное ядро в составе многоядерного процессора или один из нескольких процессоров, имитируемых единственным процессором с поддержкой технологии эмуляции многоядерности.

**Коммутационная среда** – среда передачи сообщений между ЭВМ, объединенными в вычислительный кластер.

**Многопроцессорная ЭВМ** – ЭВМ, имеющая более одного вычислительного процессора, управляемая одним экземпляром операционной системы.

**Узел кластера** – ЭВМ в составе вычислительного кластера.

**Система пакетной обработки** – система, управляющая распределением задач в вычислительном кластере, предназначенная для обеспечения загрузки узлов кластера, исключающей возможность превышения определенных лимитов.

#### **3.4.2. Основные стратегии.**

Проведенные ранее в рамках НИР «Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона» исследования распространения волн цунами в акватории Японского и Охотского морей показали недостаточность разрешения минутной сетки для достижения необходимой точности численного решения (Итоговый отчет, 2007). Проведение расчетов на измельченных сетках приводит к значительному возрастанию требований к ресурсам ЭВМ. В первую очередь – к объему доступной оперативной памяти и производительности процессора.

Необходимость разработки методики расчетов на многопроцессорных ЭВМ обусловлена с одной стороны возросшими требованиями, а с другой стороны доступностью большого числа вычислительных машин одной архитектуры, объединенных в вычислительные кластеры с общей файловой системой. Разрабатываемая методика предназначена для проведения большого числа компьютерных экспериментов с малой зависимостью трудозатрат от числа экспериментов и пригодна для использования на большинстве доступных многопроцессорных ЭВМ и вычислительных кластеров. На основе разработанной методики впервые были проведены расчеты с использованием комплекса MassGlobalCalcul (Итоговый отчет, 2007) одновременно на 42 вычислительных процессорах.

Для ускорения расчетов можно выделить две стратегии. Одна состоит в использовании большого числа процессоров при выполнении расчетов для различных источников, а другая состоит в распараллеливании каждого расчета. Первая стратегия отличается простотой реализации и не требует значительного изменения существующей однопроцессорной версии програм-

мы. Основным преимуществом стратегии распараллеливания является возможность проведения расчетов на сетках с большим числом ячеек, что позволяет повысить точность расчета.

Предварительная оценка общего объема вычислений, необходимого для решения задач проекта в Курило-Камчатской и Япономорской зонах, составила около 3000 часов процессорного времени. При этом необходимо было учитывать возможность изменения программы расчетов по мере получения и обработки результатов или возникновения необходимости повторного проведения части расчетов. В соответствии с планом работ, основной объем расчетов должен был быть выполнен в течение ограниченного времени – от двух до четырех недель. В силу простоты реализации и ограниченного срока выполнения расчетов, в первую очередь, была разработана методика, реализующая первую стратегию с малой зависимостью трудозатрат при выполнении расчетов от количества выполняемых экспериментов.

Суть разработанной методики состоит в следующем: для каждого эксперимента по расчету распространения волн цунами в некоторой акватории для заданного набора источников с помощью комплекса сценариев формировалась последовательность задач, которые передавались в систему пакетной обработки. По окончании вычислений для всей последовательности задач, результаты расчетов собирались в одной директории в общей файловой системе для последующей обработки.

Расчеты выполнялись на вычислительном кластере «Opteron/44», установленном в Институте вычислительных технологий СО РАН, а также на вычислительном кластере ИВЦ Новосибирского государственного университета. Общий объем выполненных расчетов превысил предварительные оценки. Так, продолжительность расчетов на вычислительном кластере ИВТ СО РАН составила 13430 часов, что заняло бы более 1 года, если бы расчеты выполнялись последовательно на одном процессоре. Всего за период с 4.08.2008 по 23.10.2008 было запущено 860 задач. В указанный период вычисления по расчету высот волн цунами занимали в среднем около 25% вычислительных ресурсов системы.

#### 3.4.2. Организация одновременных расчетов.

Реализация методики состоит из нескольких этапов:

1. Изучение исходного кода программы.
2. Приведение кода программы в соответствие с требованиями **стандарта** языка программирования.
3. Автоматизация запуска расчетных заданий.
4. Подготовка и выполнение расчетных заданий.

Изучение программного кода состоит в установлении зависимостей между программными модулями и определении порядка разделения работы между процессорами, обеспечивающего корректность результата. Комплекс *MassGlobalCalcul* состоит из трех программ: *serial\_calc.exe*, *source.exe* и *MassGlobalCalcul.exe*. Запуск расчета осуществляется запуском программы *serial\_calc.exe*. Основные блоки программы *serial\_calc.exe* и последовательность их выполнения в комплексе *MassGlobalCalcul* изображены на Рис. 31. Одновременное выполнение расчетов для различных источников требует параллельной реализации основного цикла в программе *serial\_calc.exe*.

Такое распараллеливание осложняется наличием зависимостей по данным между блоками. Обмен данными между программами производится через промежуточные дисковые файлы. Зависимости между программами комплекса, определяемые порядком доступа к файлам, изображены на Рис. 32. Существенным здесь является наличие перезаписываемых файлов, названия которых являются одинаковыми для всех источников. Таковыми являются файлы *MassGlobalCalcul.ini*, *Mareographs.dat* и *Source.ini*. Устранение этих зависимостей требует внесения изменений в программы комплекса с целью назначения этим файлам имен, уникальных для каждого источника или отказа от использования файлов для обмена данными между программами. Такое изменение, однако, пока не выполнено.

При одновременном выполнении расчетов для различных источников, запуск модуля *serial\_calc.exe* осуществлялся независимо для каждого из источников, а подготовка входных файлов для запуска была автоматизирована. В результате, распараллеливание не потребовало

внесения изменений в логику программ комплекса, оно было осуществлено целиком и полностью внешними средствами.

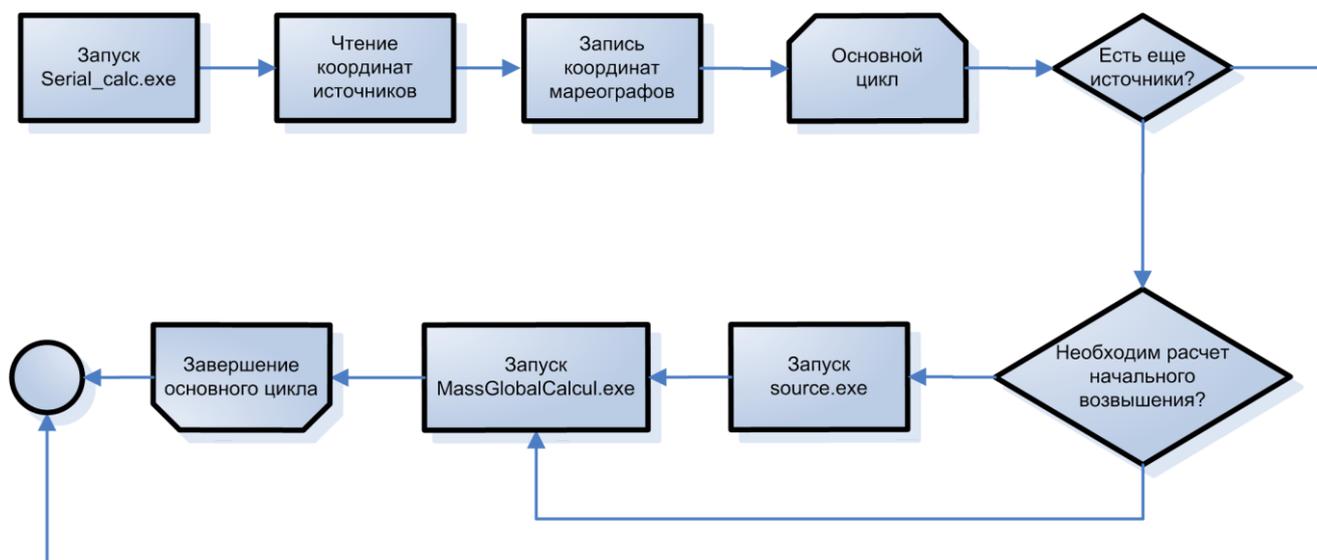


Рис. 31. Основные блоки программы *serial\_calc.exe* и зависимости между ними.

### 3.4.3. Особенности программ комплекса MassGlobalCalcul.

Для запуска программ комплекса на различных многопроцессорных ЭВМ потребовалось привести тексты программ к требованиям стандартов языков программирования. Основной объем кода реализован в рамках диалектов языков Fortran 77 и Fortran 90. В результате изучения исходного кода было установлено, что код может быть с незначительными изменениями приведен в соответствие с требованиями стандарта языка Fortran 90 (ANSI, 1992), за исключением функций ввода-вывода файлов в формате GRD, для выполнения которых требуется поддержка двоичного потокового ввода-вывода (WG5, 1996) в реализации, включенной в стандарт языка Fortran 2003 (ISO, 2004). Соответствие со стандартом было подтверждено тестированием с компиляторами Sun Studio 12, Intel Fortran Compiler 10.1 и GNU Compiler Collection 4.3.1.

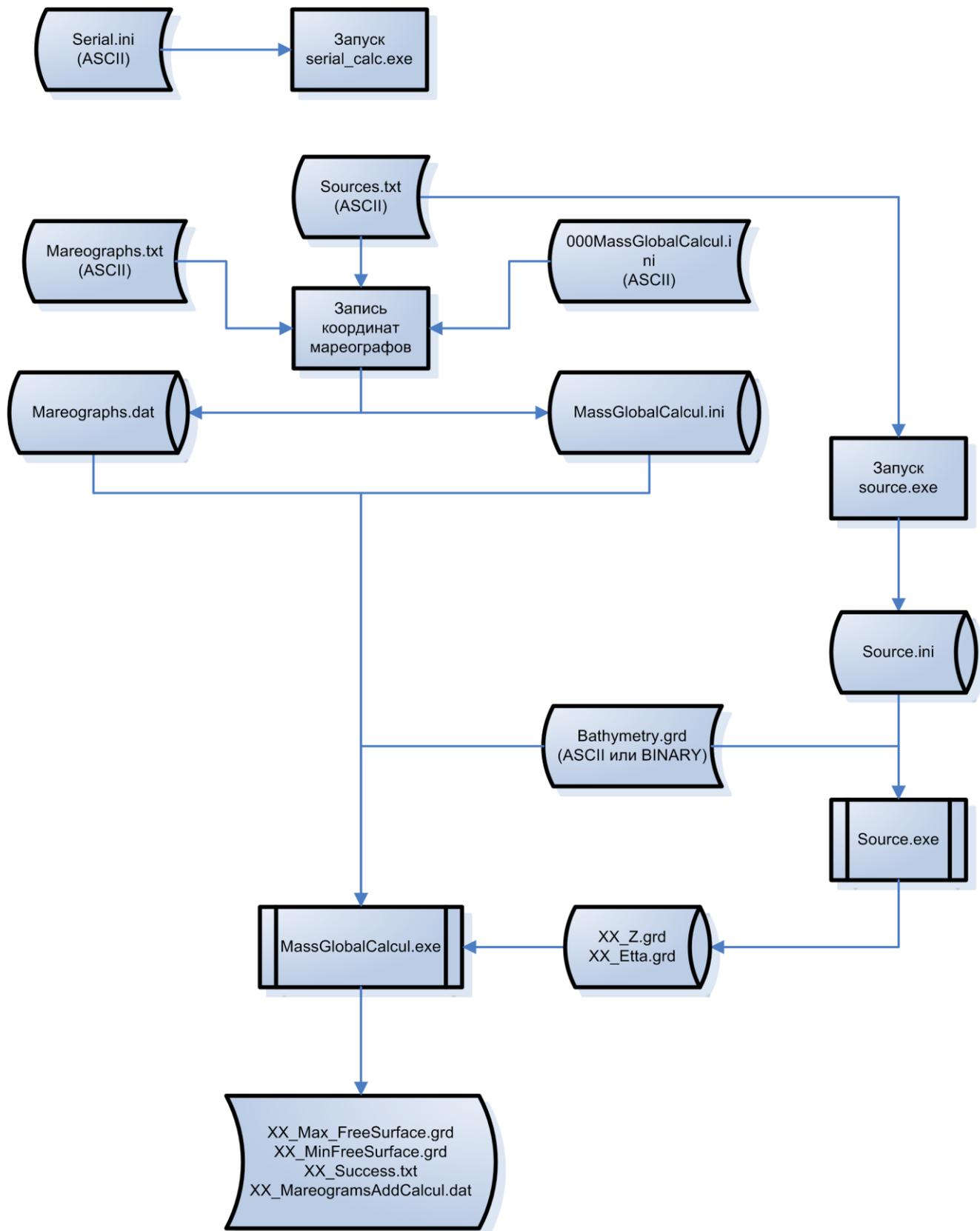
### 3.4.4. Автоматизация одновременных расчетов.

Общее число запусков расчетов с помощью комплекса программ MassGlobalCalcul составило 860. Из них 533 запуска были успешными, а 327 были завершены в течение нескольких минут в результате ошибок при подготовке входных данных. Если из первых 100 запусков лишь 17 были успешными, то из последних 300 запусков лишь 41 не завершился успешно.

Средства автоматизации, применявшиеся при организации одновременных расчетов в настоящем проекте, пока не являются частью комплекса программ MassGlobalCalcul, а являются полностью внешними по отношению к комплексу. Для включения средств автоматизации одновременных расчетов в комплекс программ необходимо реализовать функции проверки корректности входных данных.

### 3.4.5. Предварительные результаты распараллеливания алгоритма.

Комплекс MassGlobalCalcul содержит два вычислительных ядра, соответствующих линейной и нелинейной моделям распространения длинных волн в океане. Оба вычислительных ядра представляют собой реализации явных разностных схем сквозного счета типа предиктор-корректор для определения значений функций  $u(x,y,t)$ ,  $v(x,y,t)$ ,  $\eta(x,y,t)$  и  $h(x,y,t)$  на регулярной прямоугольной сетке  $(x_i, y_j)$ . Для каждого  $(i,j)$ -го узла некоторые величины вычисляются по различным формулам в зависимости от значений функций в этом и соседних узлах.



**Рис. 32.** Схема обмена данными между программами в комплексе MassGlobalCalcul через дисковые файлы. Файлы Sources.txt, Serial.ini, Mareographs.txt, 000MassGlobalCaclul.ini и Bathymetry.grd предоставляются пользователем. Файлы Source.ini, MassGlobalCalcul.ini и Mareographs.dat являются промежуточными файлами, при этом содержание файла Mareographs.dat является неизменным для всех источников. Все выходные файлы, а также промежуточные файлы XX\_Z.grd и XX\_Etta.grd имеют в имени префикс, совпадающий с именем источника. Наличие промежуточных файлов, не имеющих уникальных имен создает трудности при организации одновременных расчетов.

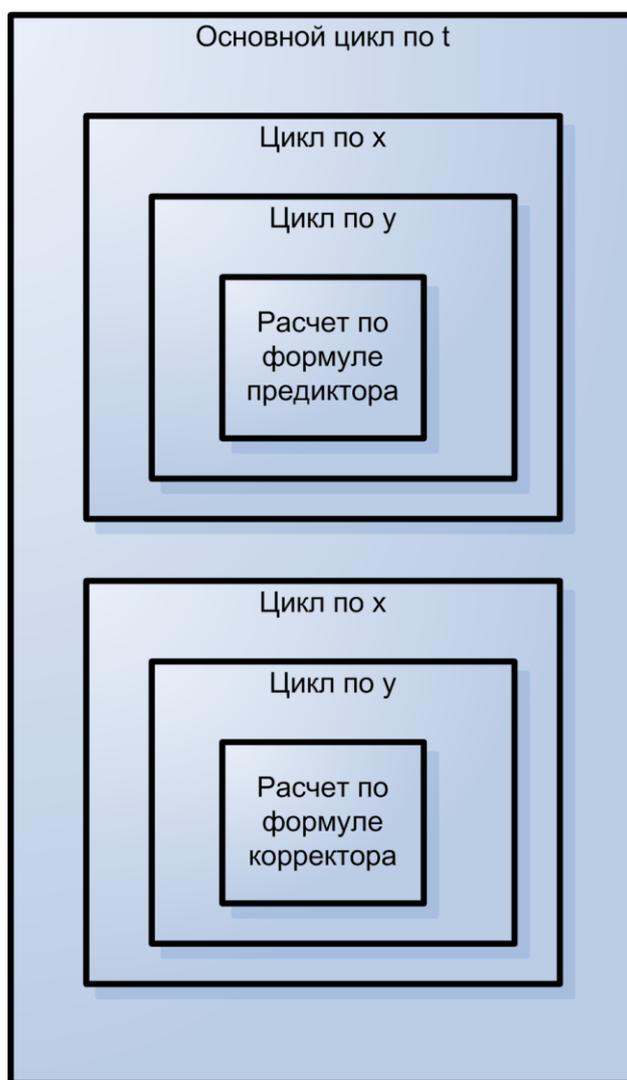


Рис. 33. Дерево циклов вычислительных ядер комплекса MassGlobalCalcul.

Анализ графа зависимостей программы позволяет выделить в дереве циклов максимальные циклы, итерации которых независимы. Такими являются циклы по переменной  $x$  в блоках предиктора и корректора (см. Рис. 33). Следовательно, производительность комплекса на многопроцессорных ЭВМ с общей памятью может быть повышена за счет разделения пространства итераций этих циклов между несколькими вычислительными процессорами. В случае выполнения одновременных расчетов для нескольких источников такое распараллеливание оправдано в случае, если объем оперативной памяти многопроцессорной ЭВМ не позволяет запустить одновременно расчеты для различных источников на каждом из вычислительных процессоров.

#### 3.4.6. Продолжение исследований.

В рамках контрактов 2009 – 2010 гг. будут выполнены исследования эффективности вычислений по программам комплекса MassGlobalCalcul на различных многопроцессорных ЭВМ, распараллеливание алгоритма расчета и реализация функции проверки корректности входных данных.

### 4. Результаты испытания методики моделирования воздействия удаленных цунами на защищаемые участки побережья

#### 4.1. Постановка задачи и общие характеристики результатов расчетов.

В качестве расчетной области использовалась акватория Тихого океана в пределах от 135 градусов в.д. до 70 градусов з.д. («290 градусов в.д.» – с учетом перехода через 180 граду-

сов) и от 50 градусов ю.ш. до 65 градусов с.ш. (Рис. 34)

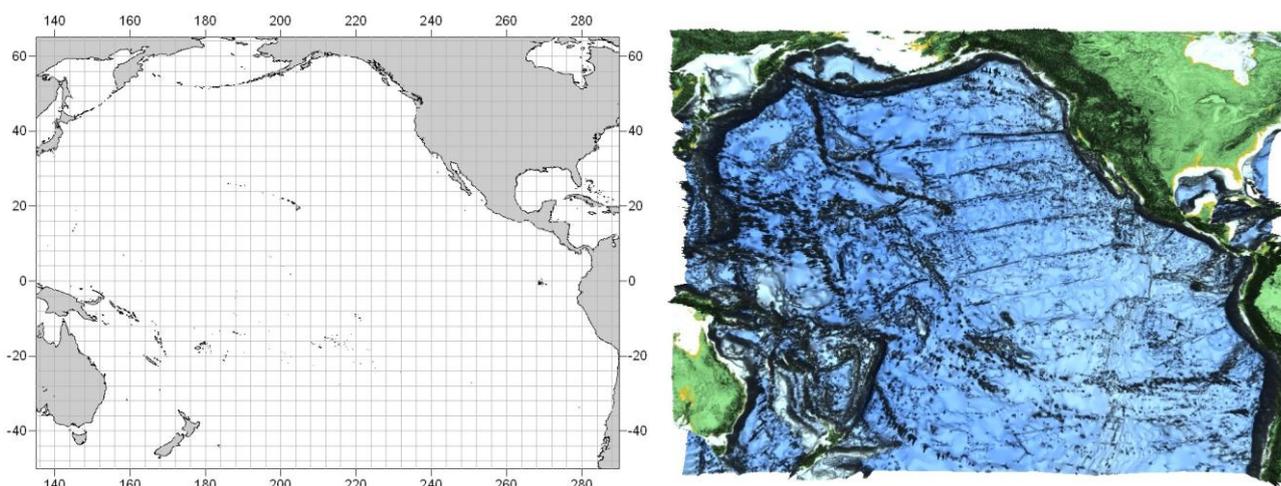


Рис. 34. Расчетная область для моделирования удаленных цунами: контур (слева) и рельеф дна (справа).

Начальные возмущения рассчитывались с использованием модельных очагов землетрясений, произошедших у берегов Чили. Один из них, называемый далее «Chilean-S», моделировал Чилийское землетрясение 22-го мая 1960-го года с магнитудой 9.5 и координатами гипоцентра 42.2 градуса ю.ш., 74.2 градуса з.д., второй («Iquique») – землетрясение 1877-го года у города Икике магнитуды 9.0 с гипоцентром в точке 20.8 градуса ю.ш., 70.2 градуса з.д., третий («Cascadia») – январское 1700 года землетрясение в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон) с магнитудой 9.1 и гипоцентром в точке 44.5 градуса с.ш., 124.6 градуса з.д. Был рассмотрен также модельный очаг «Chilean-N», находящийся у побережья, примыкающего к Икике, но имеющий параметры, соответствующие первому, более сильному очагу. Координаты гипоцентра здесь были выбраны так, чтобы примерные верхняя и правая границы его положительной части возмущения (край разрыва) проходили вдоль побережья (Таблица 7).

Таблица 7. Параметры источников.

Name	у	х, с учетом перехода через 180 градусов в.д.	L, км	W, км	$\delta$	$\lambda$	$\Theta$	$D_0$ , м	$H_{top}$ , км
Chilean-S	42.2° ю.ш.	«285.8°»	1000	100	20°	90°	190°	20	10
Iquique	20.8° ю.ш.	«289.8°»	500	100	20°	90°	180°	10	10
Chilean-N	23.3° ю.ш.	«289.6°»	1000	100	20°	90°	180°	20	10
Cascadia	44.5° с.ш.	«235.4°»	800	80	20°	90°	180°	15	10

Вычисленные по этим параметрам начальные возмущения изменялись в следующих пределах: для очагов «Chilean-S» и «Chilean-N» – от -3 до +9 метров, для «Iquique» – от -1.2 до +4.5 метров, а для очага «Cascadia» – от -2.3 до +6.6 метров. Контуры соответствующих начальных возмущений приведены ниже (Рис. 35).

Виртуальные мареографы были установлены вблизи Курильских и Камчатских защищаемых пунктов из перечня предыдущих расчетов, а также вблизи населенных пунктов Магадан и Охотск в акватории Охотского моря (Рис. 36).

Предварительные расчеты были проведены на сетке с шагом 5 минут до момента времени 150000 секунд (~42 часа). Получившиеся картины свечения приведены на Рис. 37.

Согласно полученным результатам, для модельного очага «Chilean-S» основная часть энергии распространяется на северо-запад: к Филиппинам, Японии, Курилам и Камчатке, при этом по результатам расчета на 5-минутной сетке на Курилах были зафиксированы амплитуды до 3-х метров, на Камчатке – до 1.5 м. Для очагов «Iquique» и «Chilean-N», расположенных севернее, энергия больше рассеивается по всему Тихому океану. В случае очага «Cascadia» распространения значительной части волновой энергии в сторону Российского побережья не наблюдается.

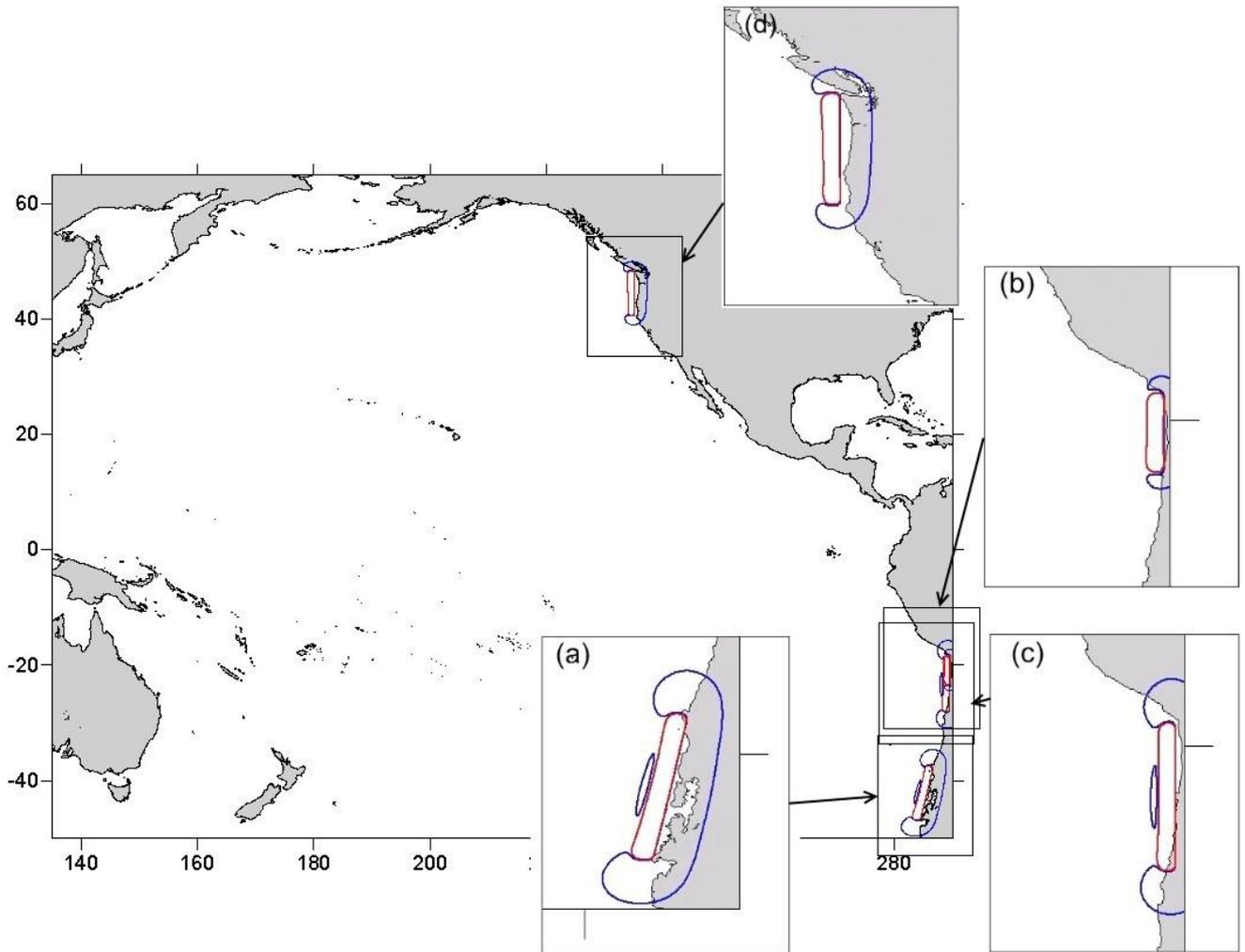


Рис. 35. Контуры начальных возмущений очагов «Chilean-S» (a), «Iquique» (b), «Chilean-N» (c), «Cascadia» (d). Красные линии указывают границы положительных частей возмущения (по уровню 0.1 м), синие – отрицательных (по уровню -0.1 м)

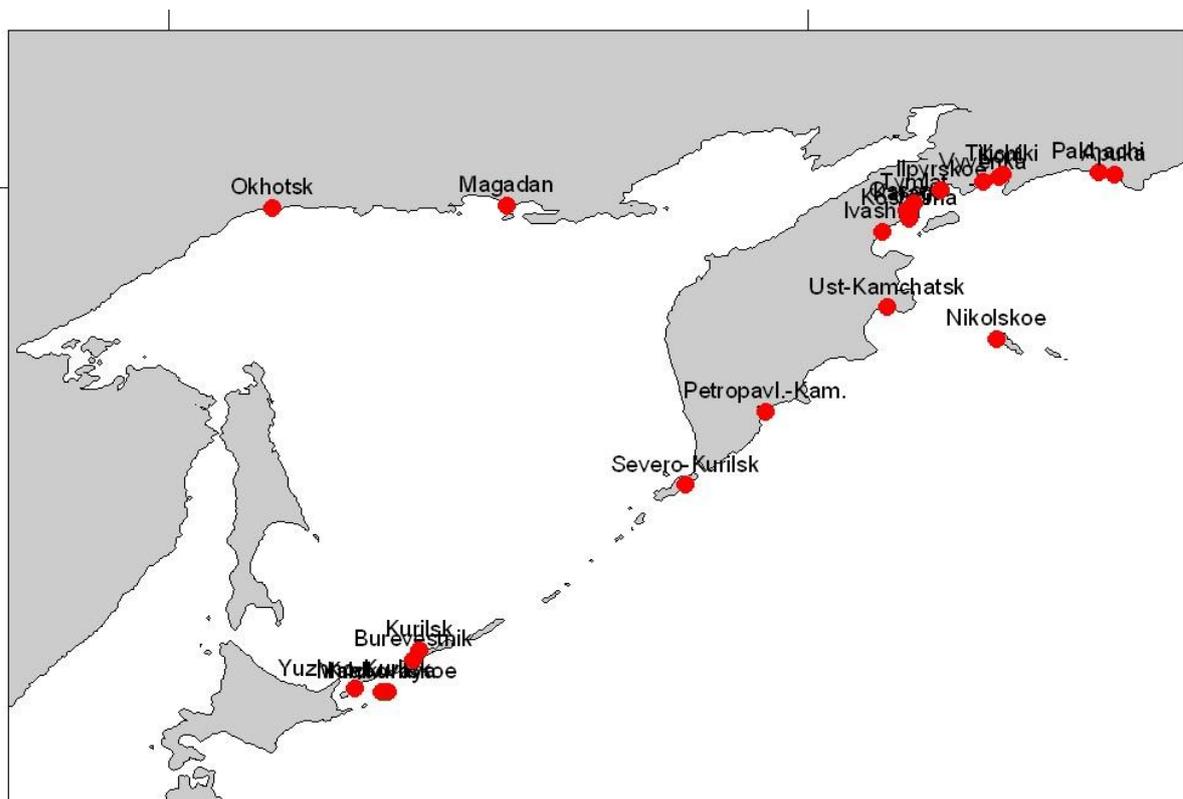


Рис. 36. Схема расстановки виртуальных мареографов.

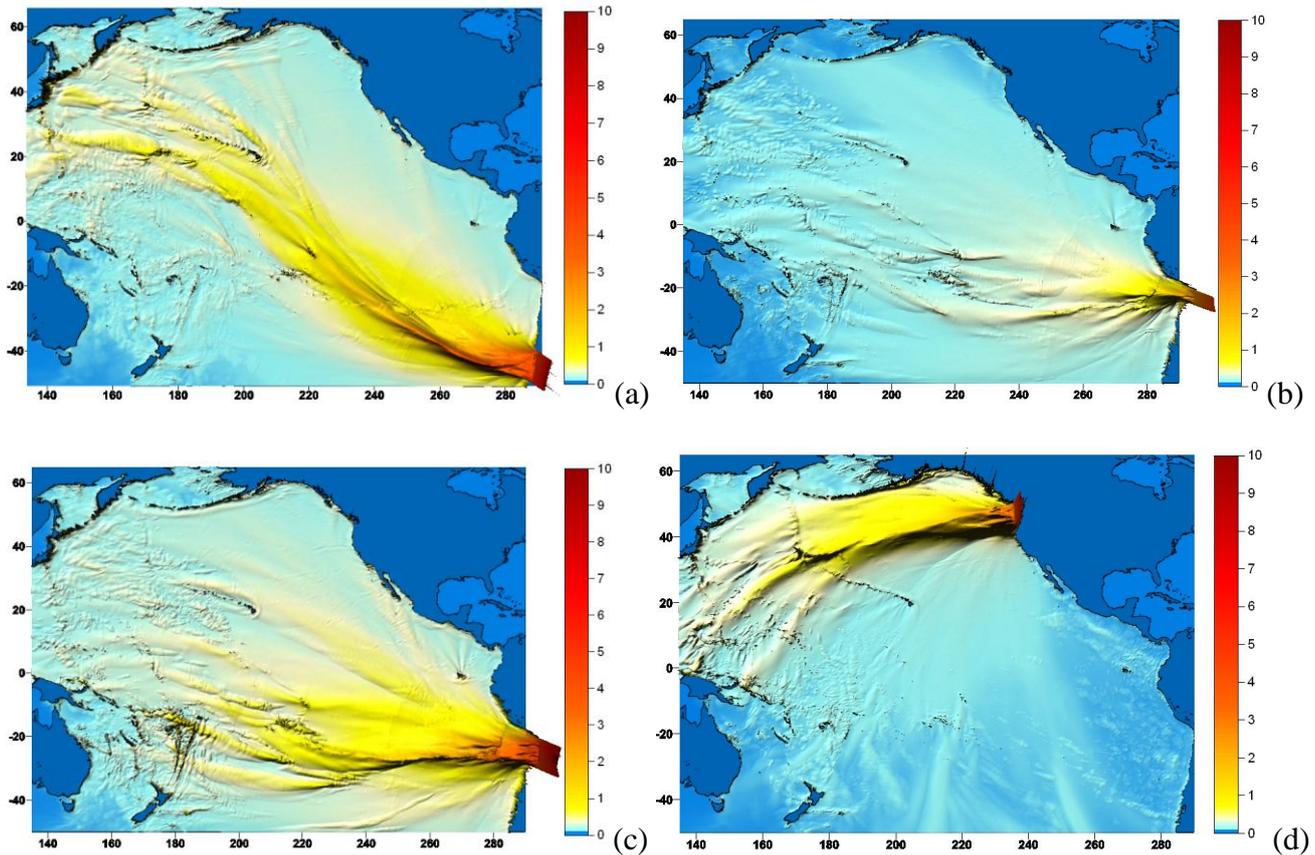


Рис. 37. Картины свечения удаленных цунами от четырех модельных очагов цунамигенных землетрясений: «Chilean-S» (a), «Iquique» (b) «Chilean-N» (c), «Cascadia» (d).

От очага «Chilean-N» в защищаемых пунктах наблюдаются амплитуды (Рис. 38) примерно в 2 раза меньше, чем от «Chilean-S» (до 1 – 1.5 метров), а от «Iquique» – в 5 – 6 меньше (до 0.5 метра). Амплитуды волн, рассчитанные от очага «Cascadia», по своей величине схожи с амплитудами для очага «Chilean-N». В виду относительной малости зафиксированных волн очаг «Iquique» в последующих работах рассматриваться не будет.

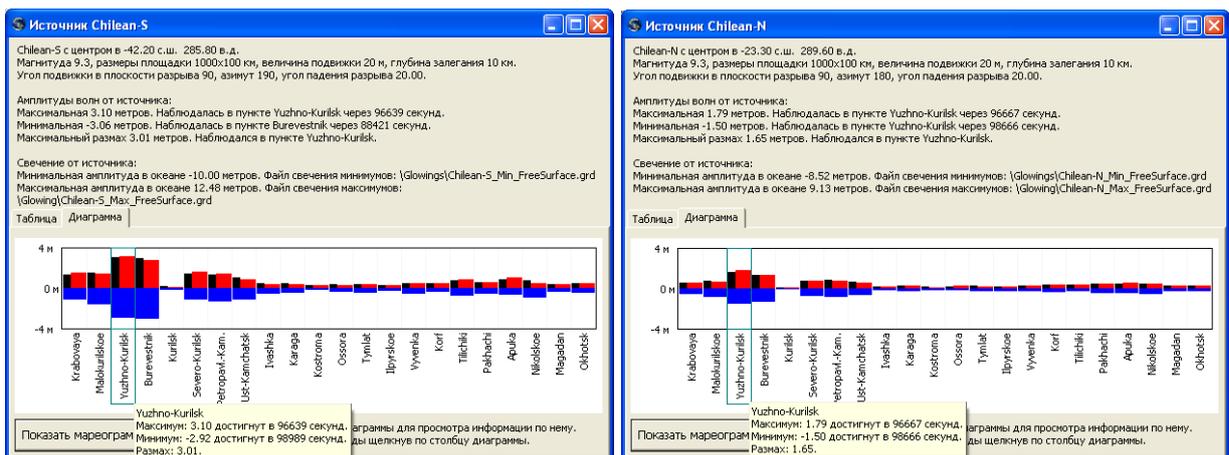


Рис. 38. Распределения максимальных и минимальных высот волн, а также их средних значений (размах волн) в защищаемых пунктах для модельных очагов «Chilean-S» (слева) «Chilean-N» (справа).

Определенный успех этих предварительных расчетов, а также доступ к необходимым вычислительным ресурсам, полученный после введения в строй суперкомпьютера Новосибирского государственного университета, позволили перейти к более детальным расчетам на сетке с шагом 2 минуты. Первые из них были проведены с использованием изложенной выше технологии «заморозки» для модельного очага землетрясения «Chilean-S». Для этого при расчете на пятиминутной сетке массивы данных запоминались в момент времени 70000 секунд, после чего

расчет продолжался только в малой области (Рис. 39), координаты которой изменялись в пределах от 135 до «195» градусов в.д. и от 0 до 65 градусов с.ш.

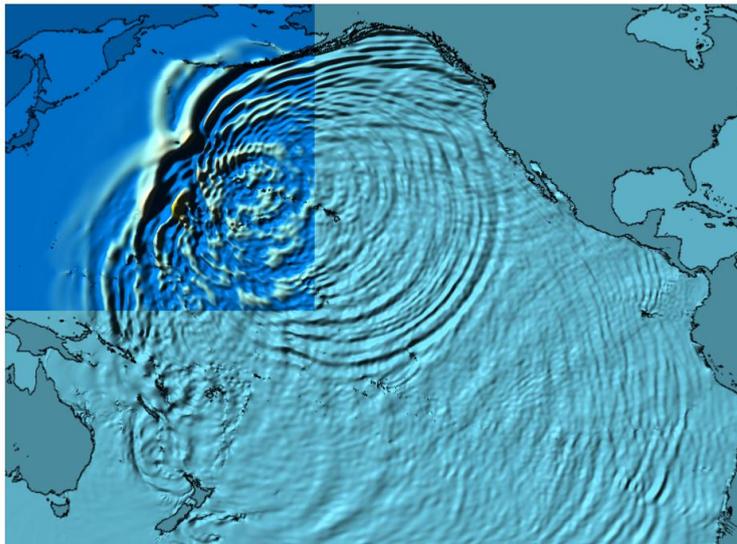


Рис. 39. Схема реализации метода «заморозки» для расчета трансокеанского цунами. Момент «заморозки» – 70000 сек. В левом верхнем углу выделена «малая» область детального расчета.

Были проведены два расчета, в первом из которых вычисления в малой области велись без измельчения – на пятиминутной сетке, а во втором – на сетке с разрешением 2 минуты. Задачей первого расчета была оценка погрешности, происходящей за счет «потери» информации о динамике волнового режима после перехода в малую область, а второго – оценка влияния на точность расчета измельчения пространственного шага в 2.5 раза.

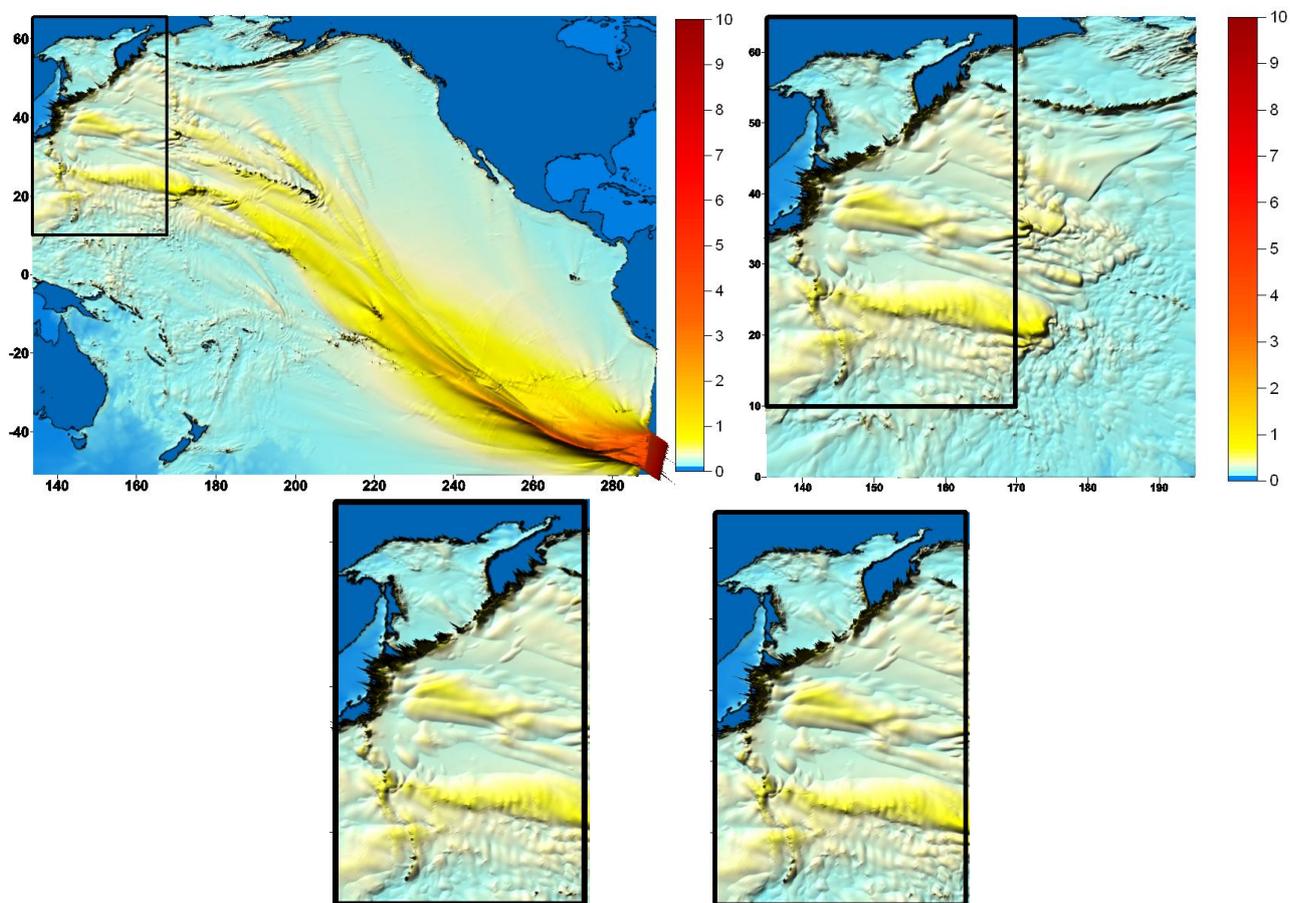


Рис. 40. Картины свечения, рассчитанные на пятиминутной сетке. Вверху слева – результат расчета по всей области, вверху справа – расчета с «заморозкой» в малой области. Внизу – соответствующие фрагменты, выделенные на верхних изображениях прямоугольными контурами.

На Рис. 40 показаны часть картины свечения, рассчитанного после «заморозки» в момент времени 70000 секунд с продолжением расчета в малой подобласти на сетке без измельчения пространственного шага, и такая же часть, полученная в ходе расчета на такой же сетке без «заморозки». Судя по рисункам, структура поверхностей практически идентична, откуда следует, что при определении максимальных заплесков у защищаемого побережья решающую роль играют волны, вошедшие в малую область к моменту времени 70000 секунд.

На мареограммах незначительная разница в результатах наблюдается так же только в «хвостовых» частях мареограмм (Рис. 41).

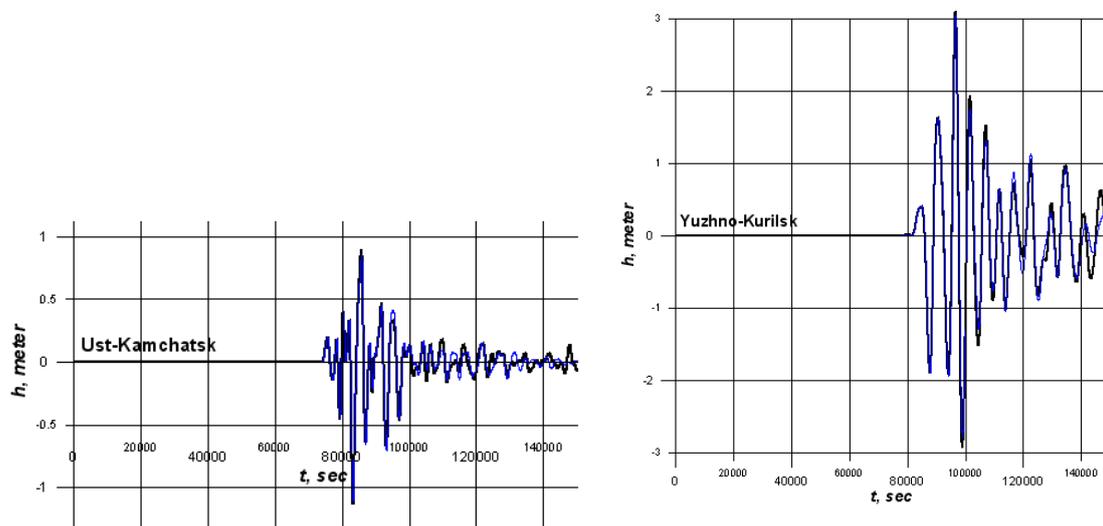


Рис. 41. Мареограммы, рассчитанные на 5-минутной сетке во всей области (жирные черные линии) и с использованием метода «заморозки» без измельчения сетки (тонкие синие линии): мареограф «Усть-Камчатск» (слева), «Южно-Курильск» (справа).

Таким образом, можно говорить о том, что использование технологии «заморозки» с выбранными параметрами (границы подобласти и время «заморозки») не приводит к появлению какой-либо существенной погрешности в результатах.

Сравнение мареограмм, полученных при помощи «заморозки» с вычислениями в малой области на пяти- и двухминутной (после соответствующей интерполяции) сетках, позволило определить важность использования в расчетах более детальной сетки (Рис. 42). В части защищаемых пунктов увеличение разрешающей способности сетки не привело к существенному изменению мареограмм, но в некоторых амплитуды увеличились до двух раз и более.

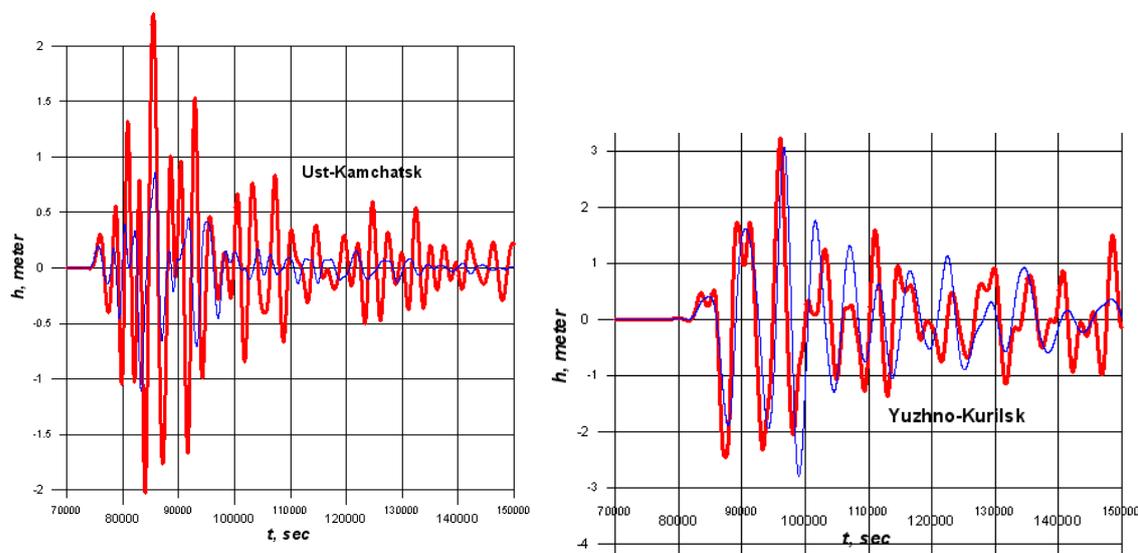


Рис. 42. Мареограммы, рассчитанные в малой области с использованием метода «заморозки» на 5-минутной (тонкие синие линии) и на 2-минутной (жирные красные линии) сетках: мареограф «Усть-Камчатск» (слева), «Южно-Курильск» (справа).

В рамках контрактов 2009 – 2010 гг. будут продолжены работы по определению характеристик воздействия на Дальневосточное побережье РФ удаленных цунами с использованием сеток необходимой детальности (15 секунд) и модельных очагов, разработанных в ходе выполнения настоящего контракта. Эти работы потребуют значительных вычислительных ресурсов и серьезной аналитической работы для постановок задач (подготовка входных данных, адаптация алгоритмов, создание параллельных версий программ и др.) и интерпретации результатов.

## **5. Методика разработки базы данных максимальных высот волн на изобатах 10 метров для модельных очагов цунамигенных землетрясений для защищаемых пунктов побережья Сахалинской области и Приморского края.**

Все расчеты проводились с помощью алгоритмического и программного обеспечения, характеристики которого детально описаны в отчетах исполнителей по контракту № 1н-07 от 22 марта 2007. Необходимые модификации в основном касались некоторого усовершенствования средств управления расчетом, а также представления информации, хранимой в базах данных. Здесь следует указать на возможность изменения масштаба отрисовки гистограмм и мареограмм с помощью дополнительной строки в файле Kamchatka.ini:

```
;Значение masshtab_vertical задавать в виде вещественного числа.  
masshtab_vertical=1.5
```

Величина masshtab\_vertical задается в метрах.

## **Библиография**

(ANSI,1992). Американский национальный институт стандартов, «Расширения языка программирования Фортран», ANSI X3.198 – 1992 (American National Standard — Programming Language Fortran Extended), 1992.

(ISO, 2004). Международная организация по стандартизации, «Информационные технологии — Языки программирования – Fortran: ч.1», ISO/IEC 1539-1:2004

(WG5, 1996). Рабочая группа международной организации по стандартизации JTC1/SC22/WG5, Перечень требований для последующих версий стандарта языка Fortran, Технический отчет ISO/IEC JTC1/SC22/WG5 N1189, 1996.

(Топ 50, 2008). 9-ая редакция списка **top50** самых мощных компьютеров СНГ от 23.09.2008 // <http://supercomputers.ru/?page=rating>

Berkman S.C., Symons J. M. (1961). Tsunami of May 22, 1960 as recorded at tide stations. Coast and Geodetic Survey, Washington, D.C., USA, 1961, 79 p.

Hatori T. (1974). Tsunami sources on the Pacific side in northern Japan. // Zisin, 1974, 27, №4, P. 321 – 337.

Iida K. (1984). Catalog of tsunamis in Japan and neighboring countries // Special report, Yashigasa, Aichi Institute of Technology, 1984, 52p.

Kanamori H. (1977). The energy release in great earthquakes // J. Geoph. Res., 1977, 82, P. 2981 – 2987.

Lander J.F., Lockridge P.A. (1989). United States tsunamis (Including United States possessions), 1690 – 1988, Boulder, Colorado, National Geophysical Data Center, 1989, 265 p.

Lockridge P.A. (1985). Tsunamis in Peru-Chile, Report SE-39, Boulder, WDC-A for Solid Earth Geophysics, 97 p.

(The Chilean tsunami, 1960). The Chilean tsunami of May 24, 1960 as observed along the coast of Japan // The Committee for Field Investigation of the Chilean tsunami of 1960, Tokyo, 1961, 397p.

(WinITDB, 2007). Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007,

CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Аверьянова В.Н. (1968). Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока, М.: Наука, 1968, 192 с.

Балакина Л.М. (1979). Ориентация разрывов и подвижек в очагах сильных землетрясений северной и северо-западной части Тихого океана. // Физика Земли, 1979, № 4, С.43 – 52.

Балакина Л.М. (1972). Цунами и механизм очага землетрясений северо-западной части Тихого океана. // В кн.: Волны цунами: Труды СахКНИИ, вып. 29, Южно-Сахалинск, 1972, С.48 – 72.

(Вычислительный комплекс, 2008). НГУ.Вычислительный комплекс НГУ. Первичное руководство по эксплуатации. Новосибирский государственный университет. Новосибирск, 2008.

Заякин Ю.А., Лучинина А.А. (1987). Каталог цунами на Камчатке, Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987, 51с.

Иконникова Л.Н. (1964). Предельно большие цунами у советского побережья Тихого океана // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, вып. 17, 1964.

Лобковский Л.И., Баранов Б.В. (1982). К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферных плит.// В кн.: Процессы возбуждения и распространения цунами, М.: ИО АН СССР, 1982, С.7 – 17.

Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1979). Деформация литосферных плит в зонах поддвига // В кн.: Океанология. Геофизика океана, Т.2, Геодинамика, М.: Наука, 1979, С.194 – 203.

Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. (1980). Тектоника литосферных плит и происхождение цунамигенных землетрясений. // ДАН СССР, 1980, 251, № 5. С.1092 – 1095.

(Итоговый отчет, 2007). Расчет высот волн для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона. 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». Итоговый отчет. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск, 2007. 63 с.

Соловьев С.Л. (1978). Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737-1976гг. // Изучение цунами в открытом океане, М.: Наука, 1978. С.61 – 136.

Соловьев С.Л., Го Ч.Н. (1975). Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана, М.: Наука, 1975. 203 с.

Тараканов Р.З., Ким Х.С. (1980). Особенности сейсмичности Курило-Камчатской зоны и проблема выделения поперечных разломов // В кн.: Сейсмичность и механизмы очагов землетрясений Дальнего Востока, Южно-Сахалинск: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1980, С.31 – 39.

Шокин Ю.И., Бейзель С. А., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. (2006). Об использовании методов численного моделирования для решения прикладных задач проблемы цунами // В кн.: Тр. Междунар. конф. “Вычисл. и информационные технологии в науке, технике и образовании”. Т. I. Павлодар: ТОО НПФ “ЭКО”. 2006. С. 36 – 51.

Kelleher, J.A. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions, J. Geophys. Res. 77(11). 2087 – 2103.

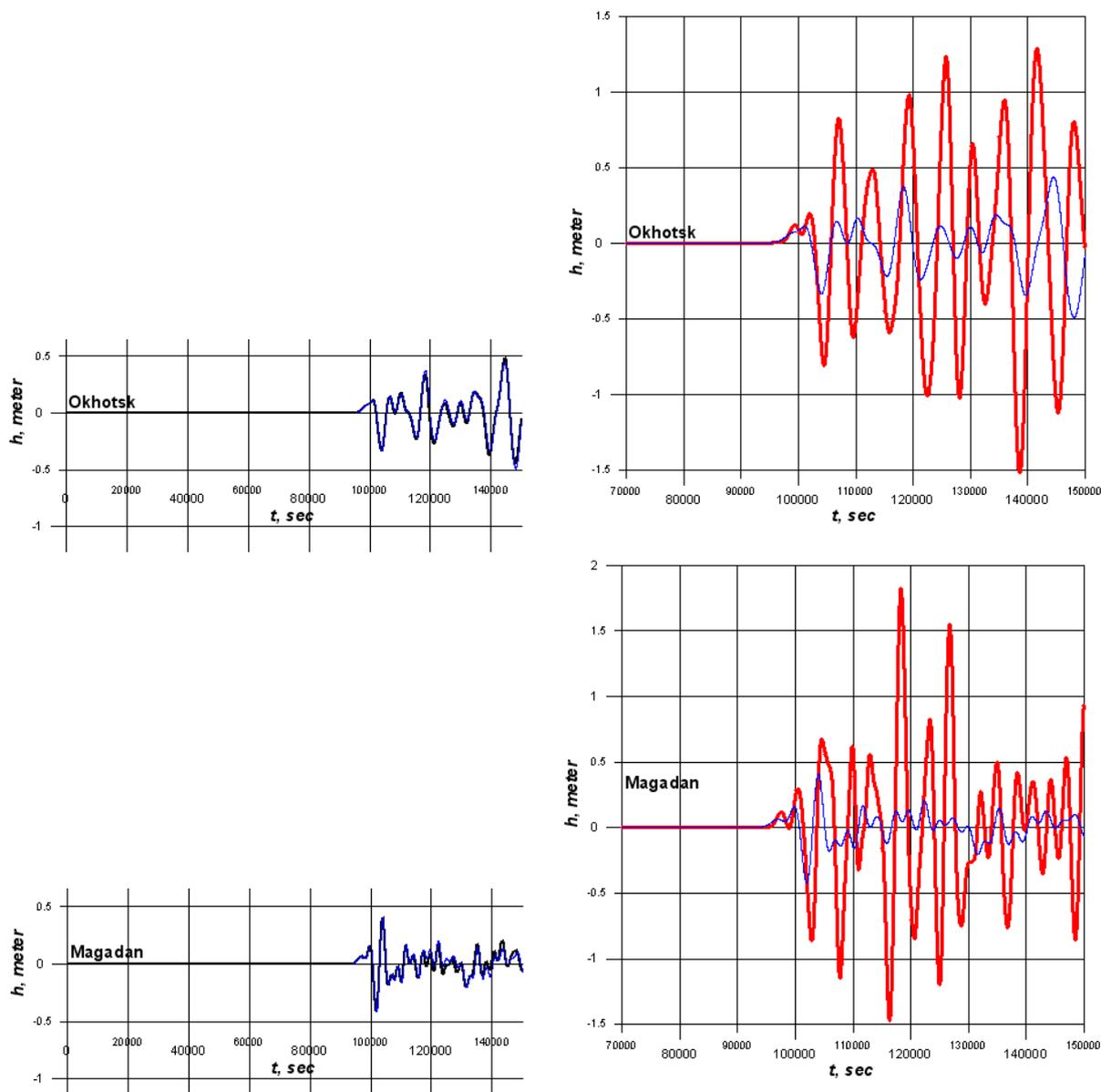
Kulikov, E., Rabinovich, A., Thompson, R. (2005). Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile // Natural Hazards, 35. 185 – 209

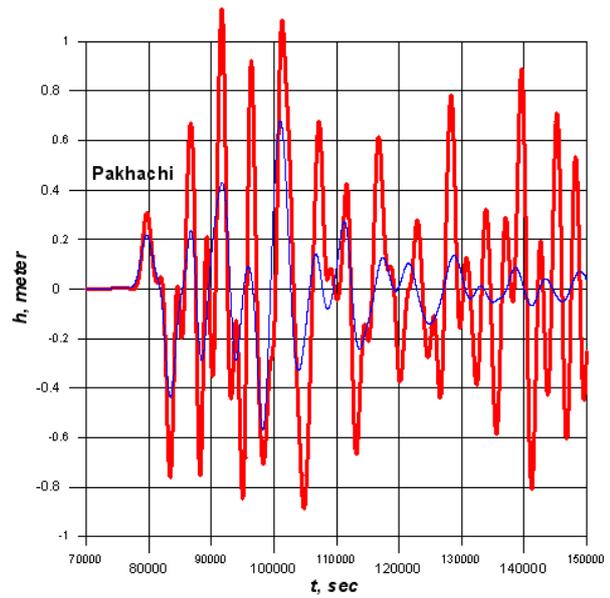
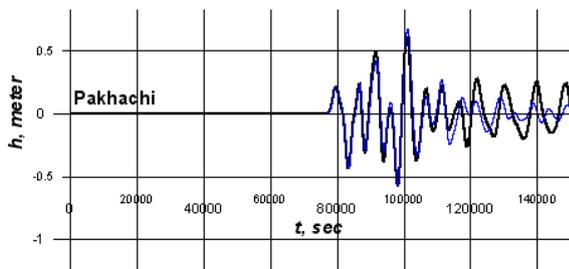
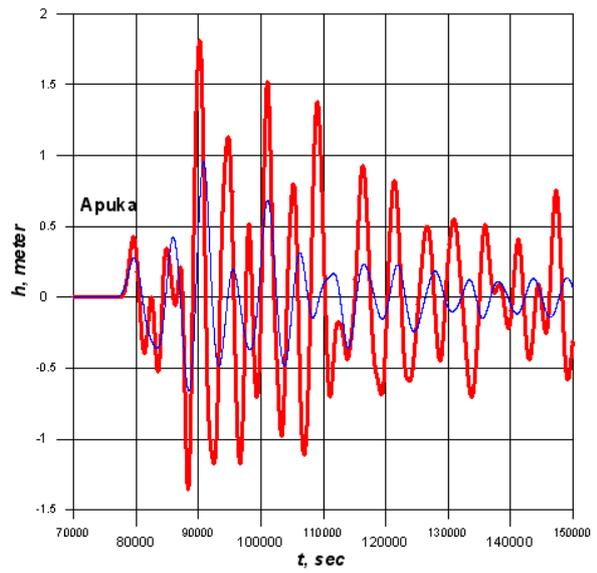
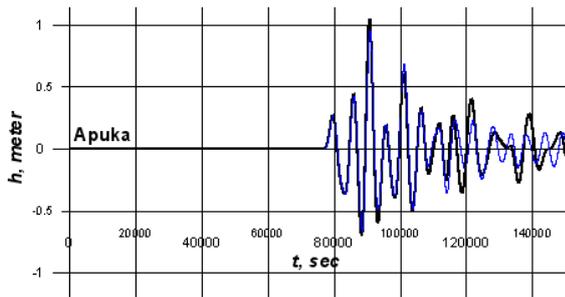
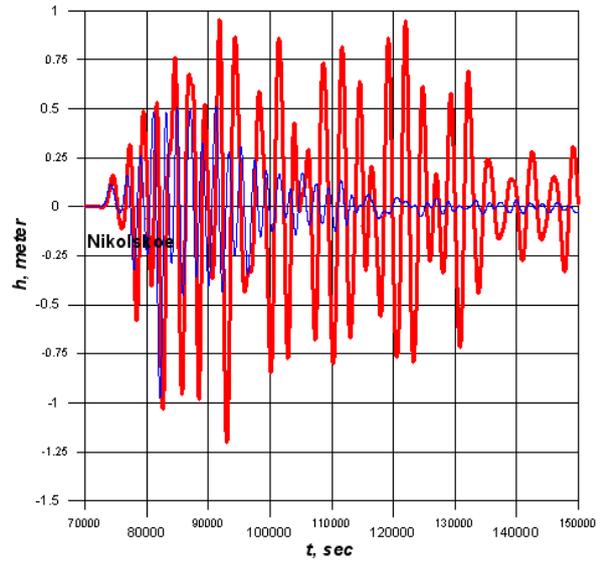
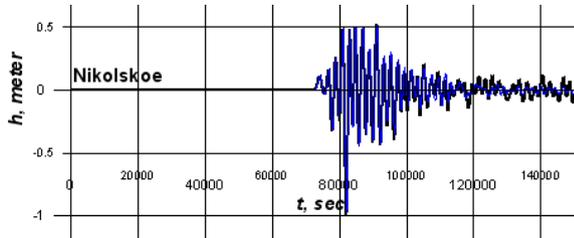
Atwater B.F. (1987). Evidence for Great Holocene Earthquakes Along the Outer Coast of Washington State.// Science, 1987, 236:942-944.

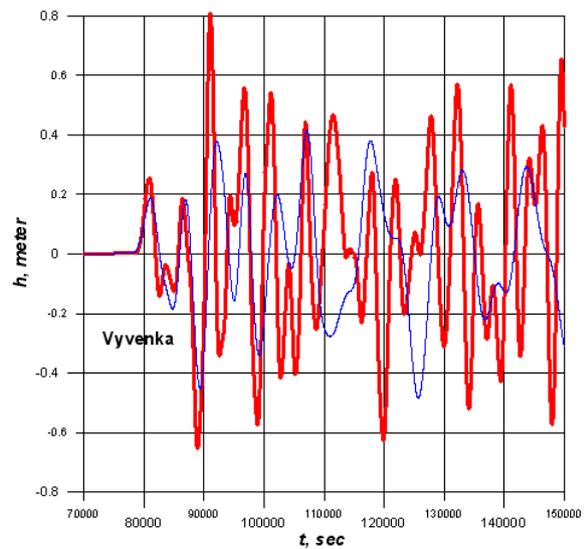
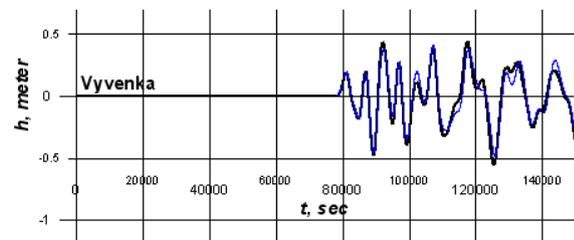
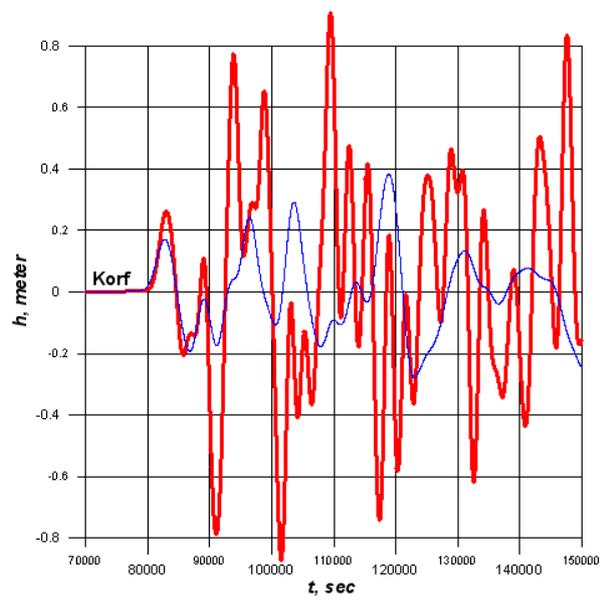
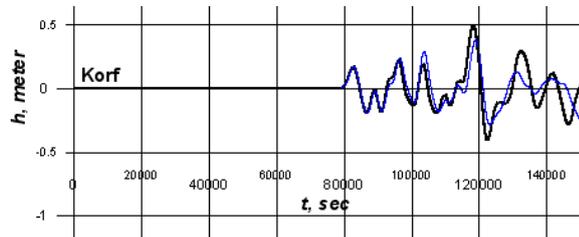
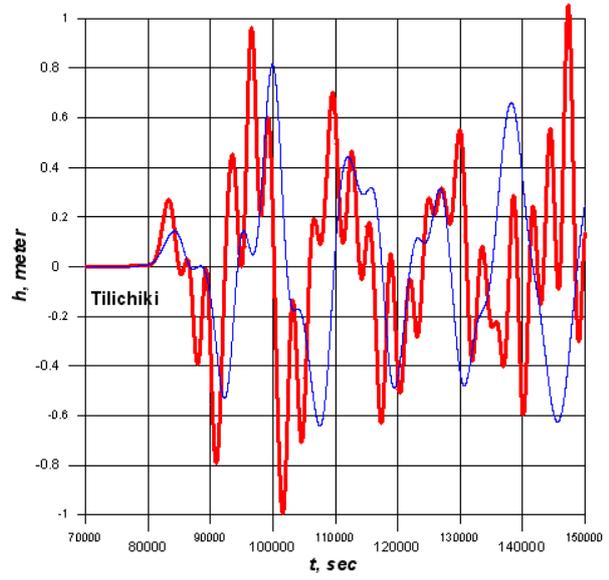
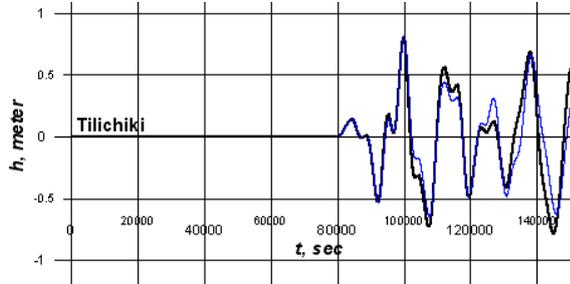
Atwater B.F., Satoko M.-R., Satake K., Tsuji Y., Ueda K., and Yamaguchi D.K. (2005). The Orphan Tsunami of 1700: Japanese Clues to a Parent Earthquake in North America. U.S. Geological Survey and University of Washington Press, Seattle, Washington, 2005.

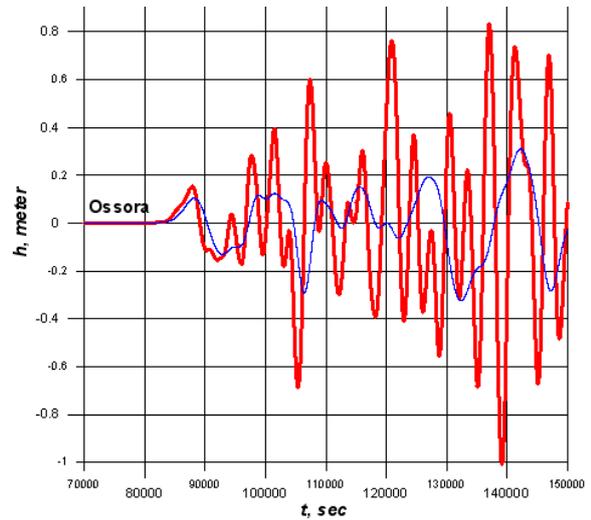
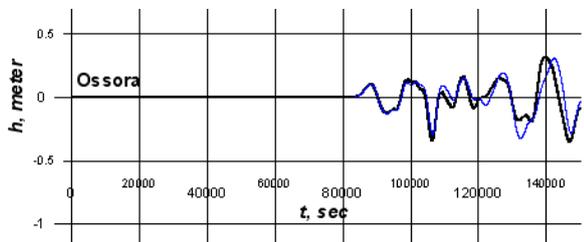
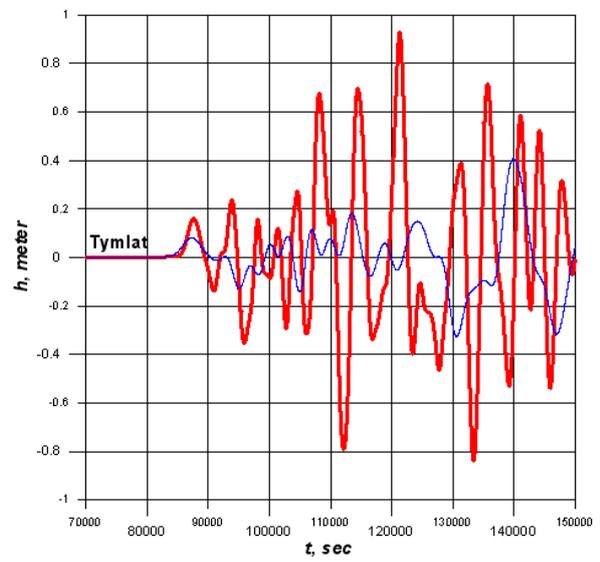
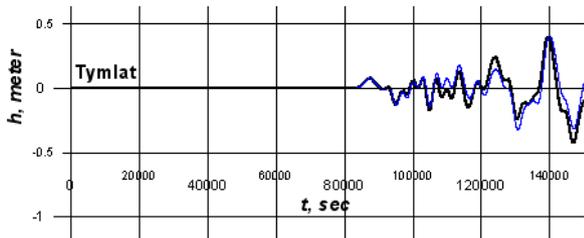
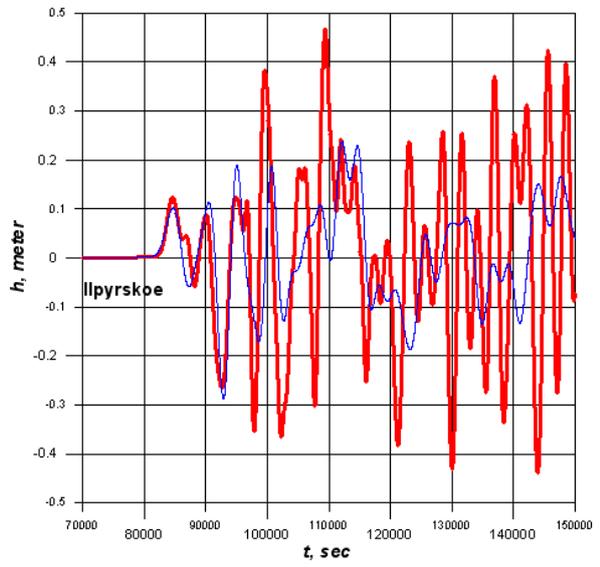
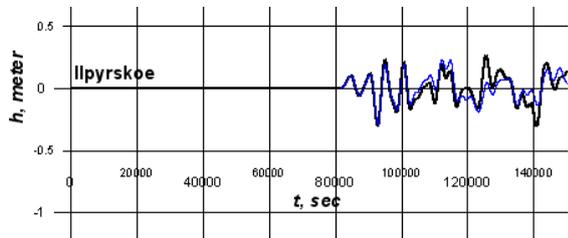
**Мареограммы, рассчитанные в ходе моделирования Чилийского цунами 1960 г.**

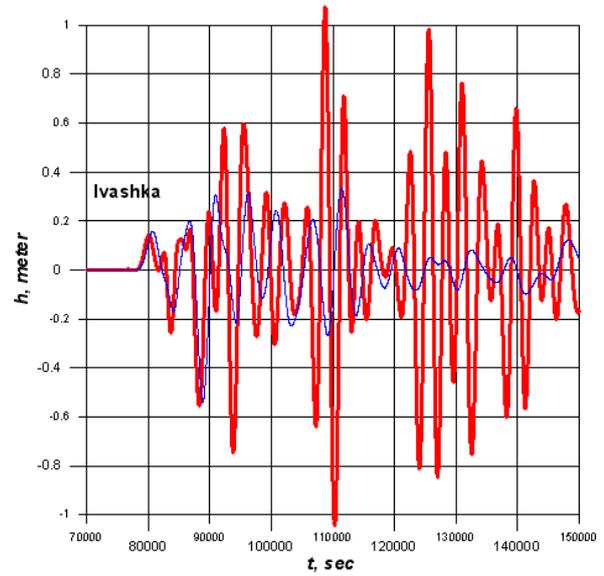
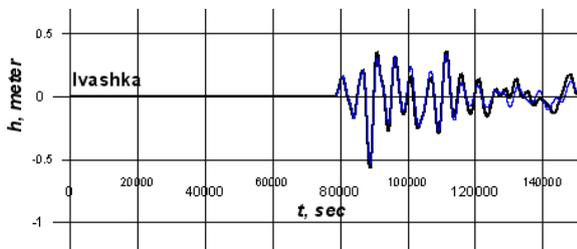
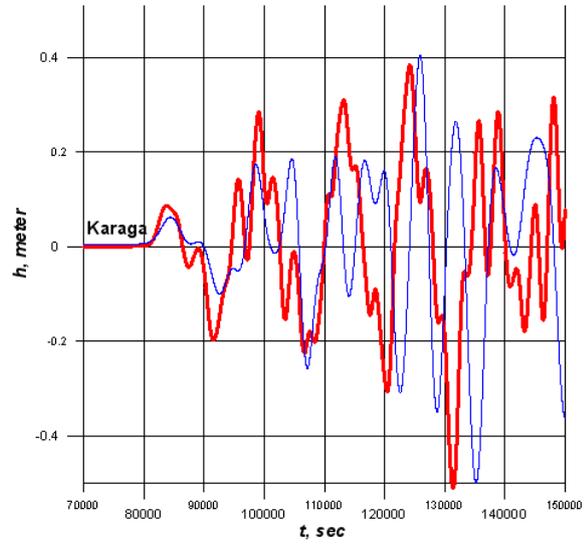
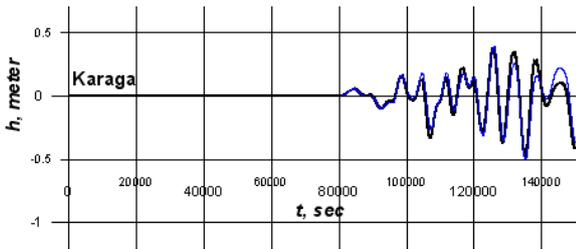
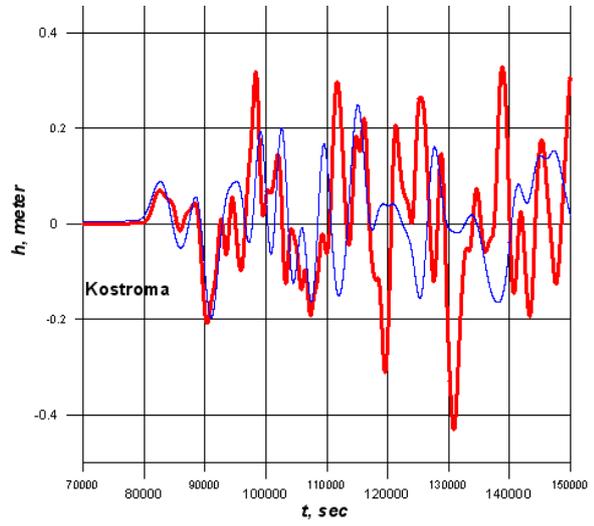
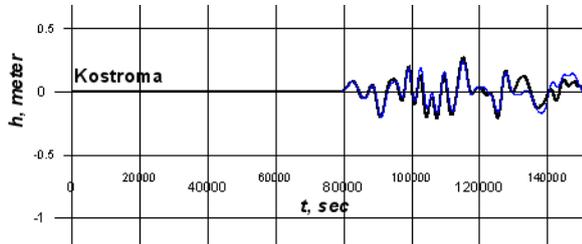
В настоящем разделе достаточно полно представлены результаты моделирования Чилийского цунами 1960 г. Прежде всего, это мареограммы в наборе защищаемых пунктов, рассчитанные во всей расчетной области на пятиминутной сетке и с помощью изложенного выше метода «заморозки» Рисунок 1. На левых графиках жирной черной линией изображены мареограммы, рассчитанные во всей области однородным образом, а тонкой синей – с «заморозкой» и последующим расчетом в малой области на пятиминутной сетке. На правых – мареограммы в тех же точках, рассчитанные с использованием метода «заморозки» на пятиминутной сетке в малой области (тонкие синие кривые) и двухминутной (жирные красные кривые).

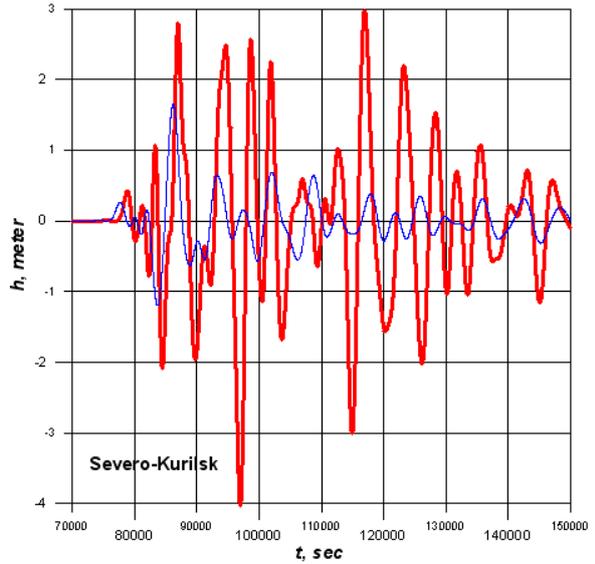
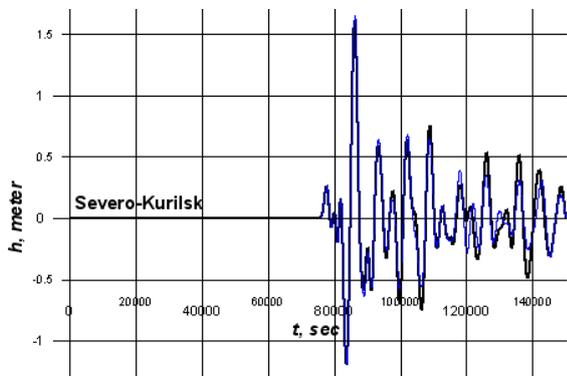
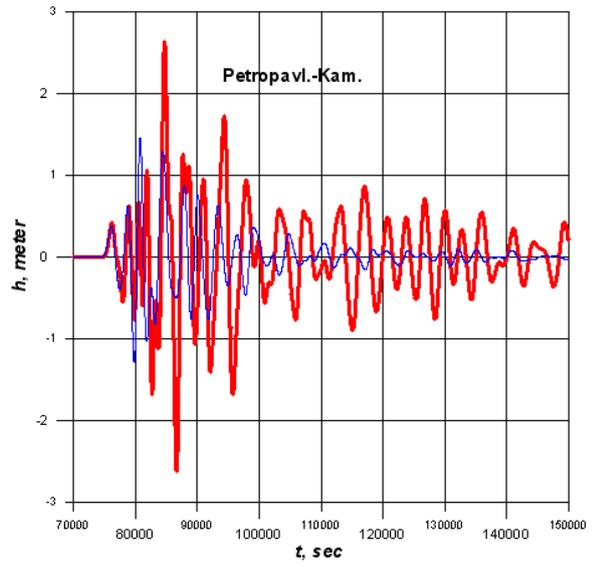
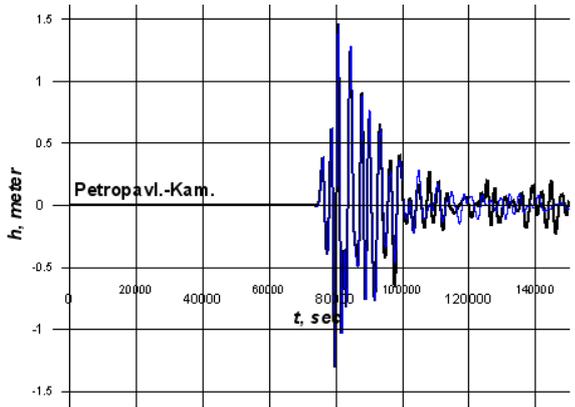
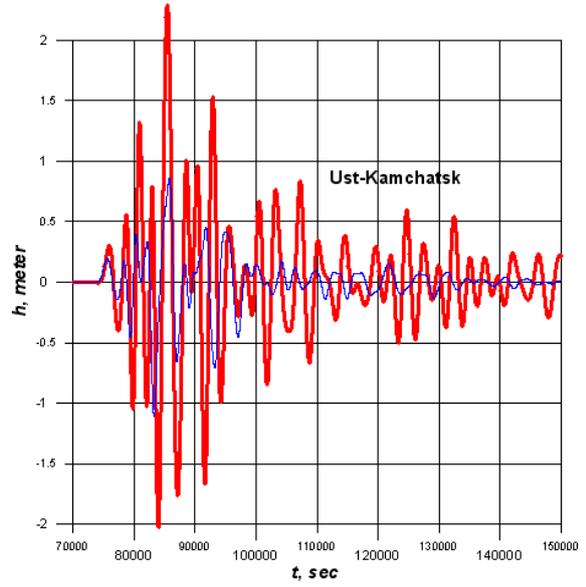
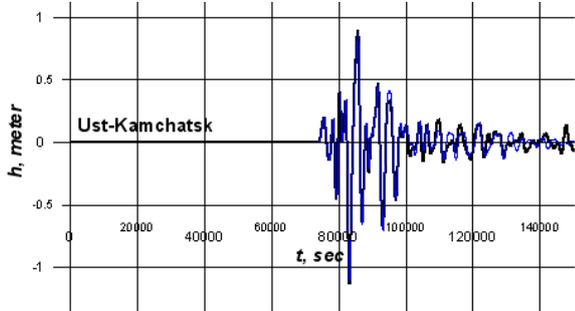


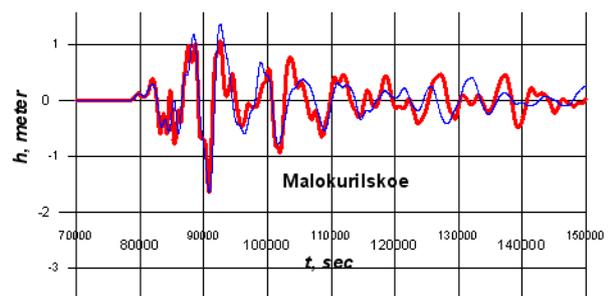
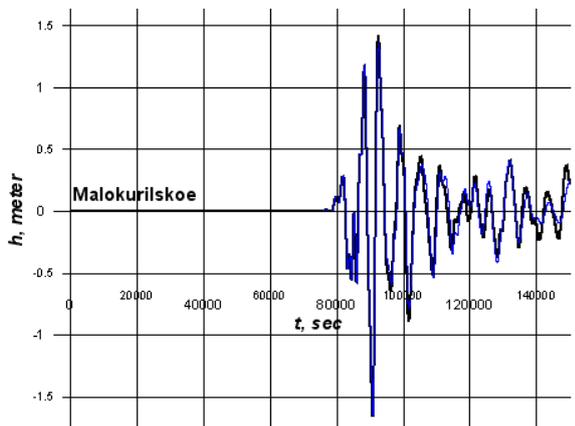
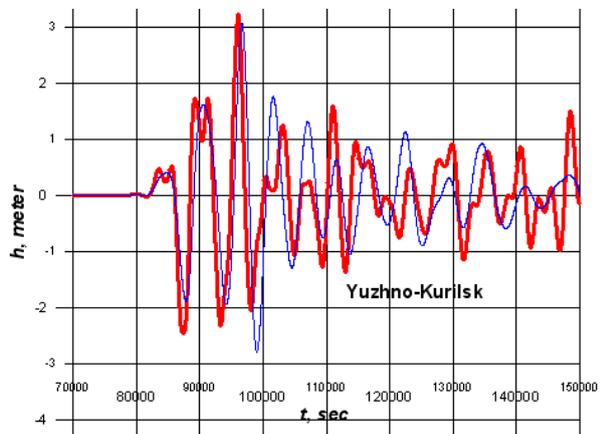
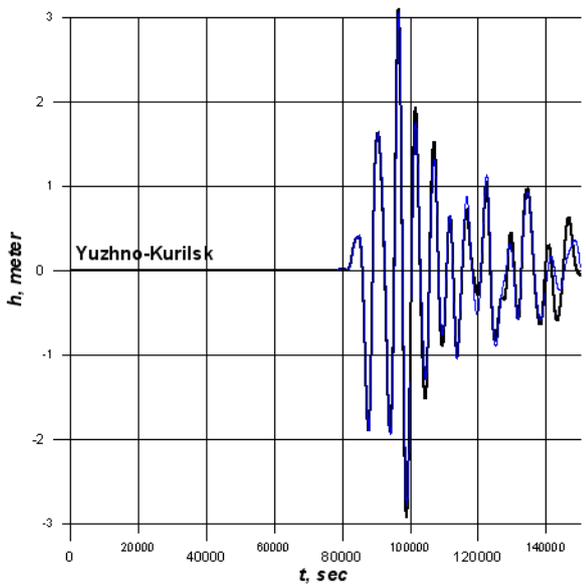
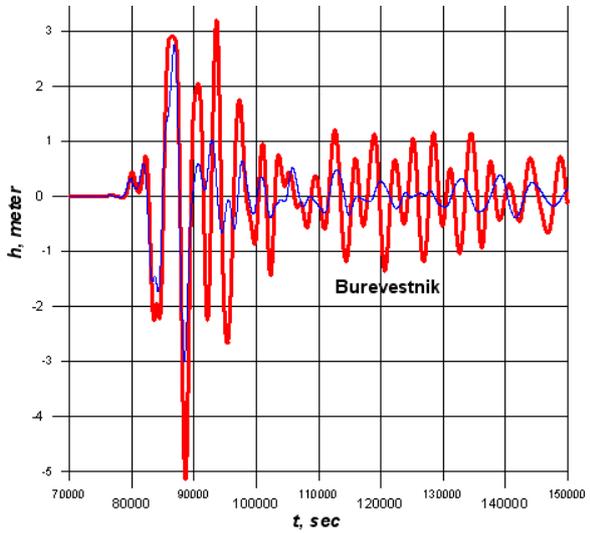
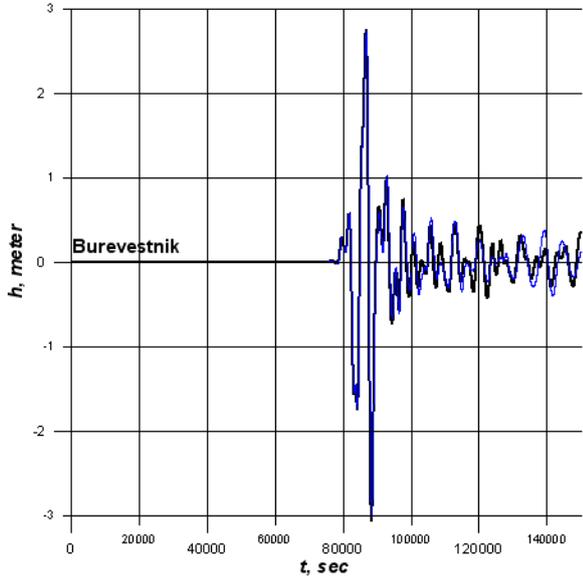
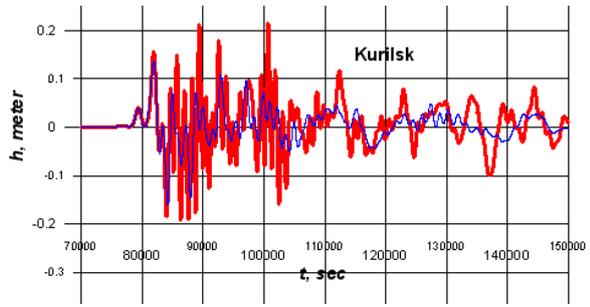
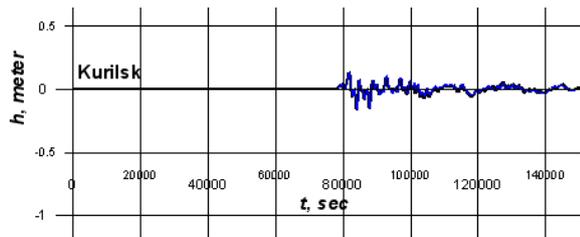


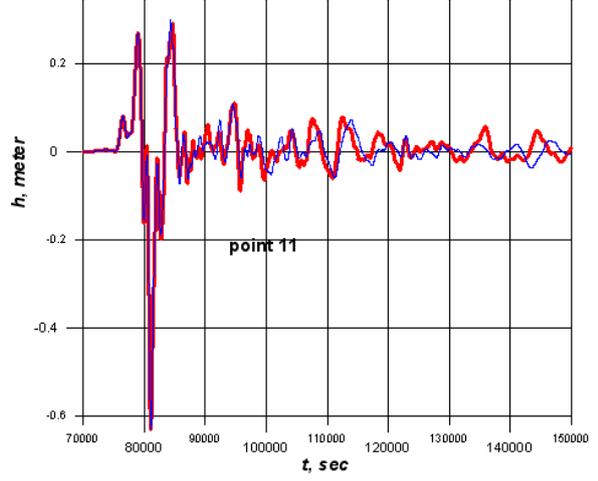
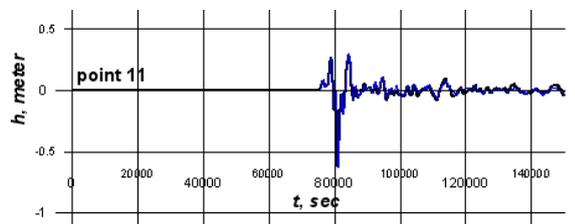
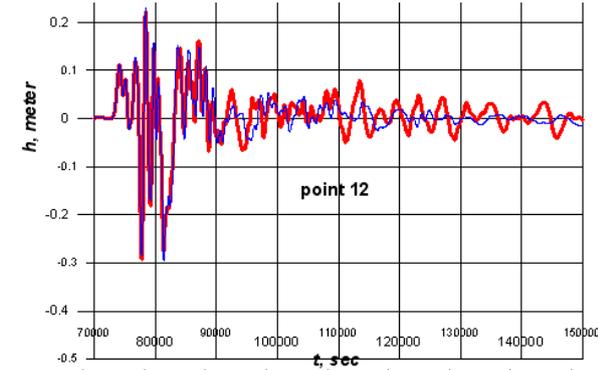
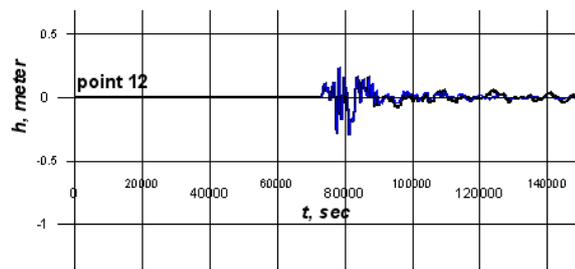
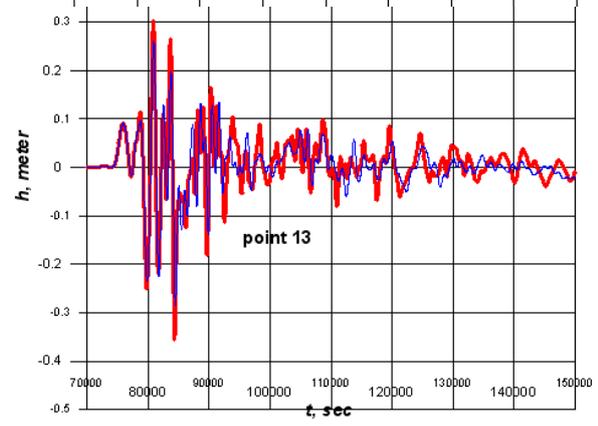
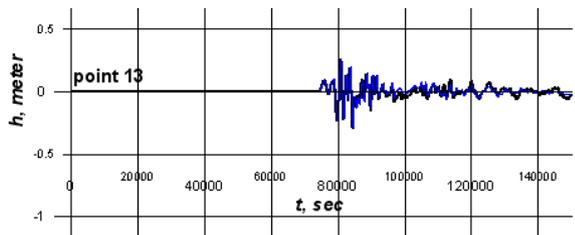
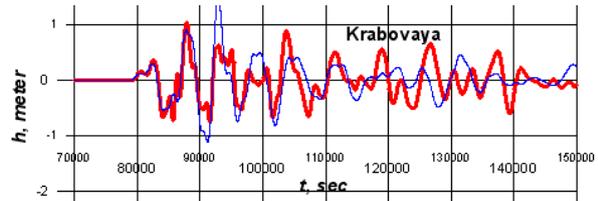
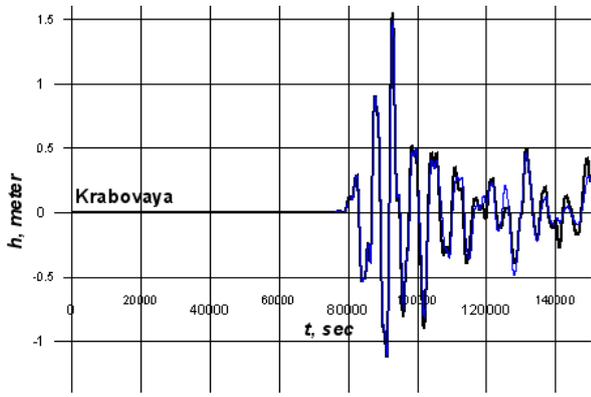


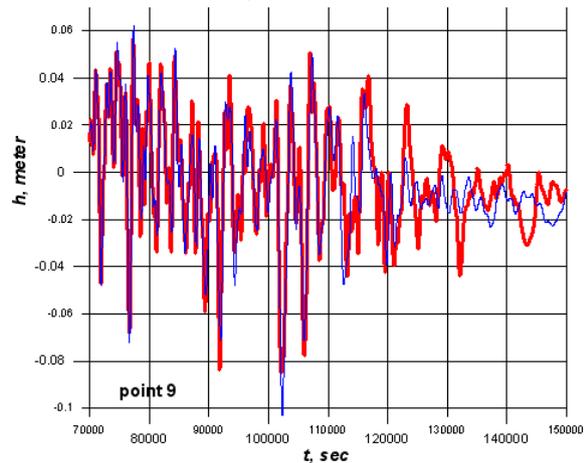
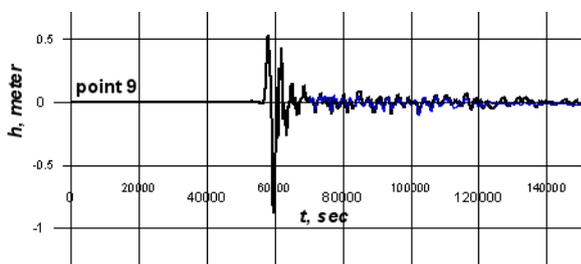
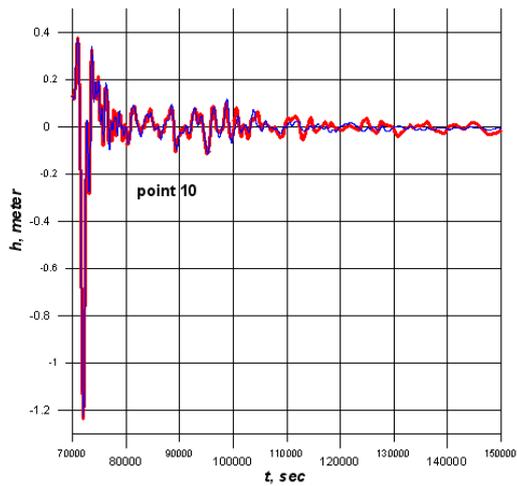
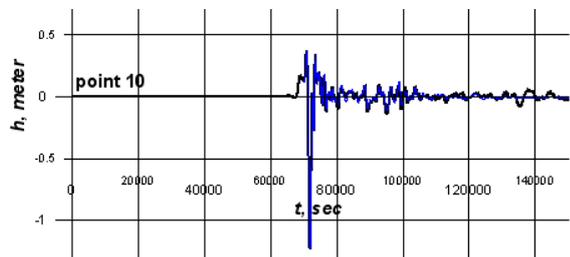






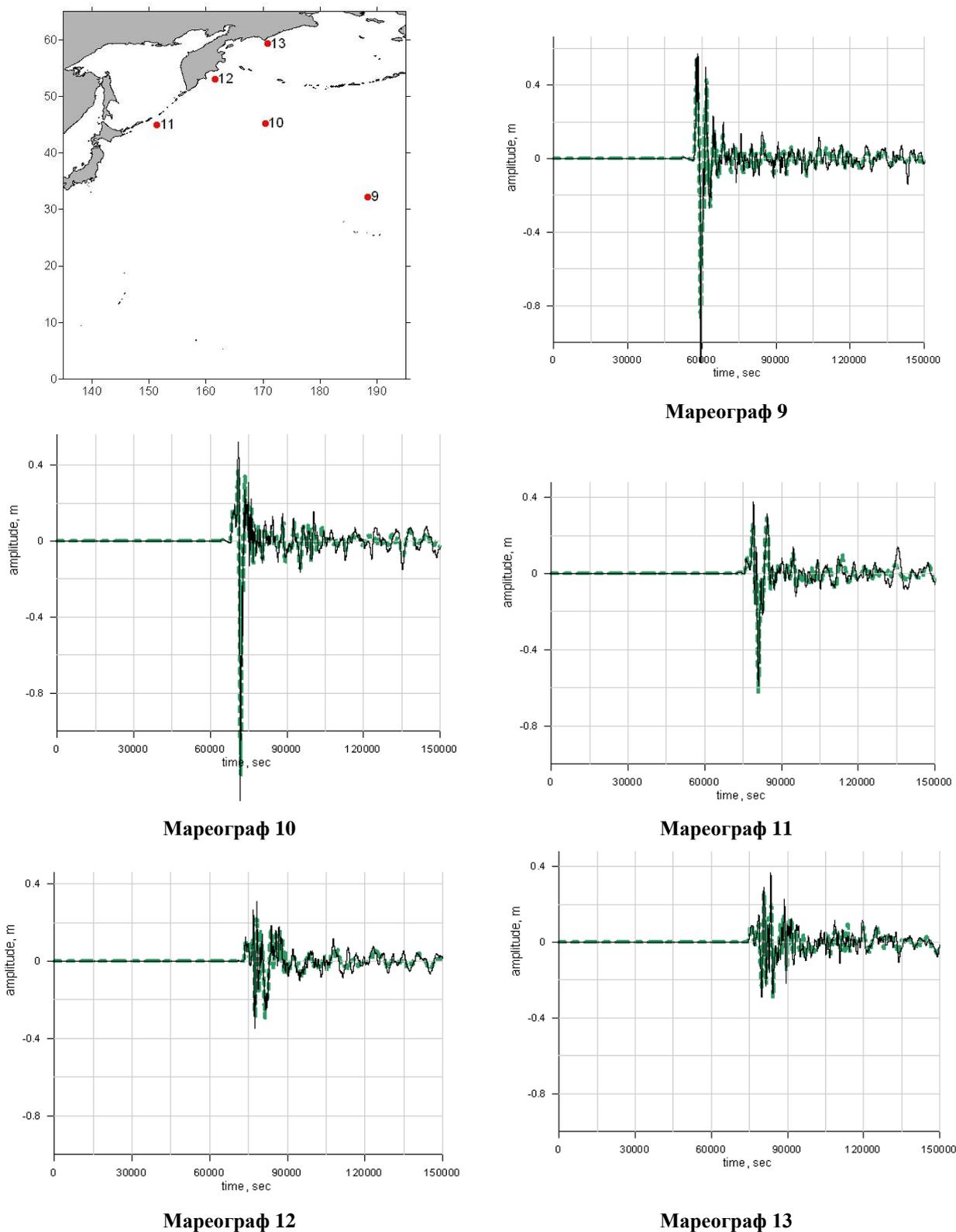






**Рисунок 1.** Результаты моделирования Чилийского 1960 г. цунами. На левых графиках жирной черной линией изображены мареограммы, рассчитанные во всей области однородным образом, а тонкой синей – с «заморозкой» и последующим расчетом в малой области на пятиминутной сетке. На правых – мареограммы в тех же точка, рассчитанные с использованием метода «заморозки» на пятиминутной сетке в малой области (тонкие синие кривые) и двухминутной (жирные красные кривые).

Сравнение следующей группы мареограмм (Рисунок 2), рассчитанных в глобальной области на пятиминутной и двухминутной сетках для начального возмущения, порожденного модельным источником «Chilean-S», демонстрирует их практическую идентичность.



**Рисунок 2.** Сравнение мареограмм, рассчитанных в глобальной области на пятиминутной и двухминутной сетках для начального возмущения, порожденного модельным источником «Chilean-S». Толстыми зелеными штриховыми линиями отрисованы мареограммы, рассчитанные на пятиминутной, тонкими черными сплошными – на двухминутной сетках. Вверху слева указано размещение «контрольных» мареографов в малой расчетной области.

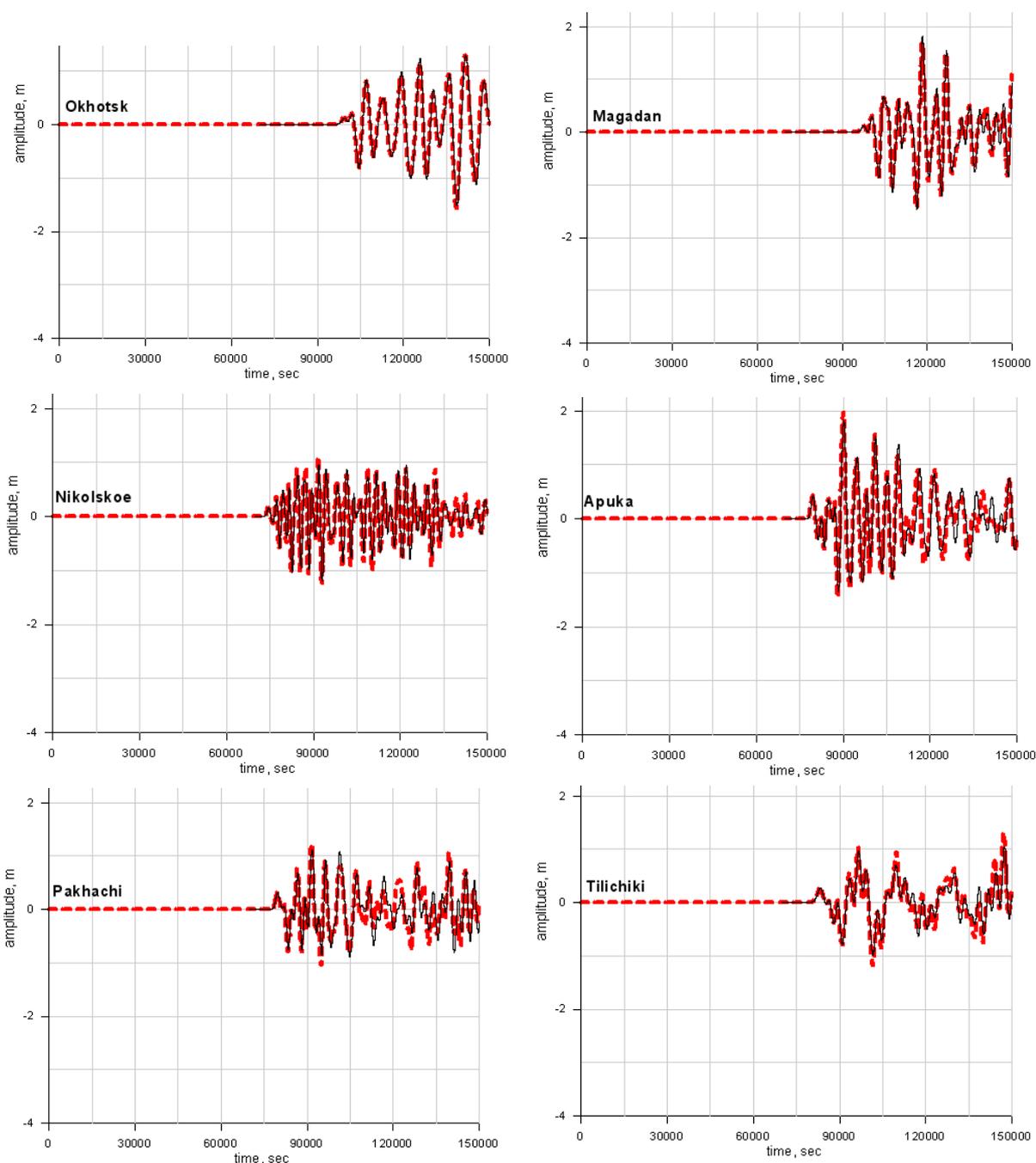
Этот результат приводит к выводу о возможности использования «пятиминутных» замо-

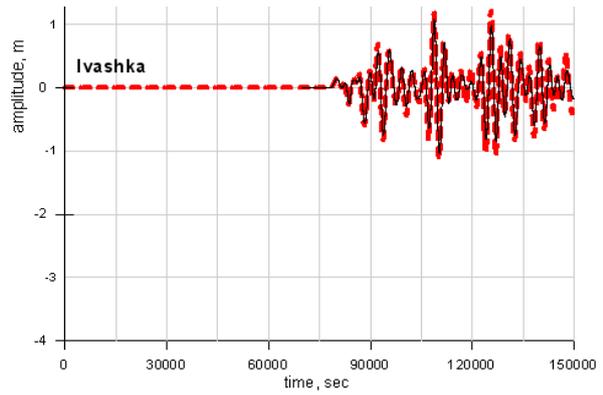
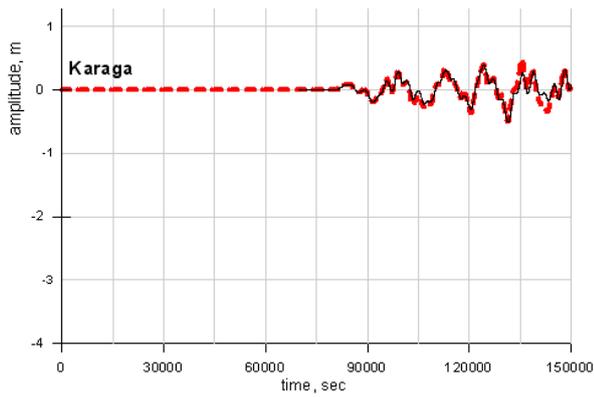
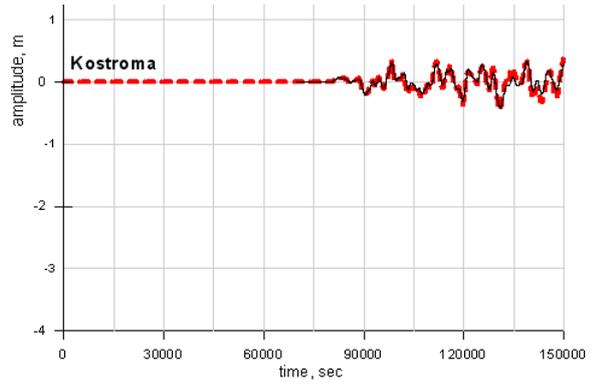
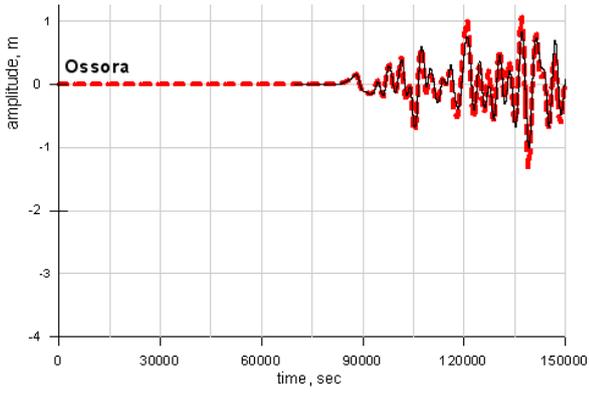
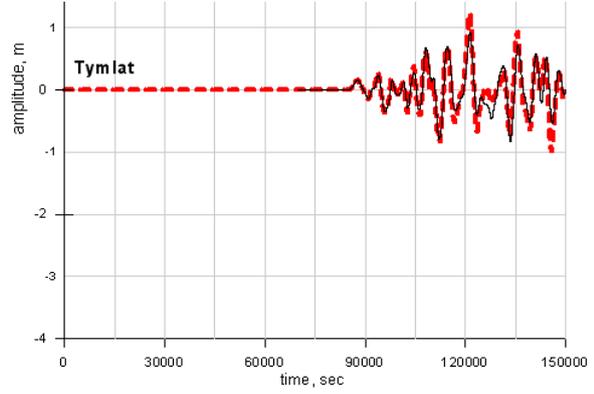
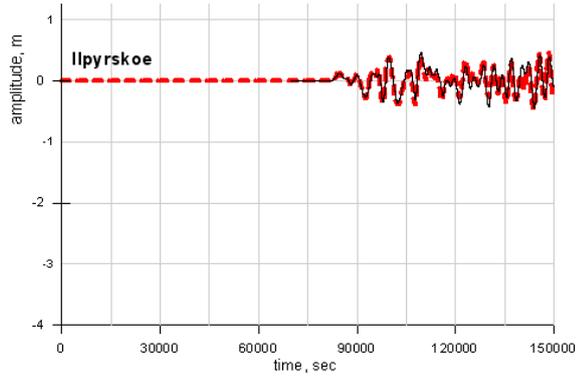
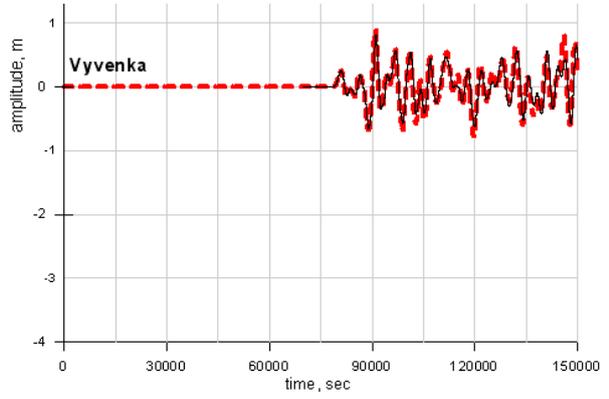
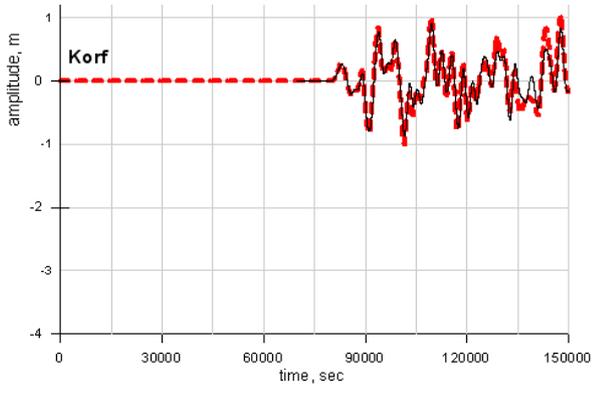
роженных полей в качестве начальных данных для последующих вычислений в малой области на детальной сетке. Здесь толстыми зелеными штриховыми линиями отрисованы мареограммы, рассчитанные на пятиминутной, а тонкими черными сплошными – на двухминутной сетках.

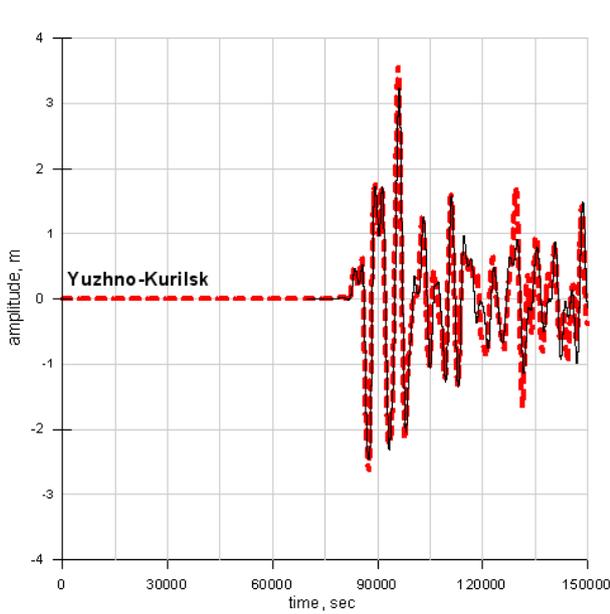
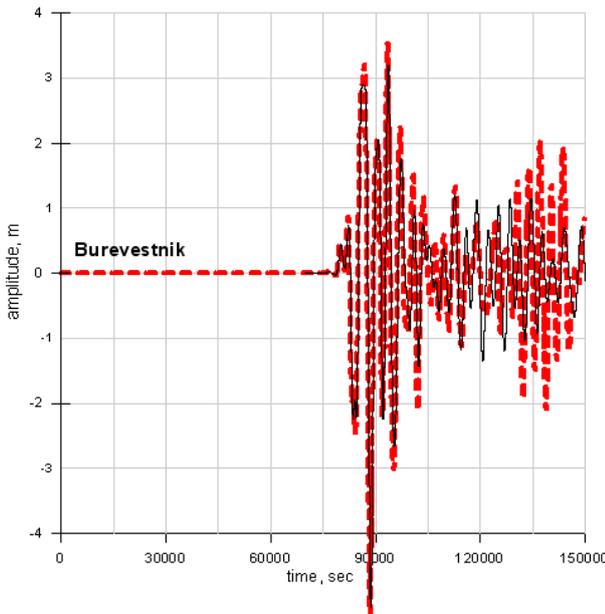
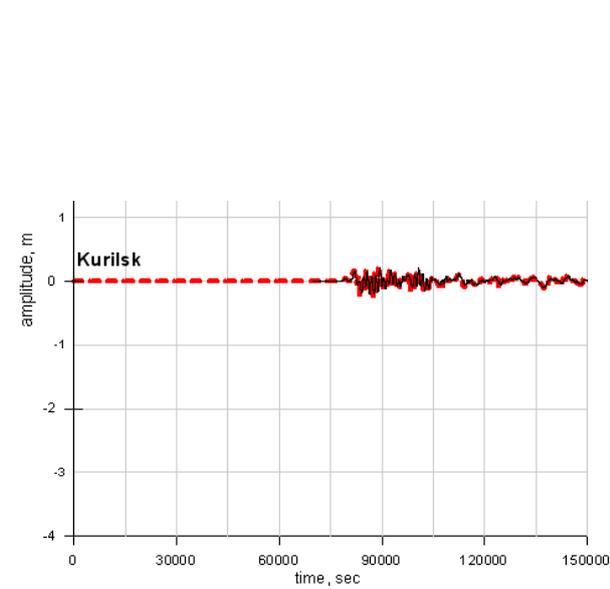
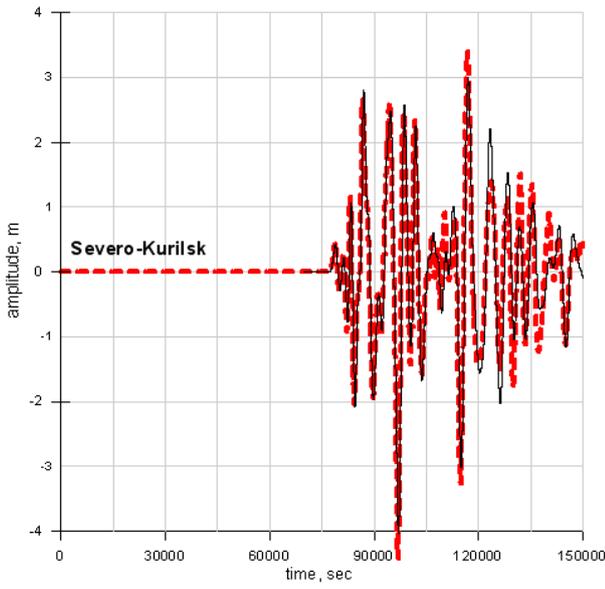
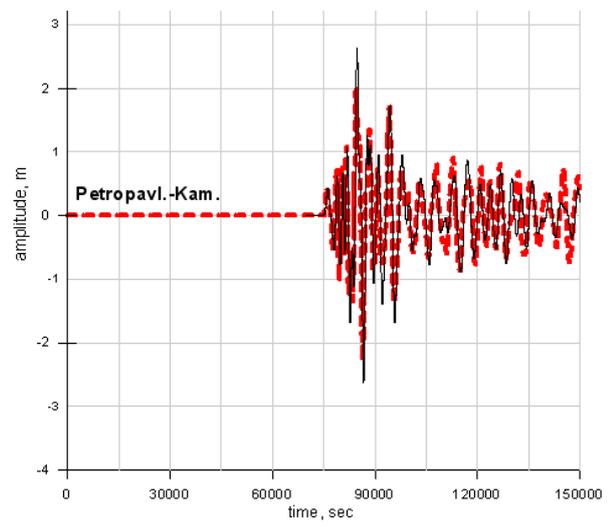
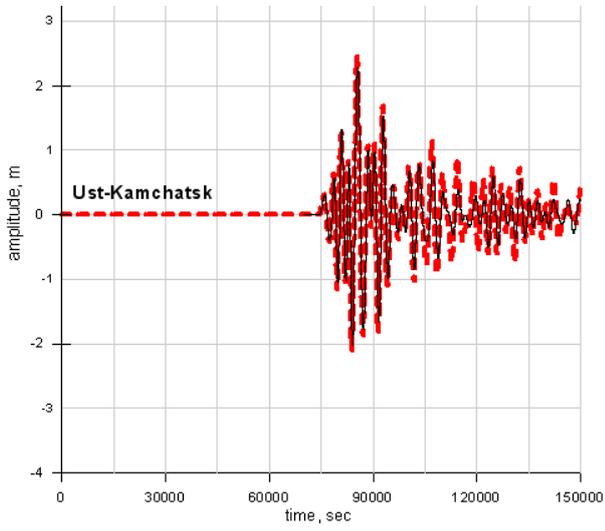
Последующая серия графиков (Рисунок 3) демонстрирует сравнение результатов, рассчитанных на двухминутной сетке в глобальной области для начального возмущения, порожденного модельным источником «Chilean-S», и результатов, рассчитанных с использованием метода «заморозки», когда в качестве начальных данных в момент времени 70000 сек использовались «замороженные» результаты расчета для этого же начального возмущения в глобальной области на пятиминутной сетке.

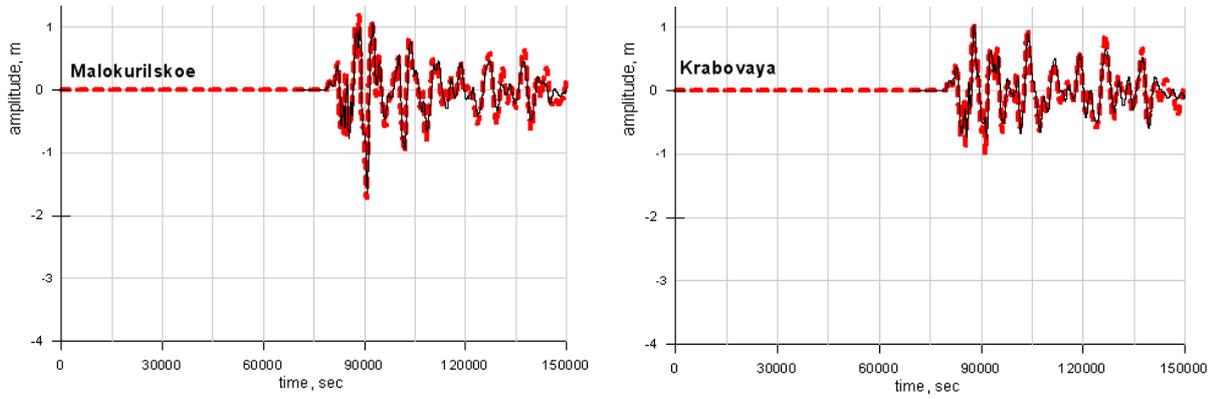
Здесь толстыми красными штриховыми линиями отрисованы мареограммы, рассчитанные по всей глобальной области на двухминутной сетке, а тонкими черными сплошными – мареограммы, рассчитанные в малой области на двухминутной сетке с использованием «замороженных» в момент 70000 сек «пятиминутных» полей.

Как следует из приведенных графиков, результаты практически не различаются.





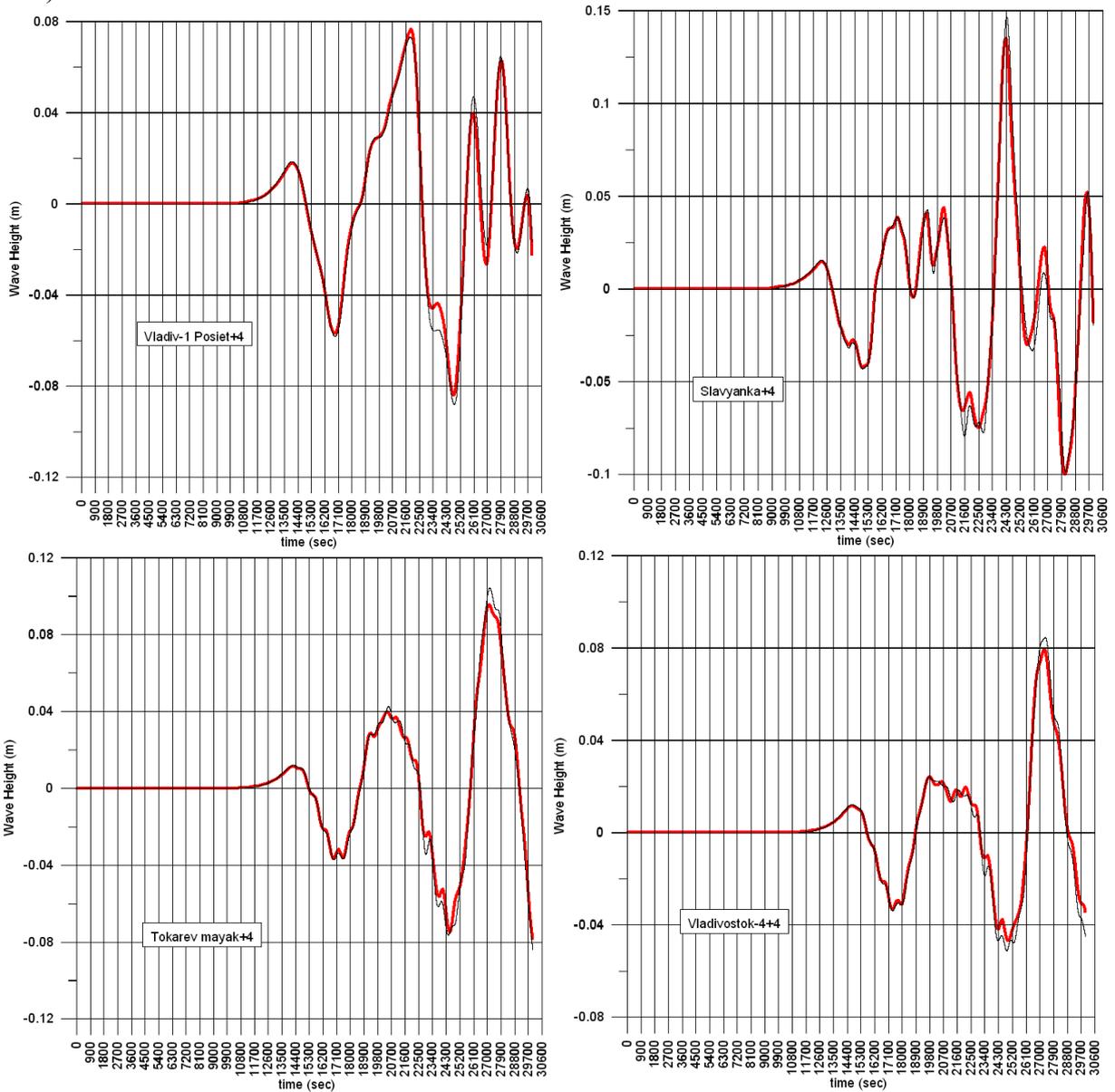


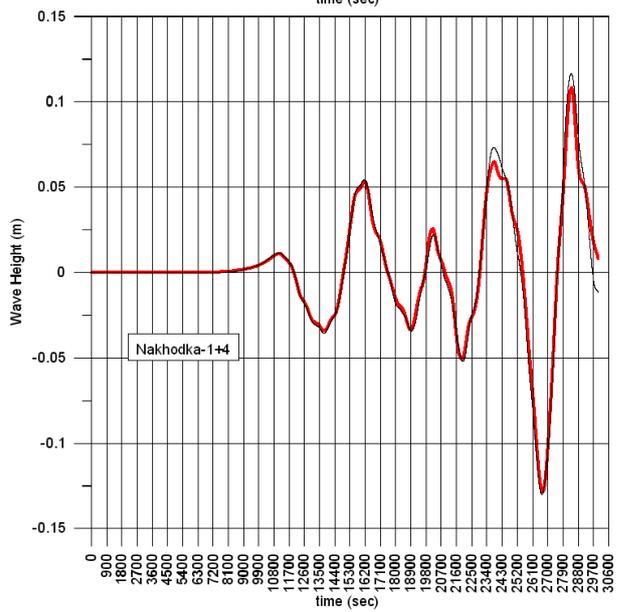
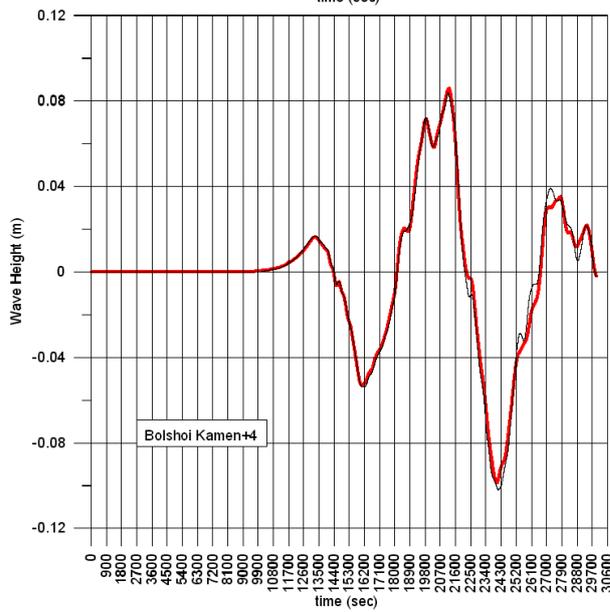
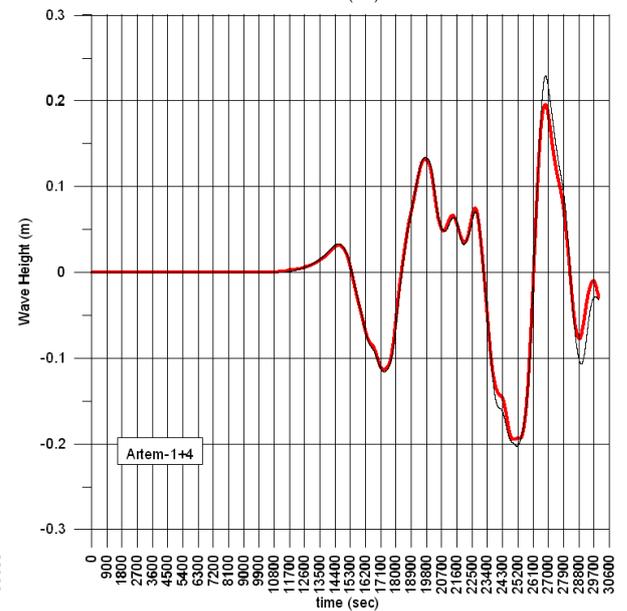
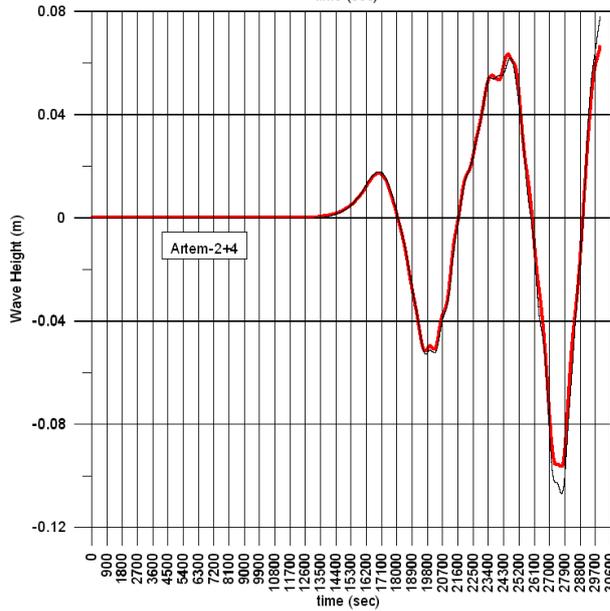
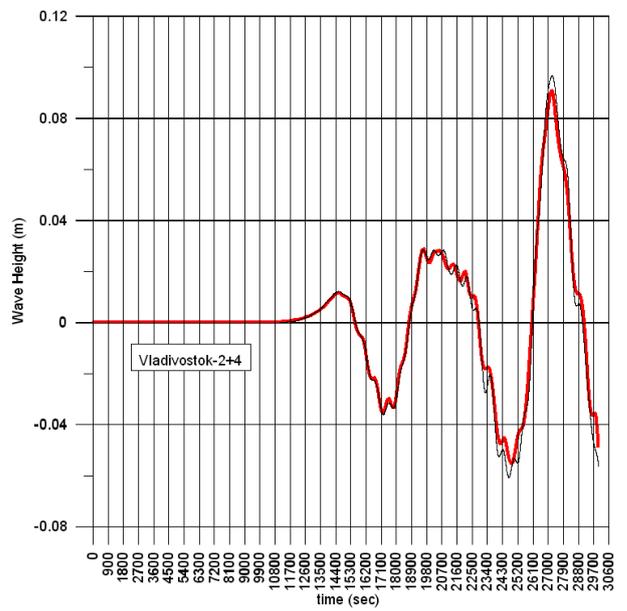
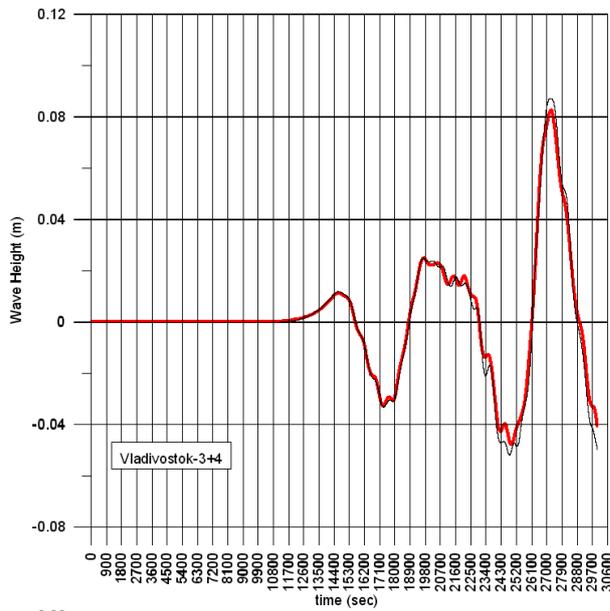


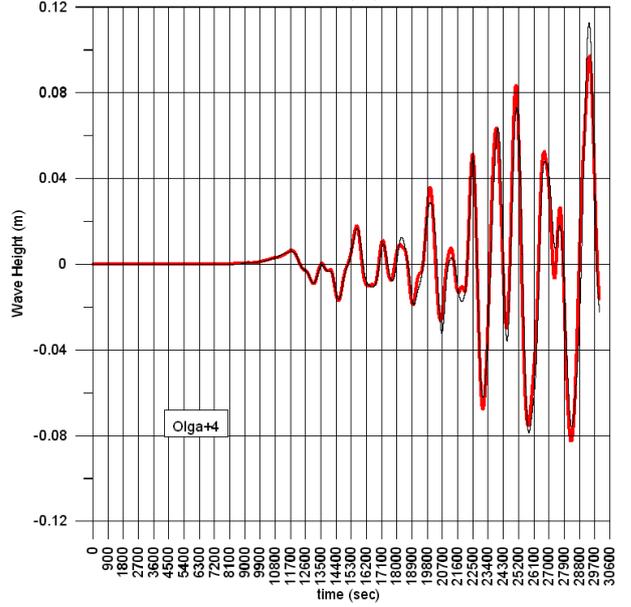
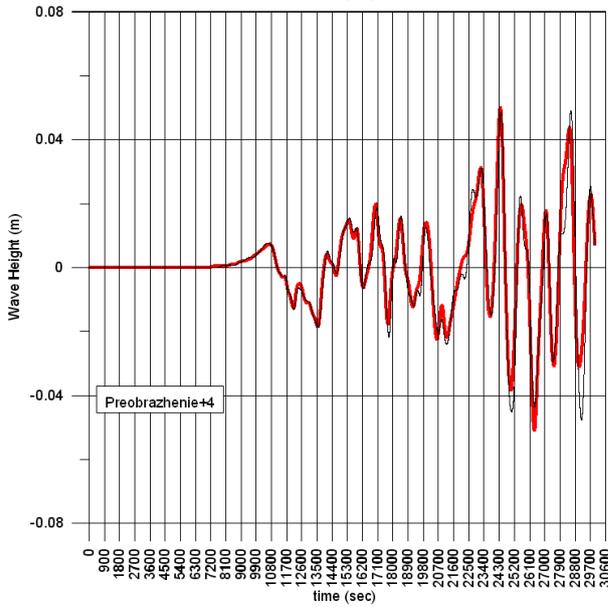
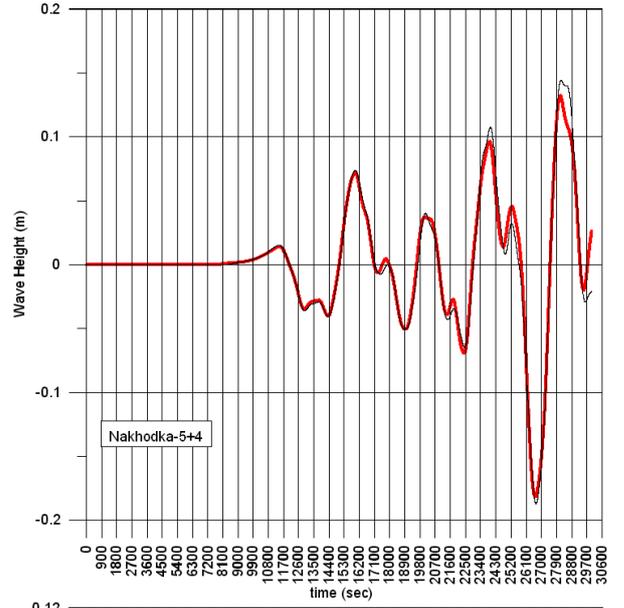
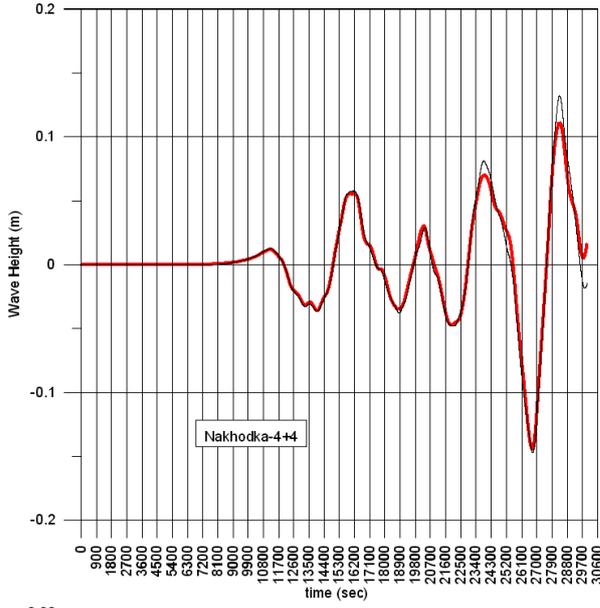
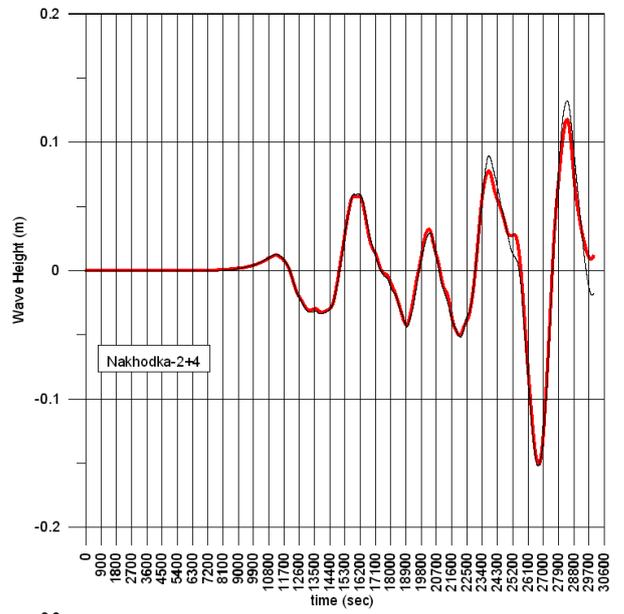
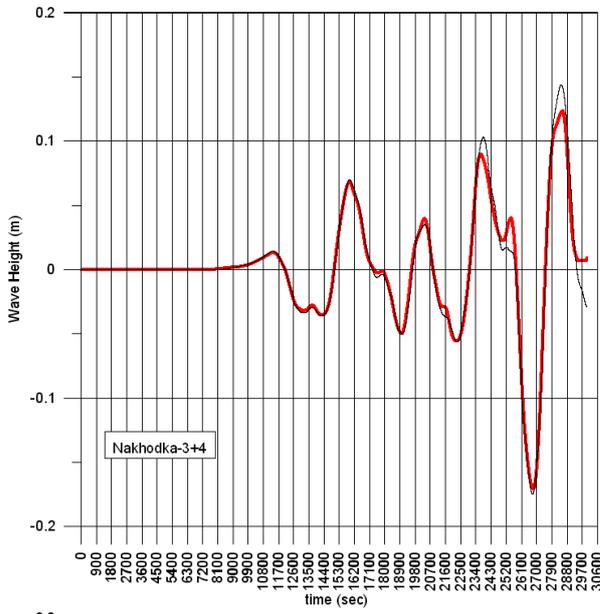
**Рисунок 3.** Сравнение мареограмм, рассчитанных на двухминутной сетке в глобальной области для начального возмущения, порожденного модельным источником «Chilean-S» (жирная красная штриховая линия), и мареограмм, рассчитанных в малой области на двухминутной сетке (тонкая, черная сплошная линия) с использованием в качестве начальных данных замороженных в момент времени 70000 сек результатов расчета для этого же начального возмущения в глобальной области на пятиминутной сетке.

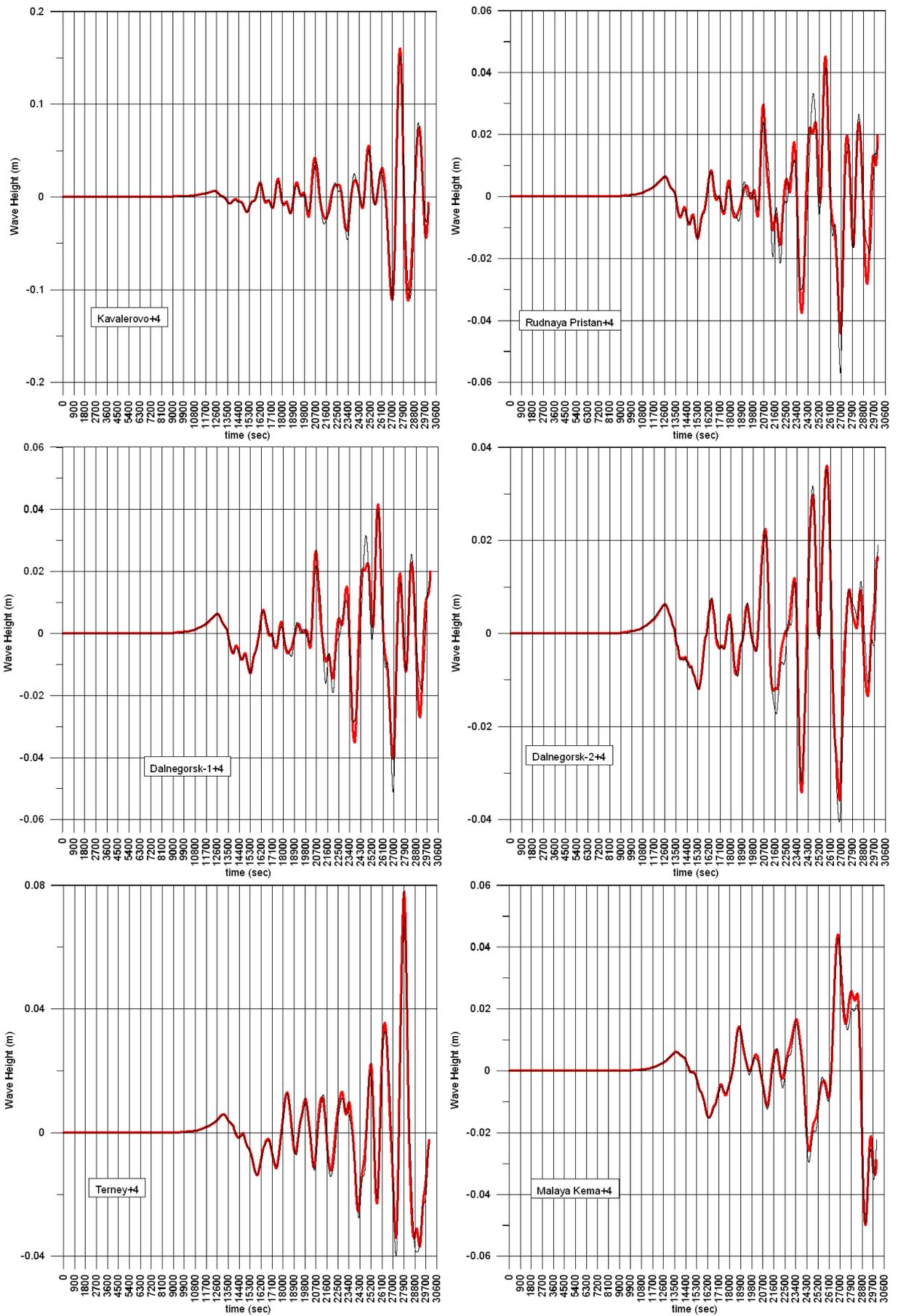
**Сравнение результатов расчетов по нелинейной и линейной моделям для некоторых модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8.**

Графики иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «19b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-4» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).



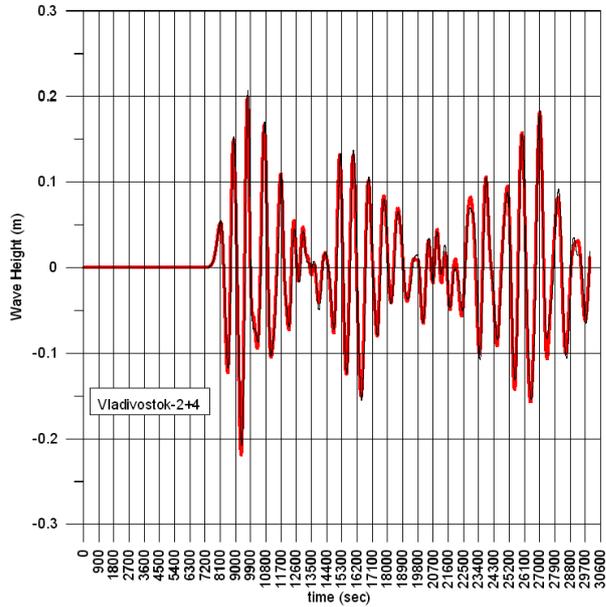
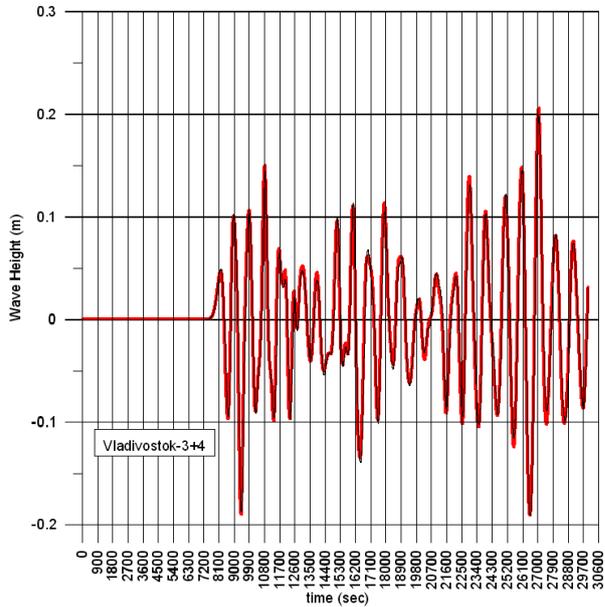
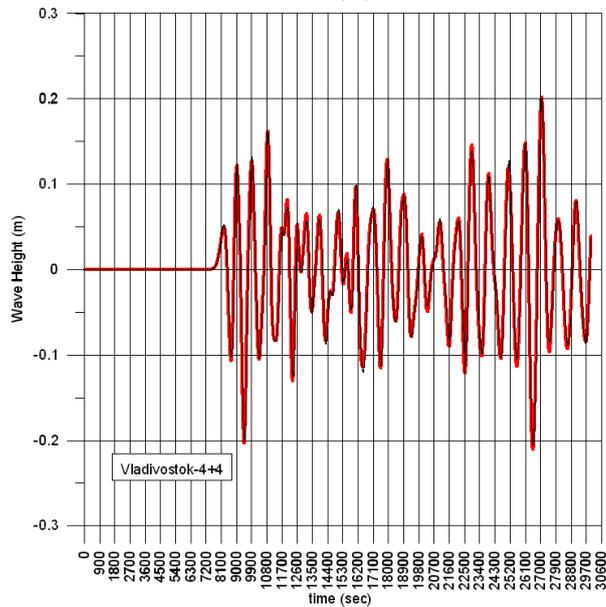
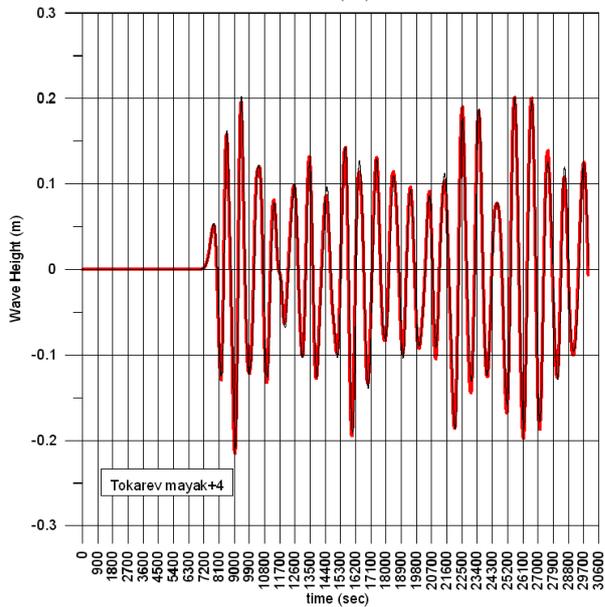
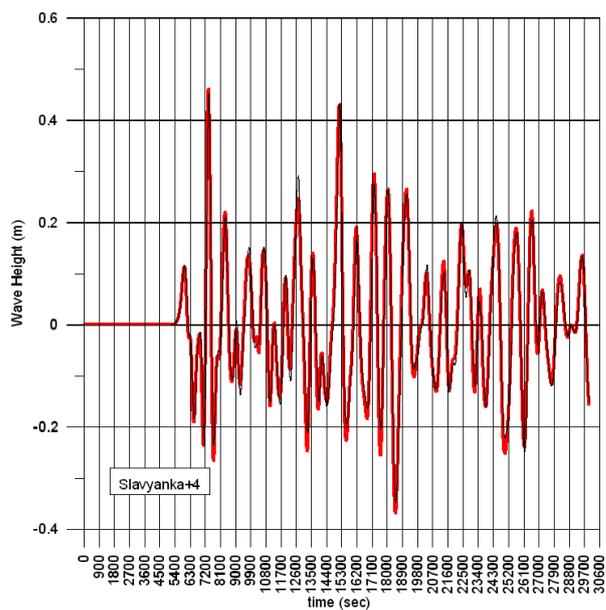
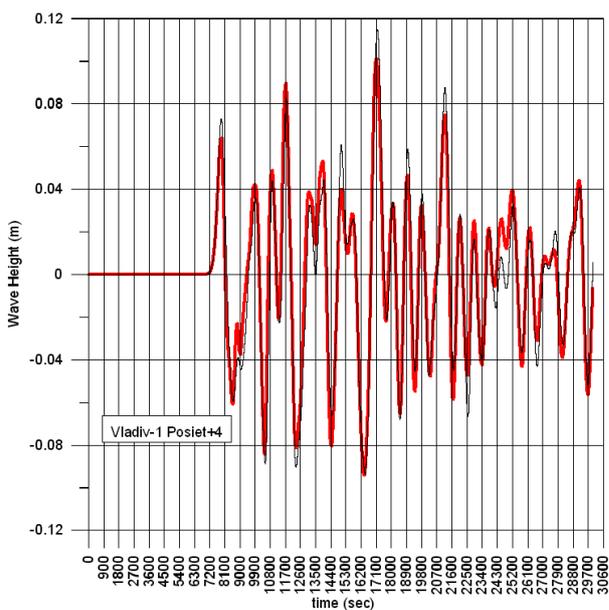


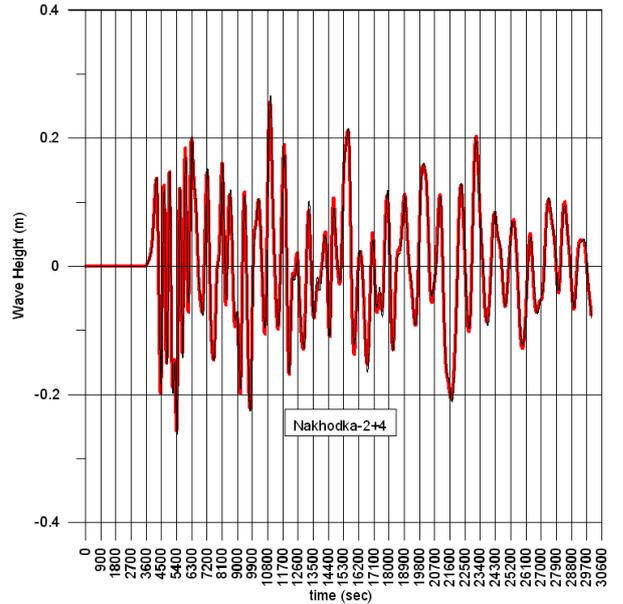
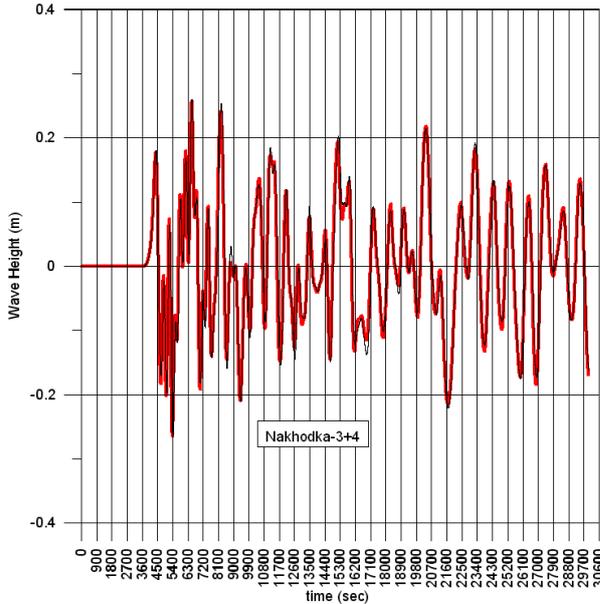
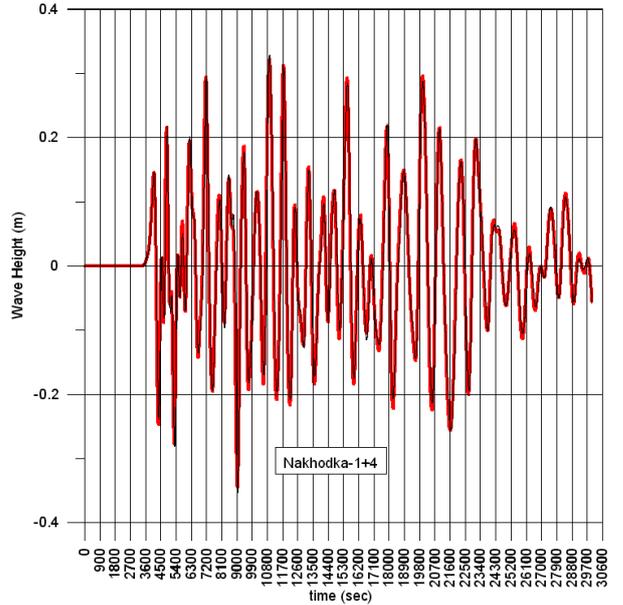
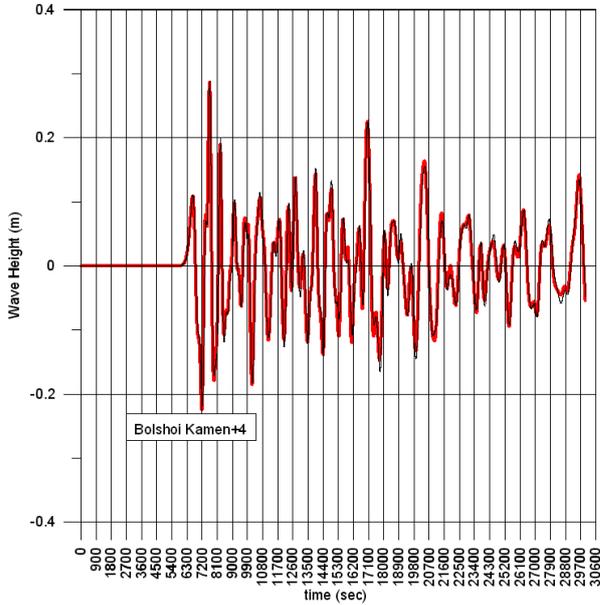
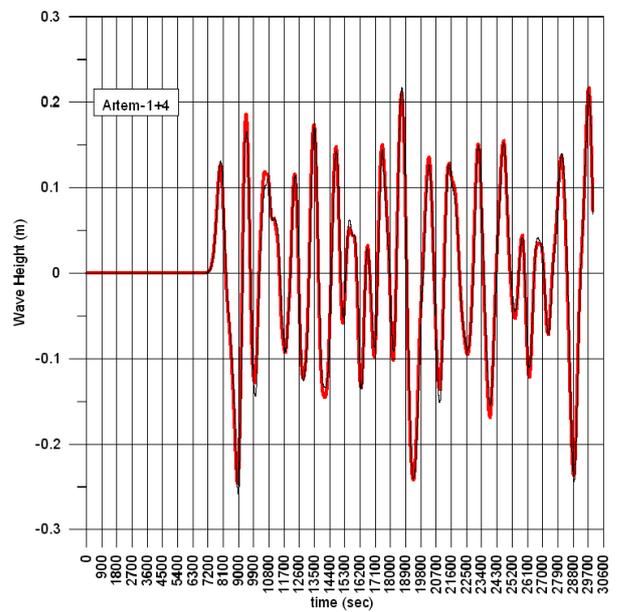
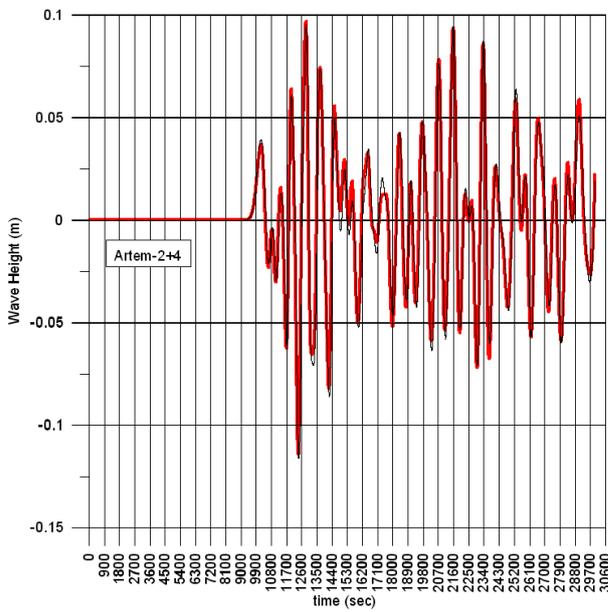


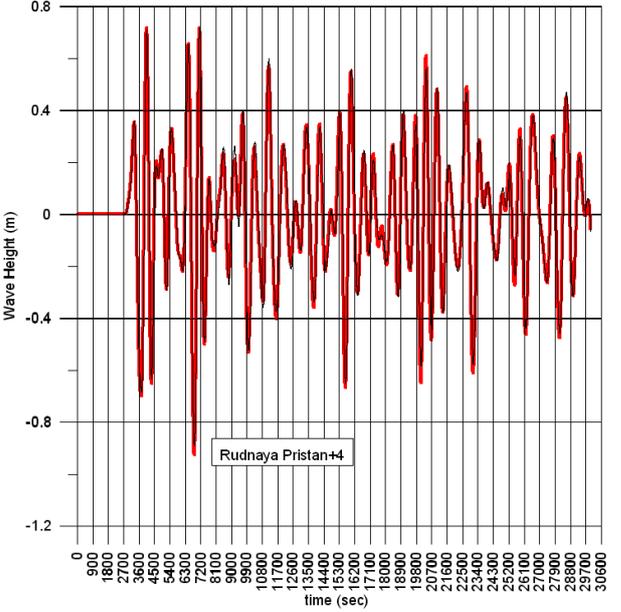
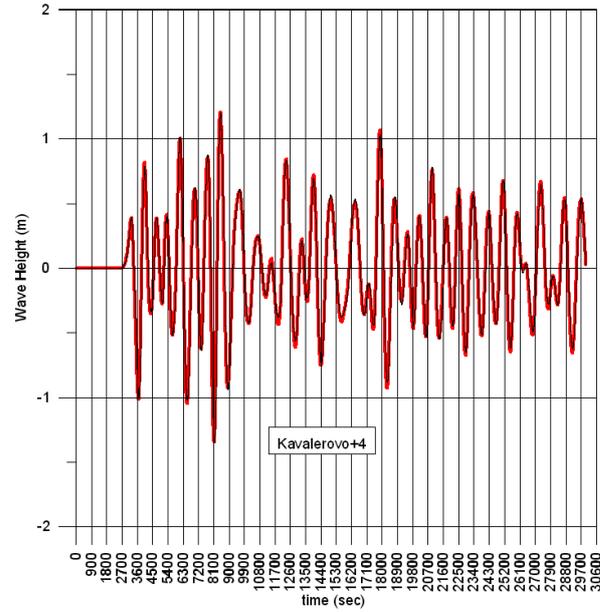
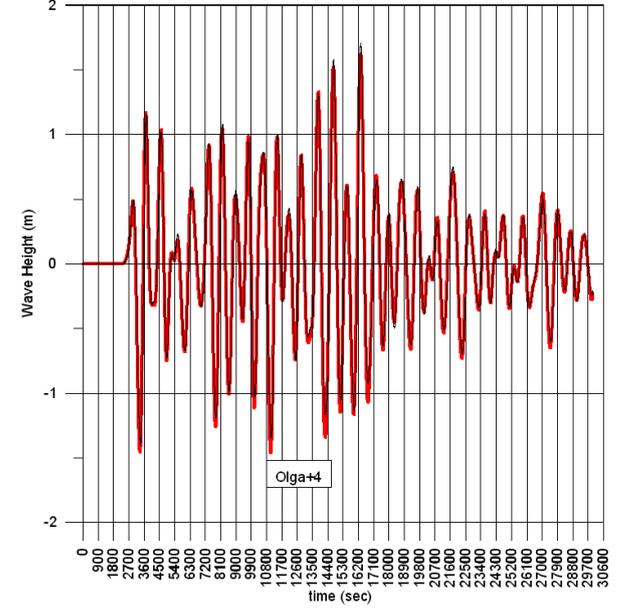
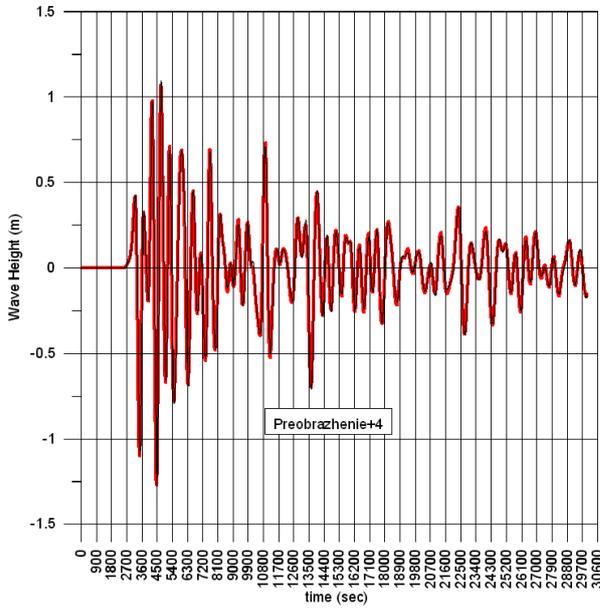
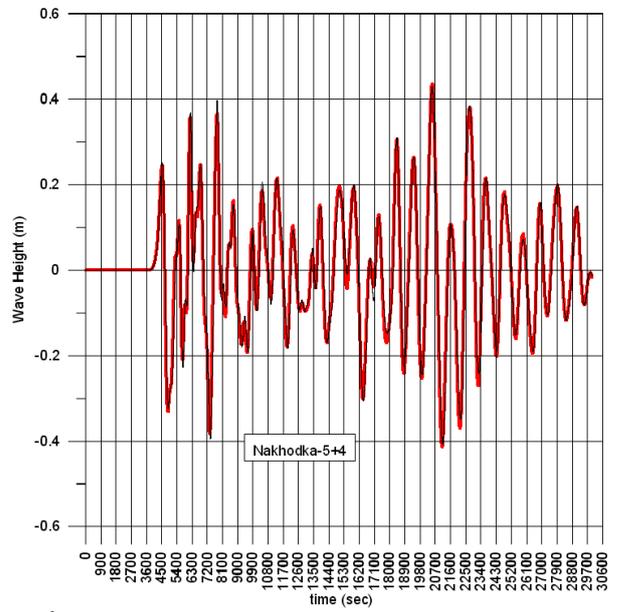
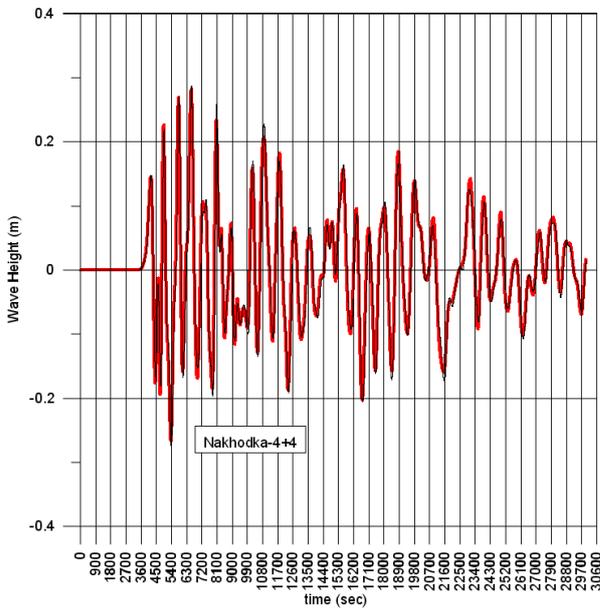


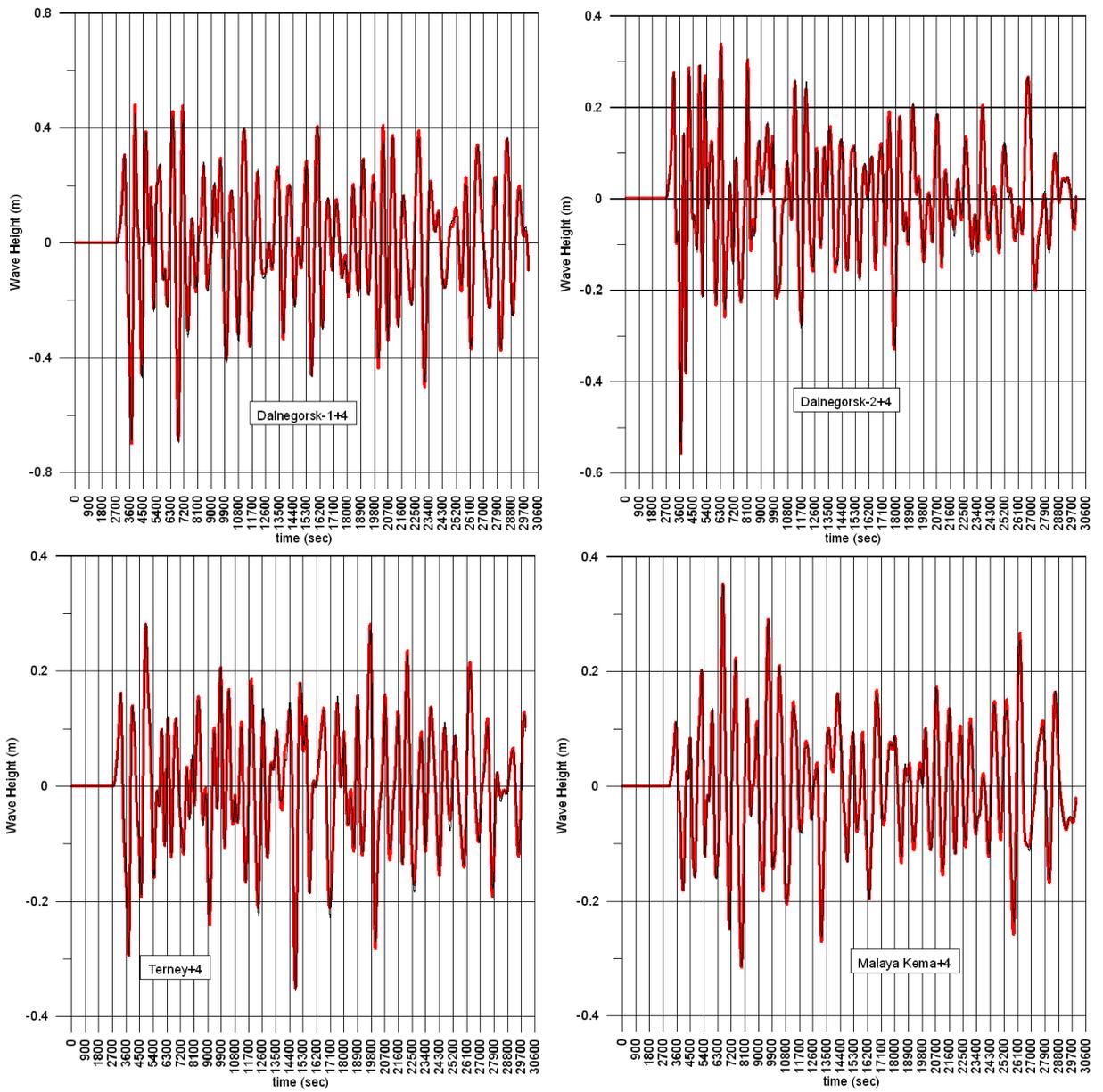
**Рисунок 4. Сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «19b» с магнитудой 7.8 в подбласти «78-4» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).**

Графики иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «28b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-4» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (**тонкие черные кривые**) и в линейной постановке (**жирные красные кривые**).



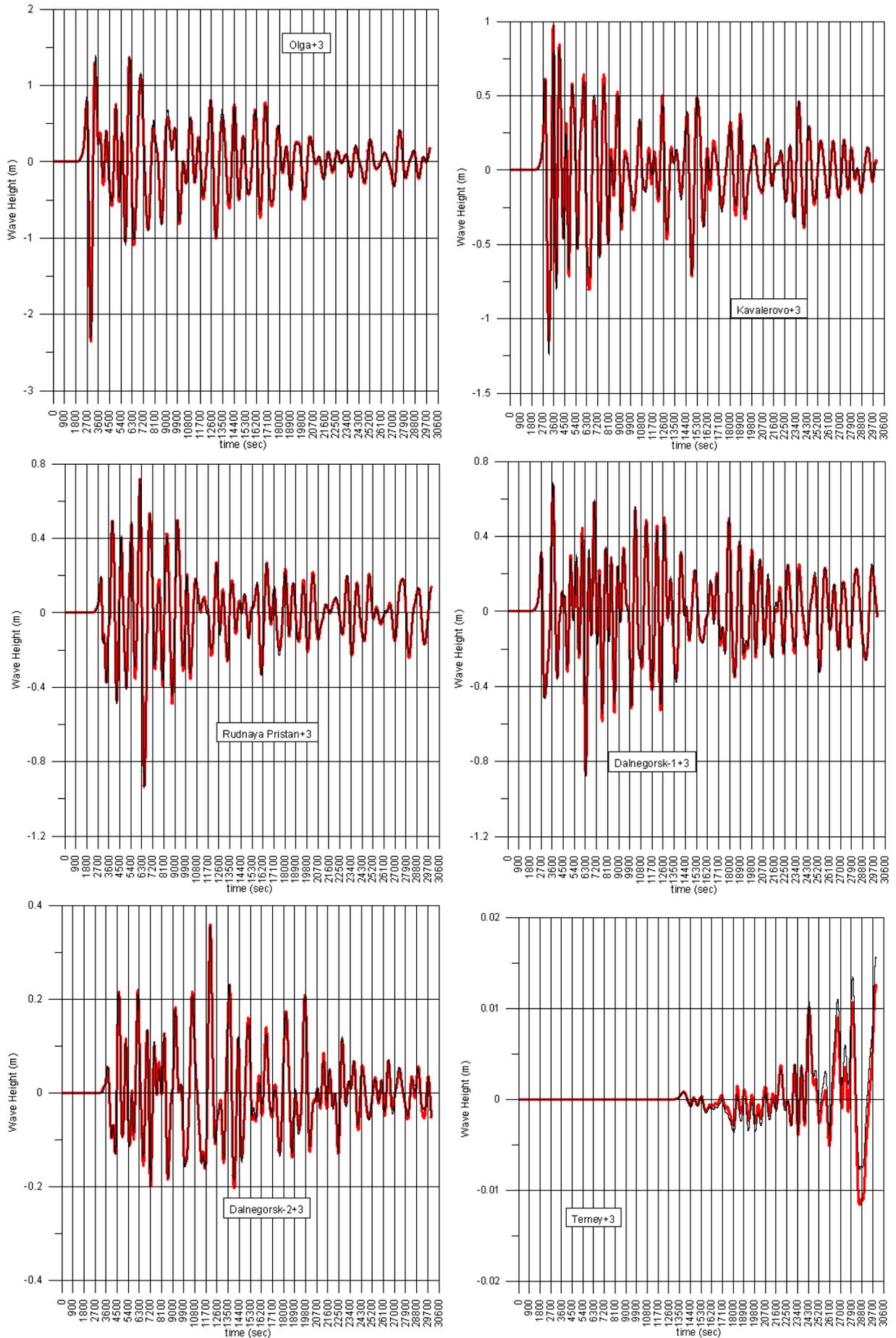


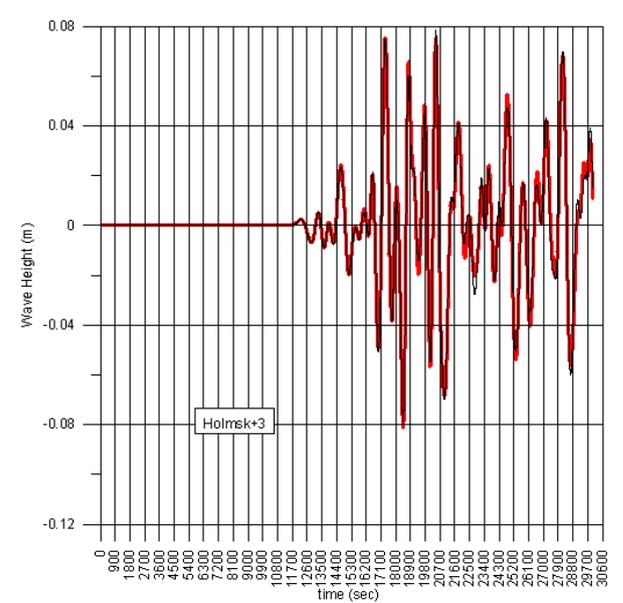
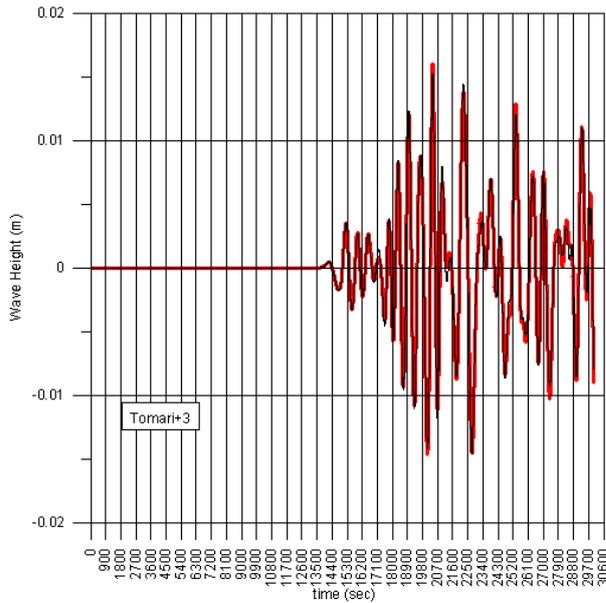
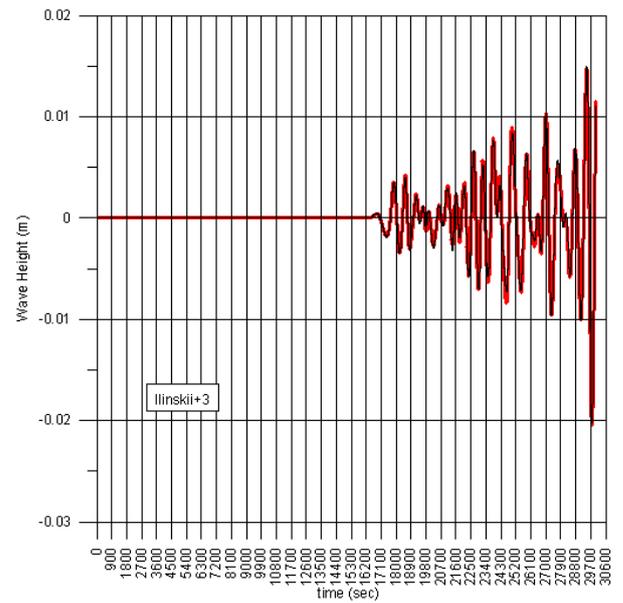
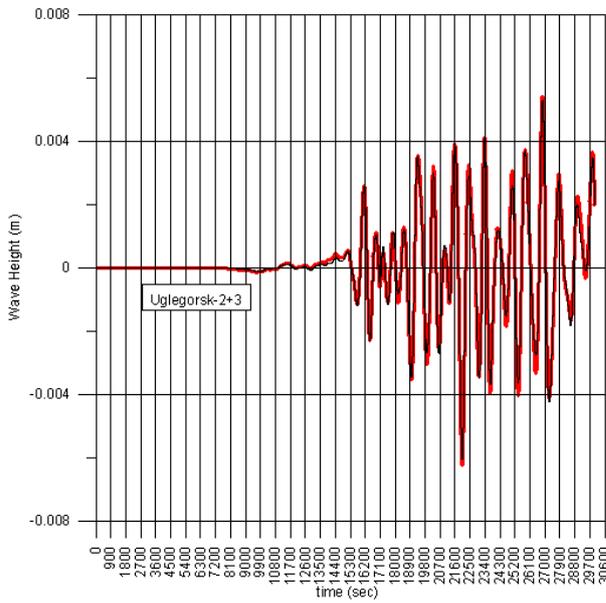
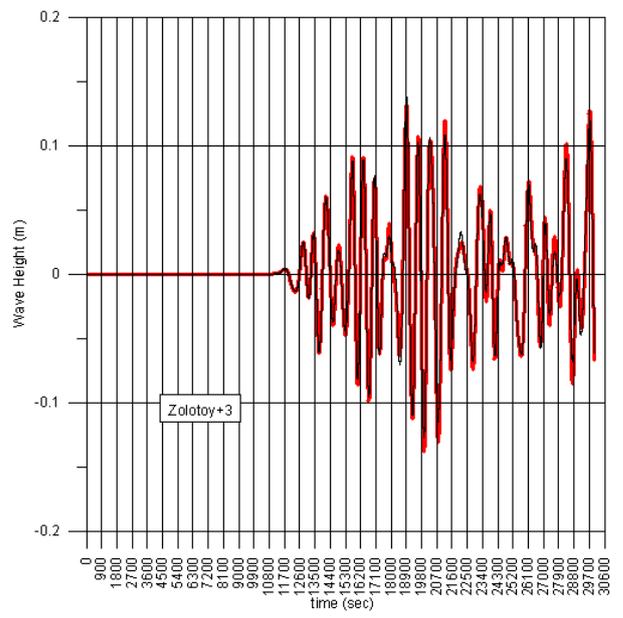
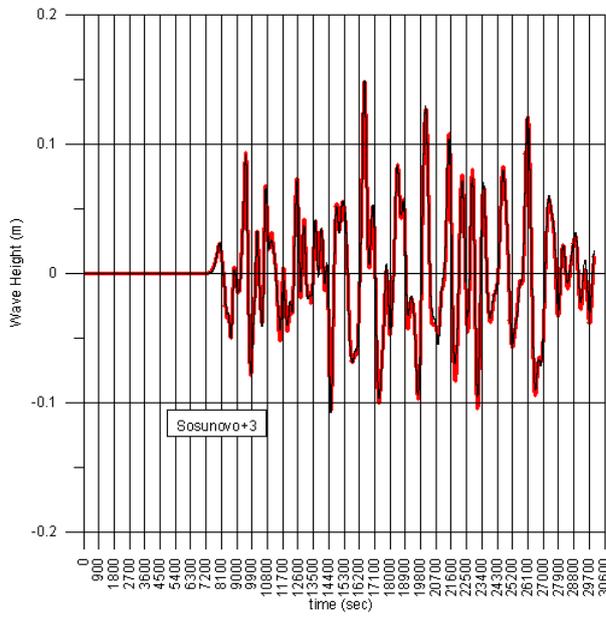


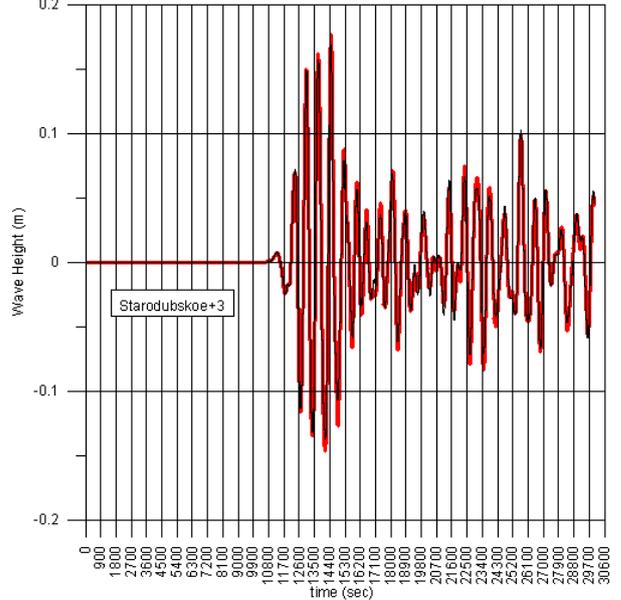
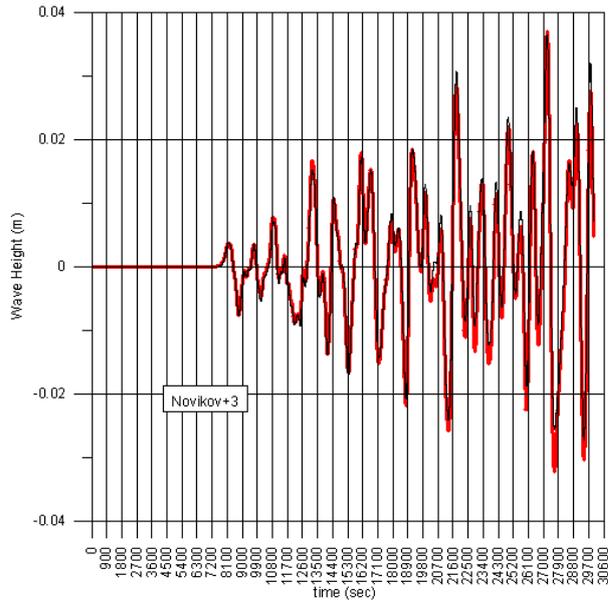
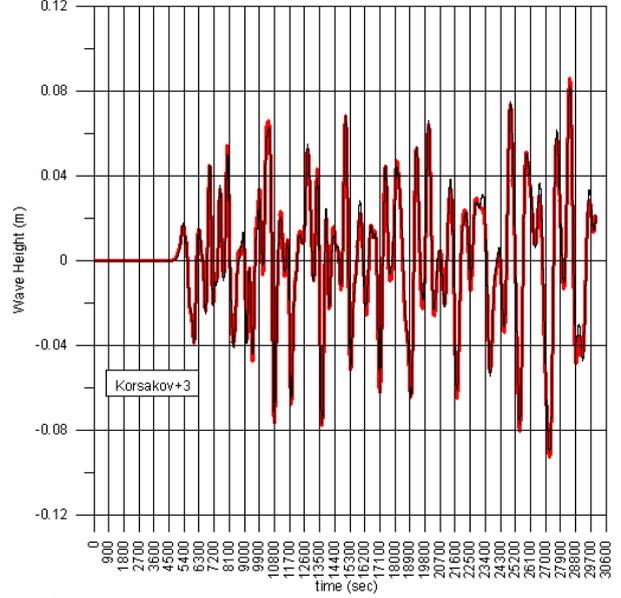
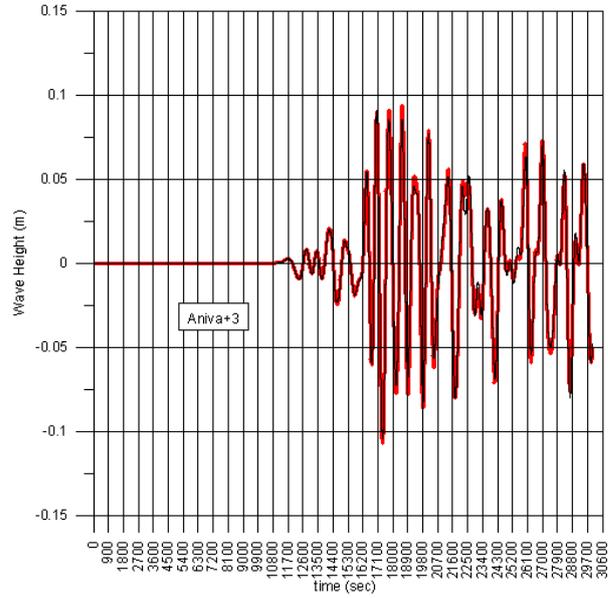
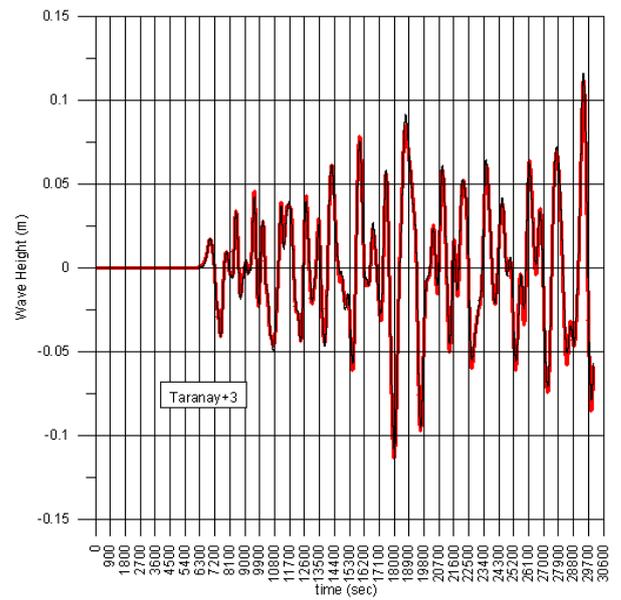
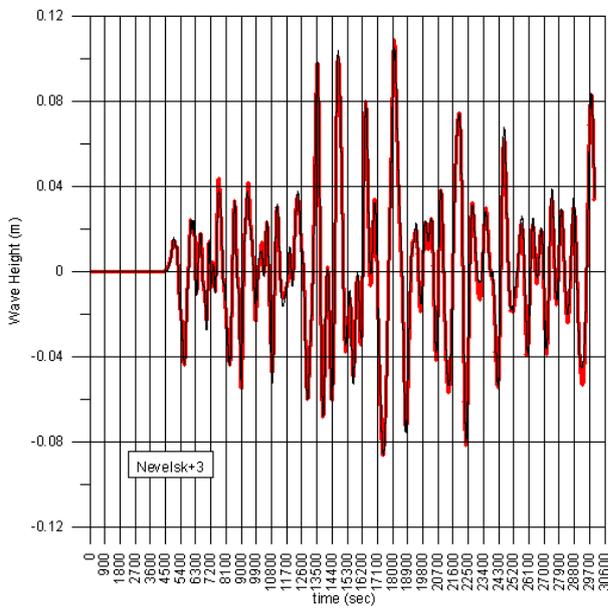


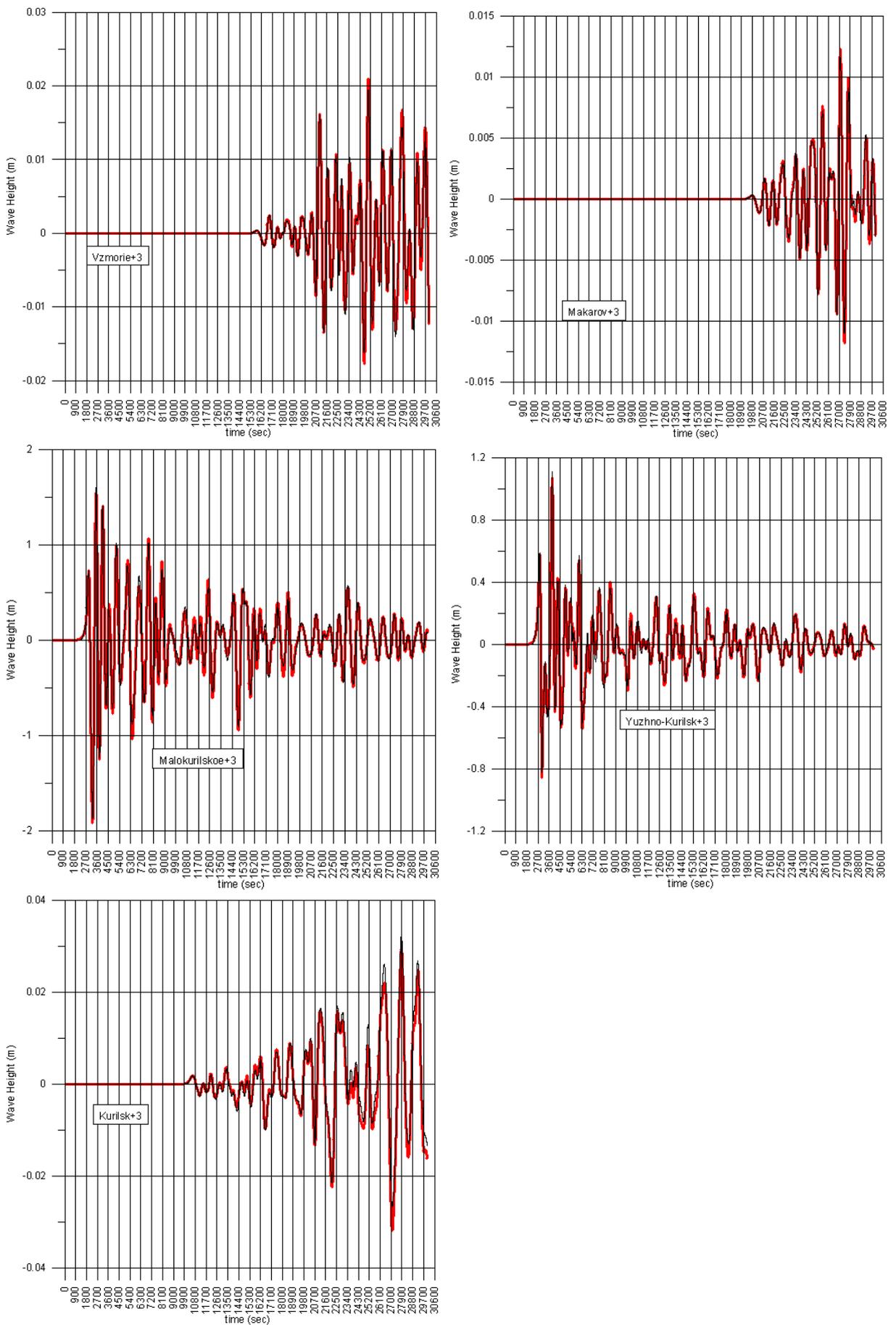
**Рисунок 5. Сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «28b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-4» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).**

Графики иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «29b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-3» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).



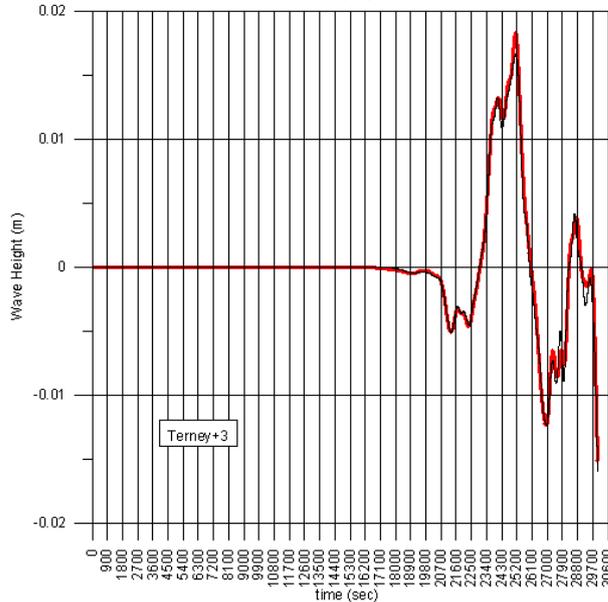
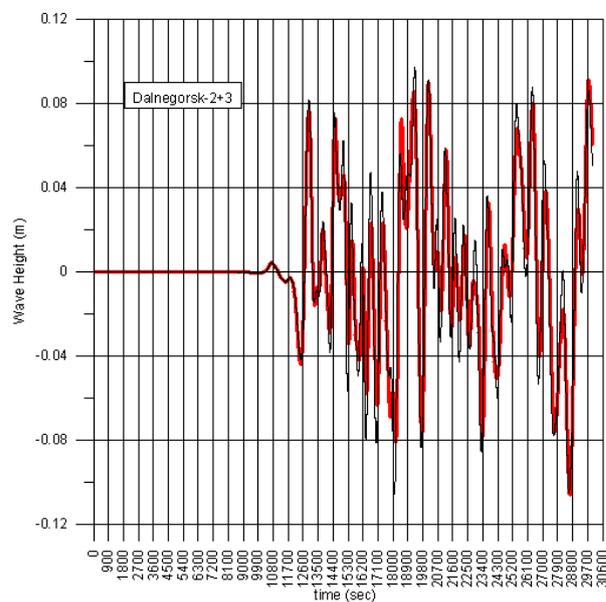
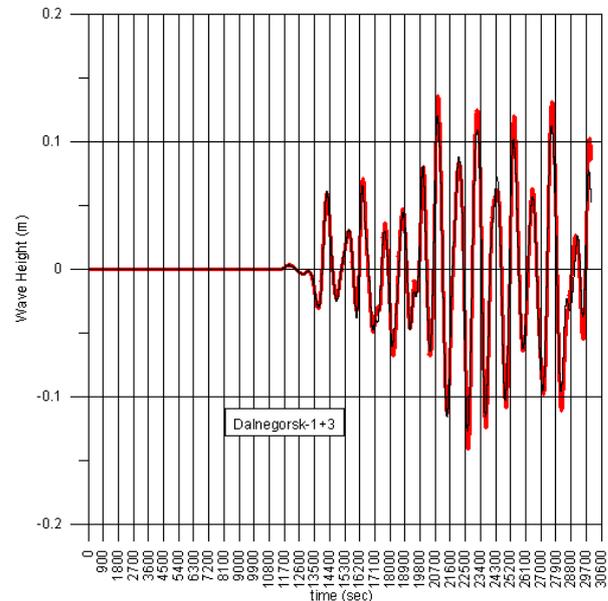
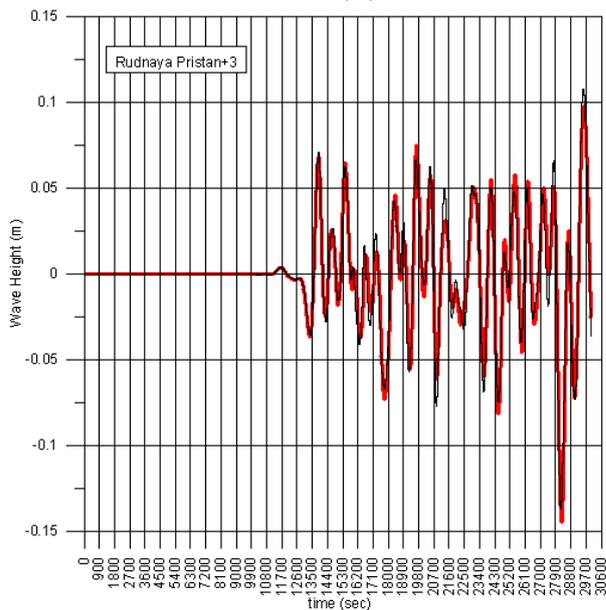
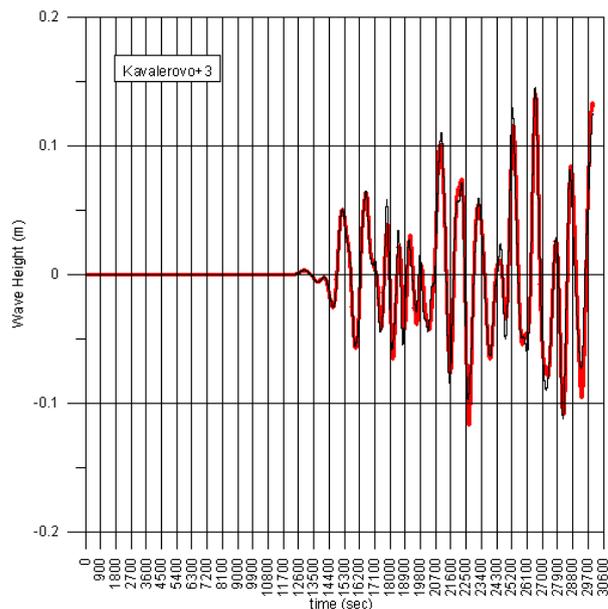
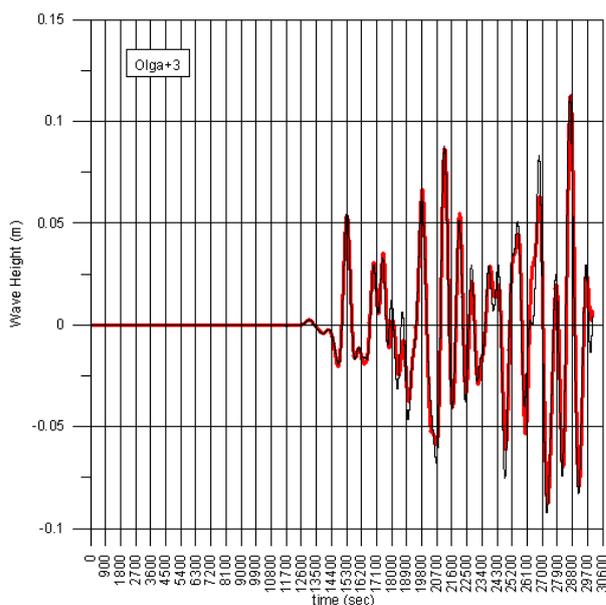


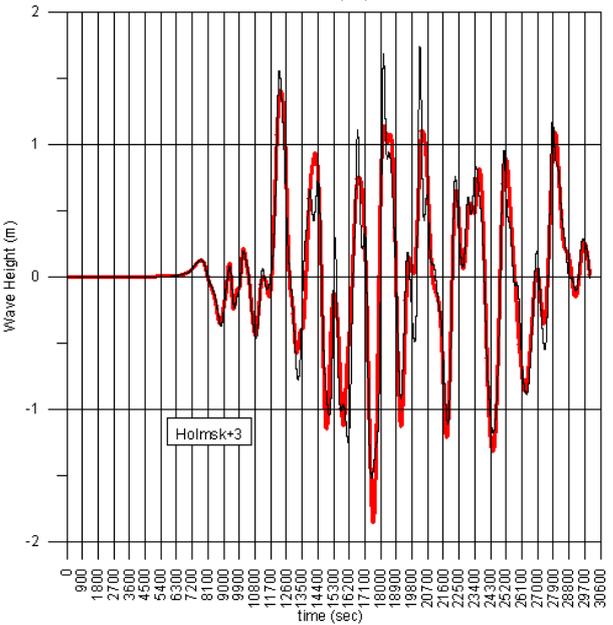
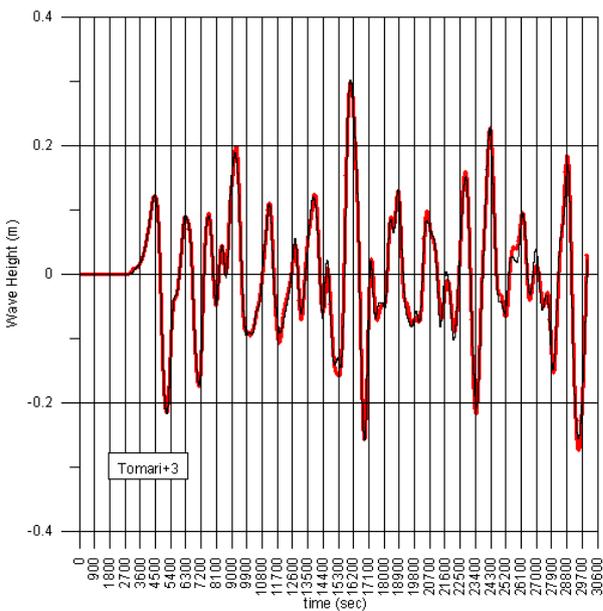
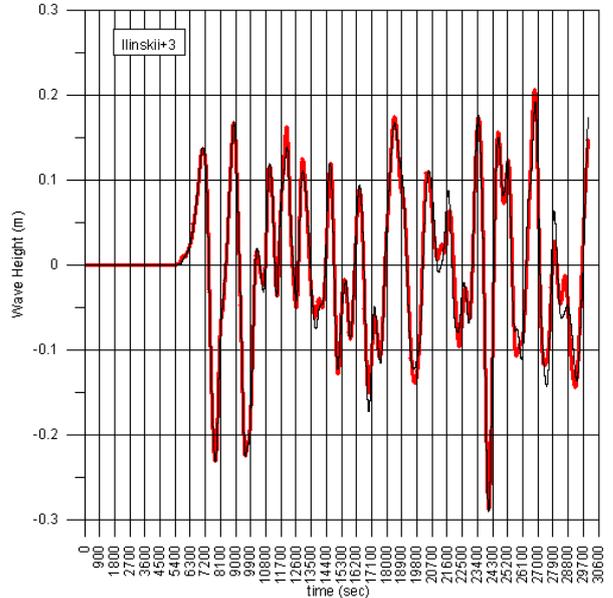
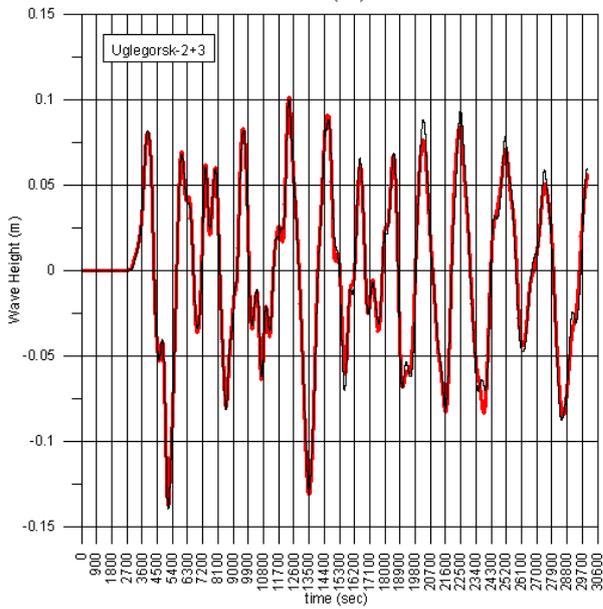
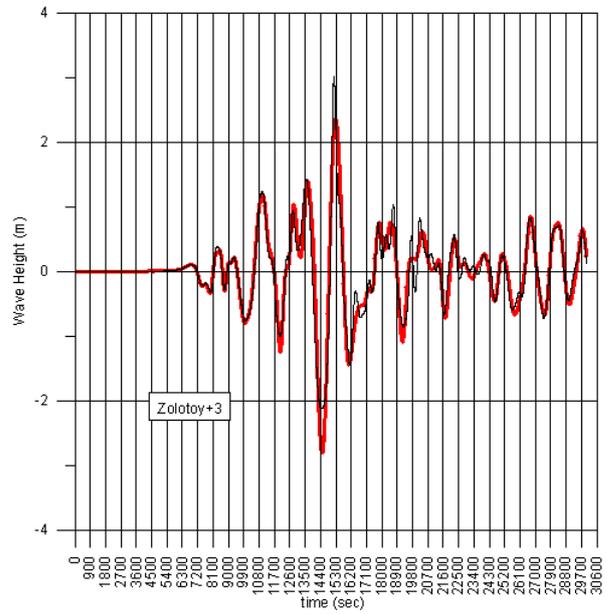
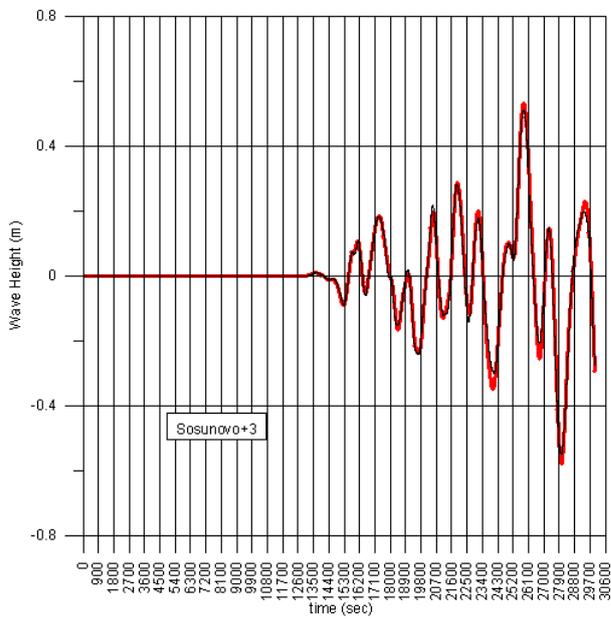


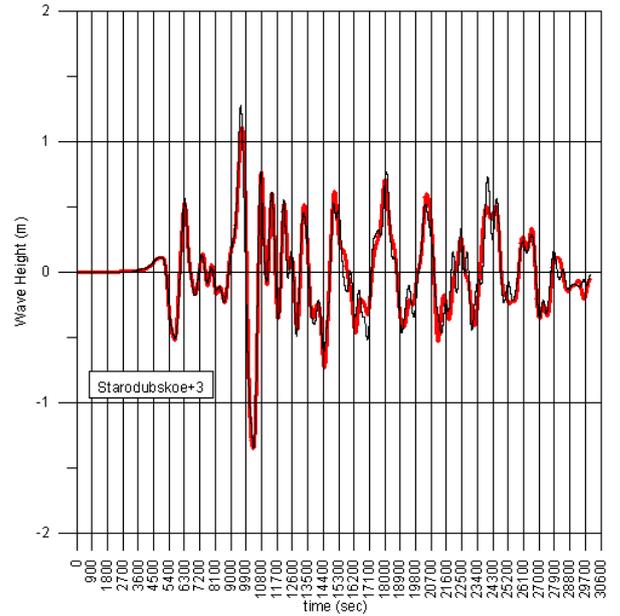
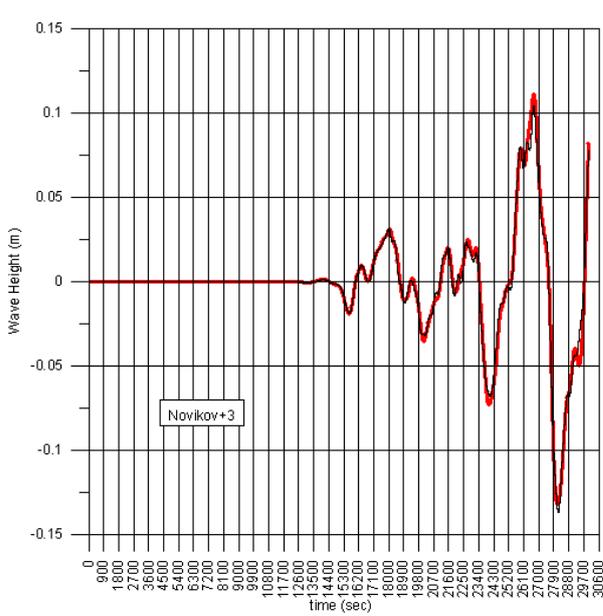
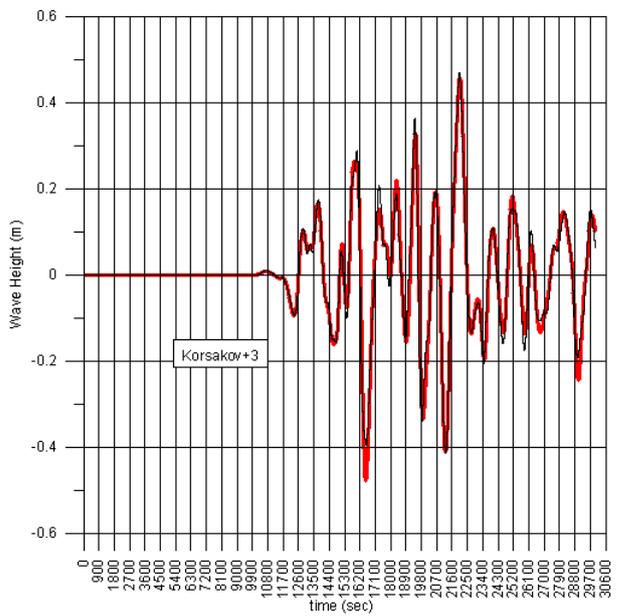
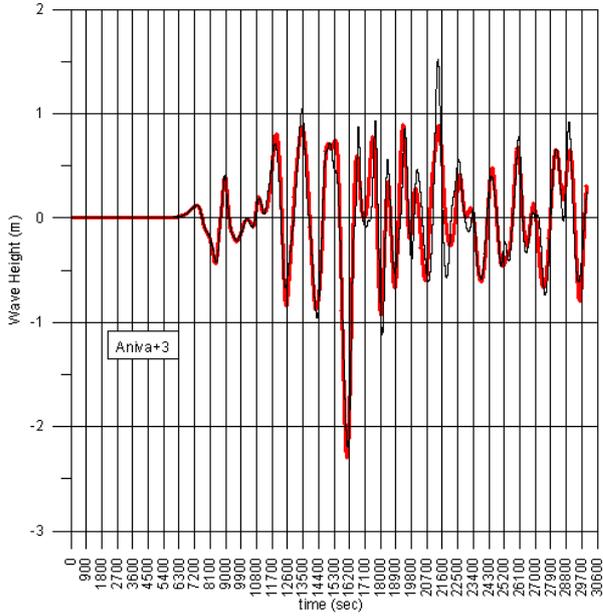
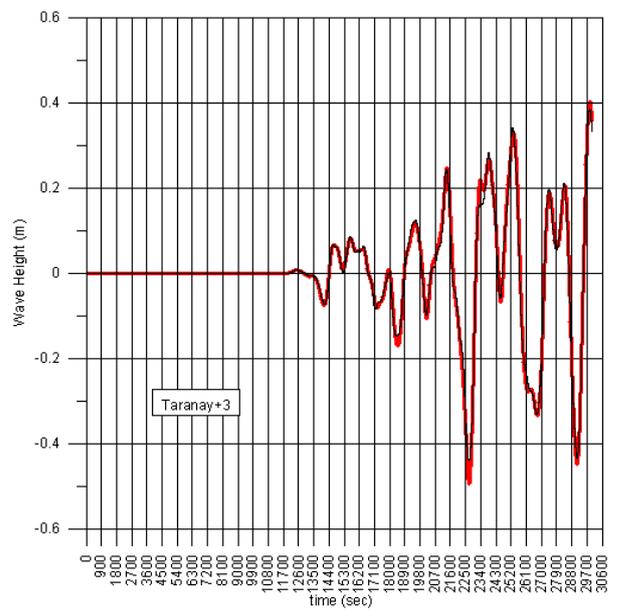
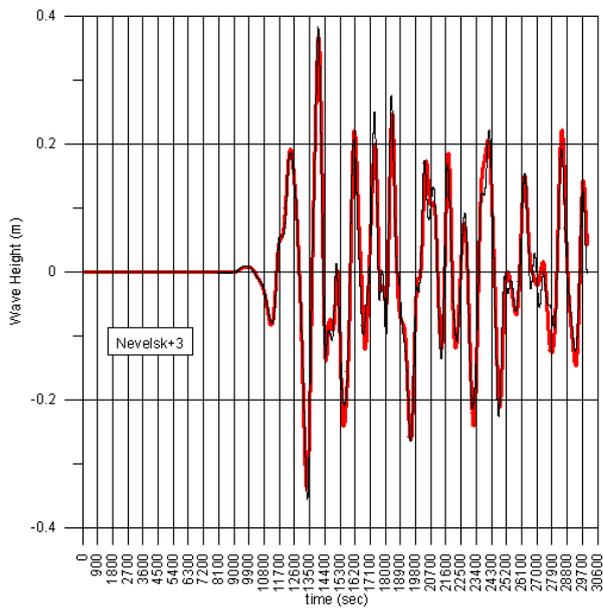


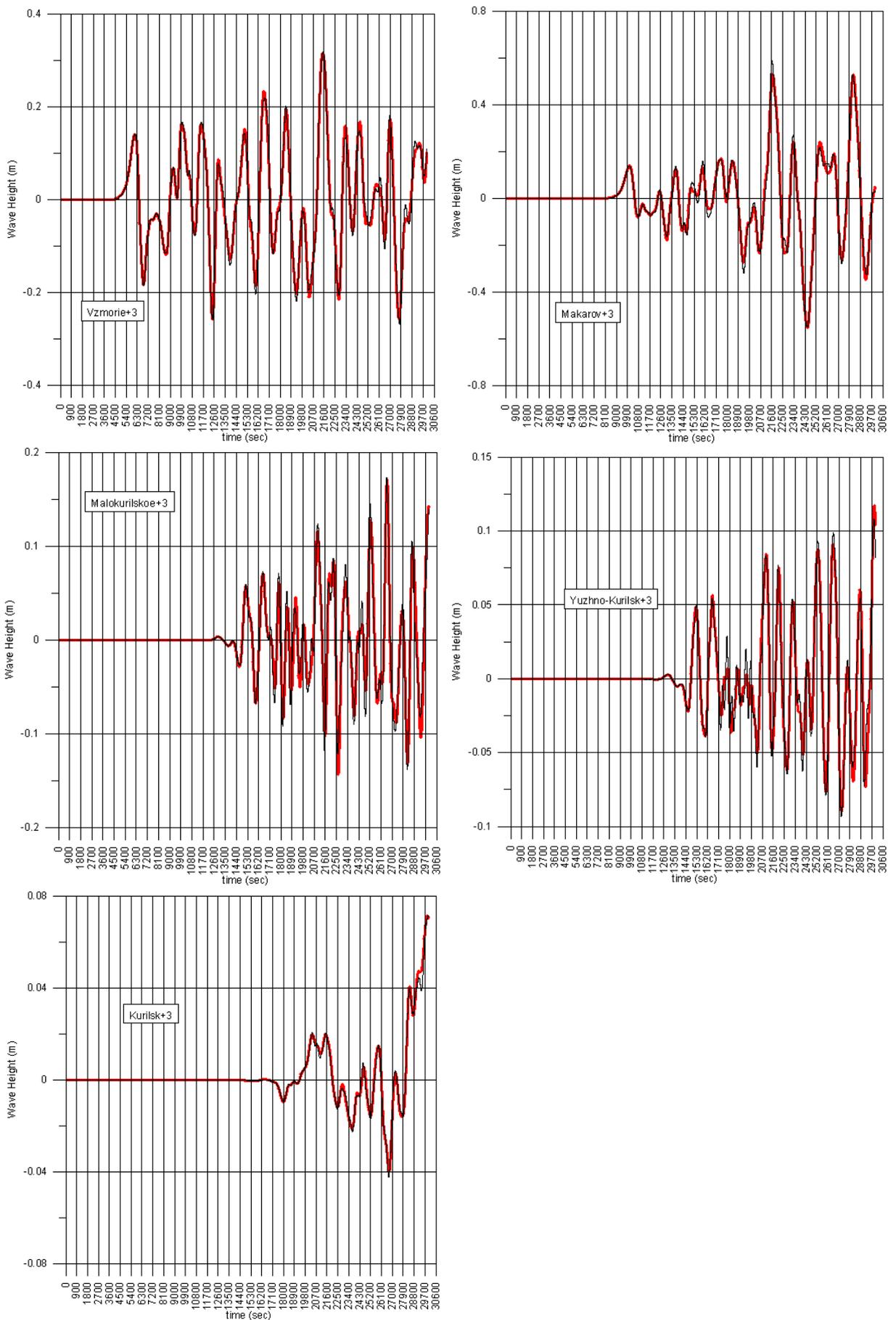
**Рисунок 6. Сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «29b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-3» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).**

Графики иллюстрируют сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «37b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-3» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).





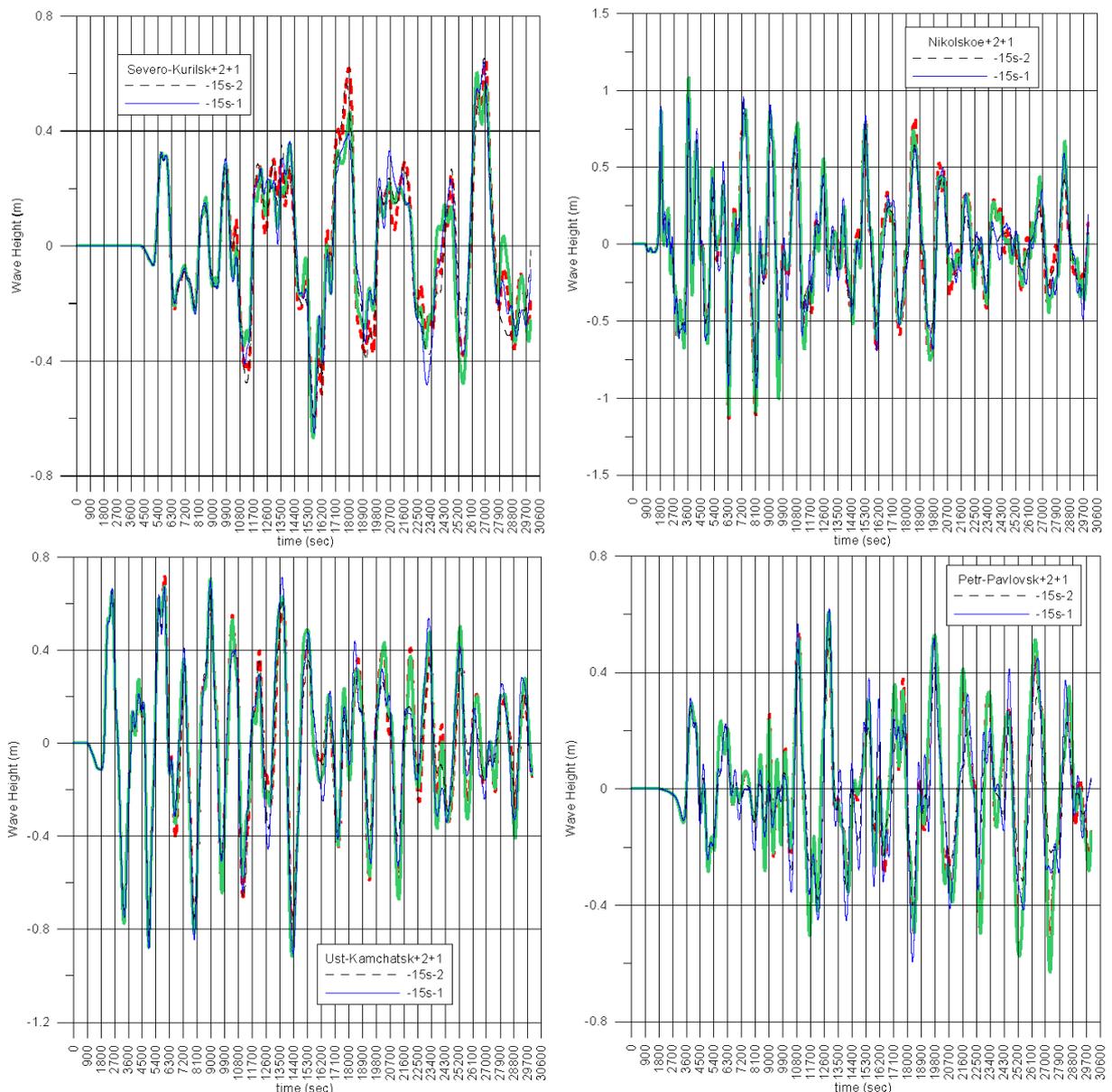


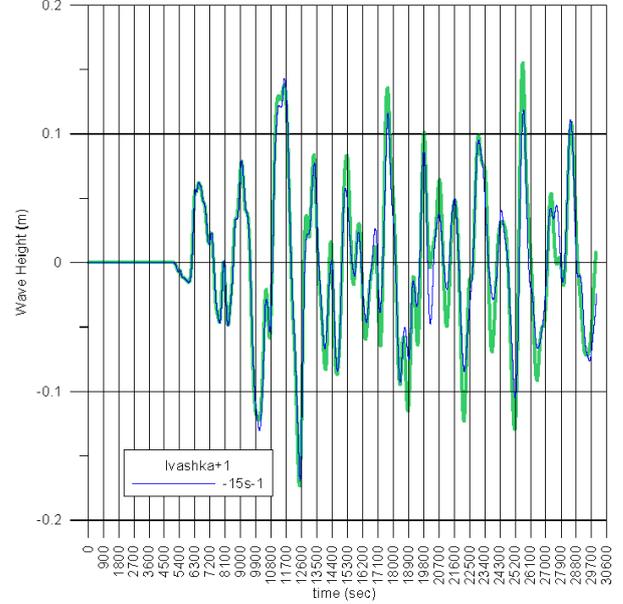
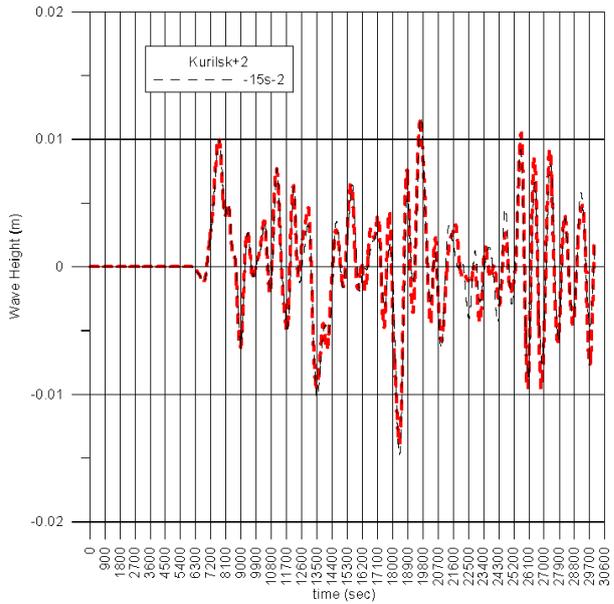
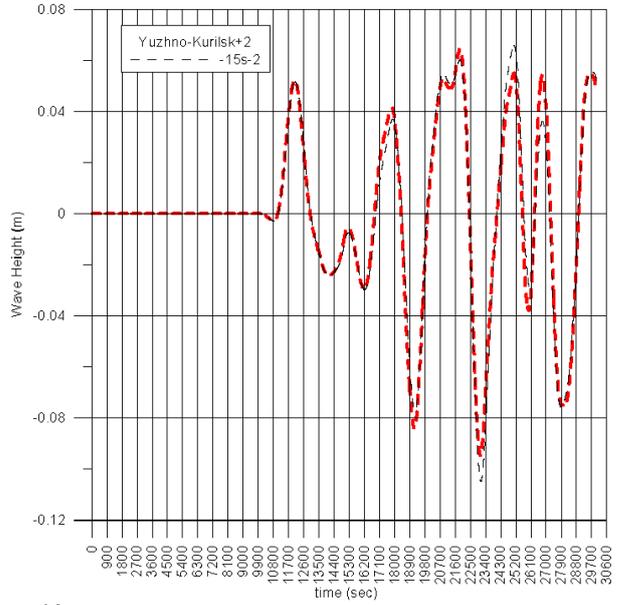
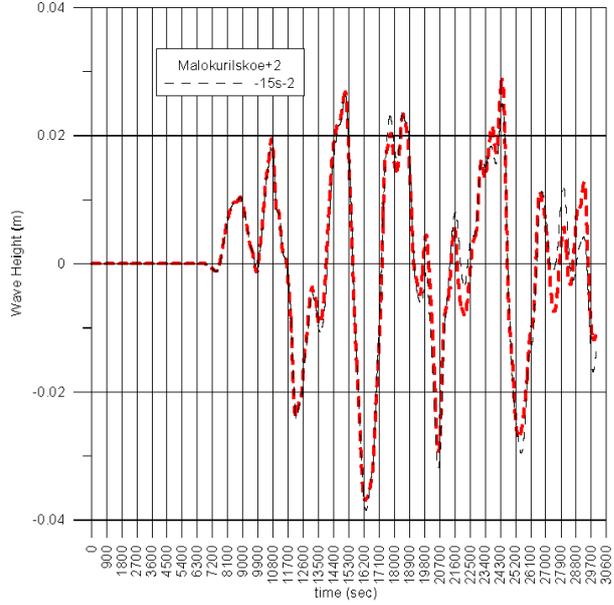
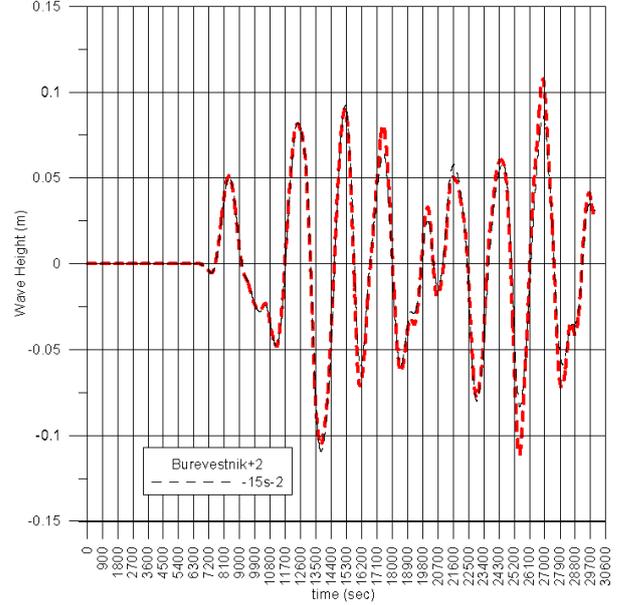
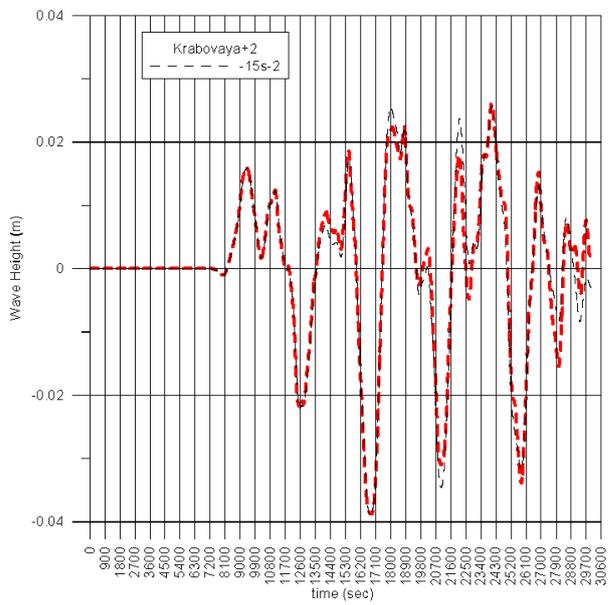


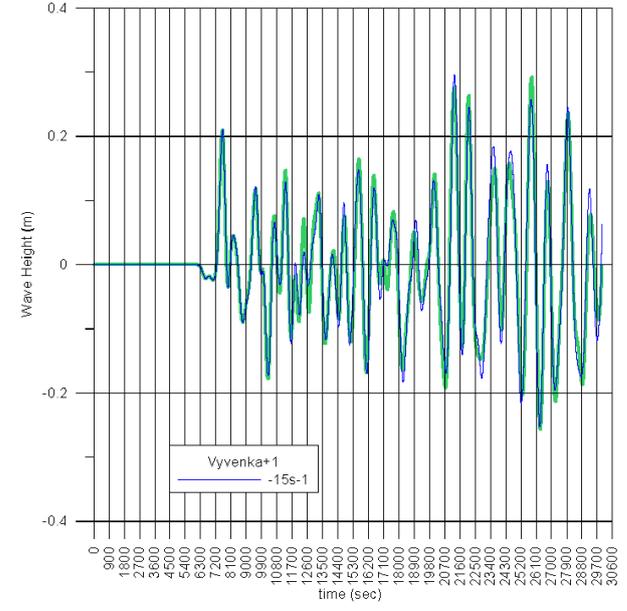
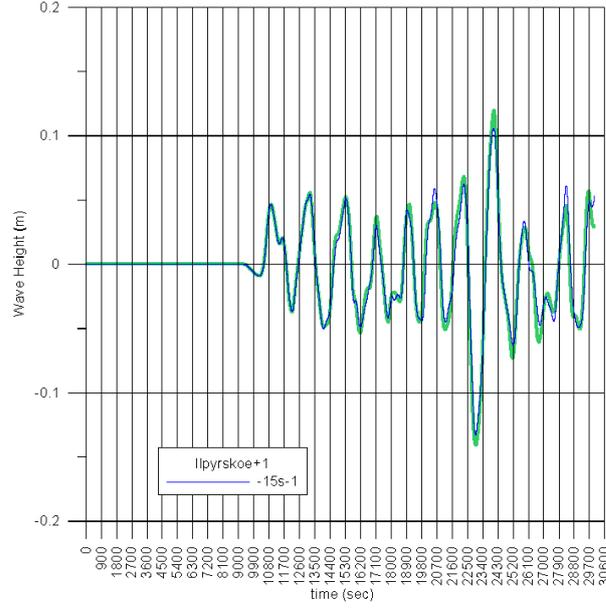
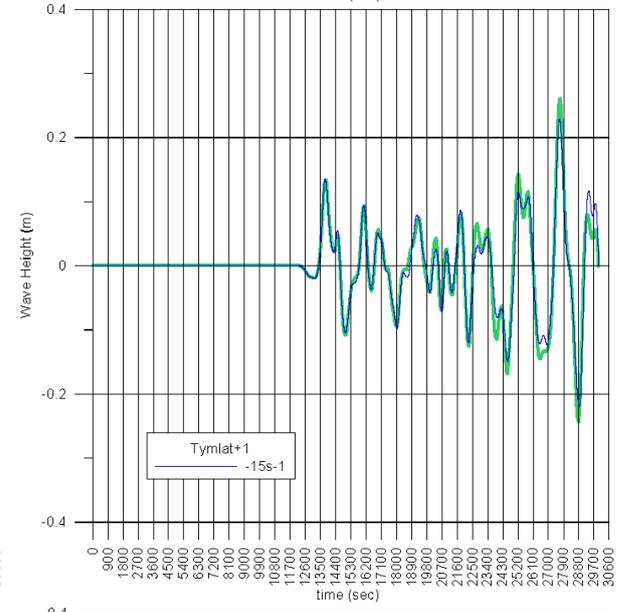
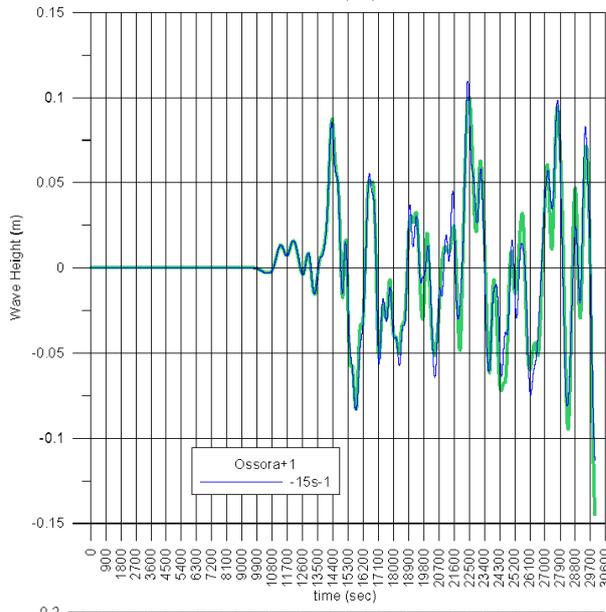
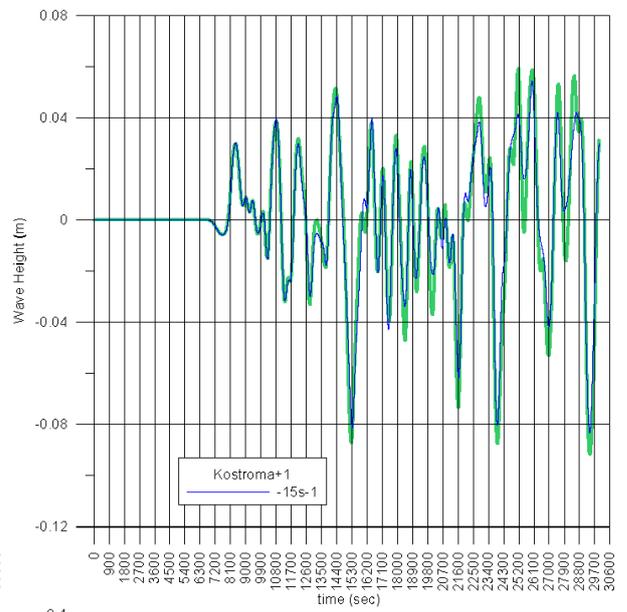
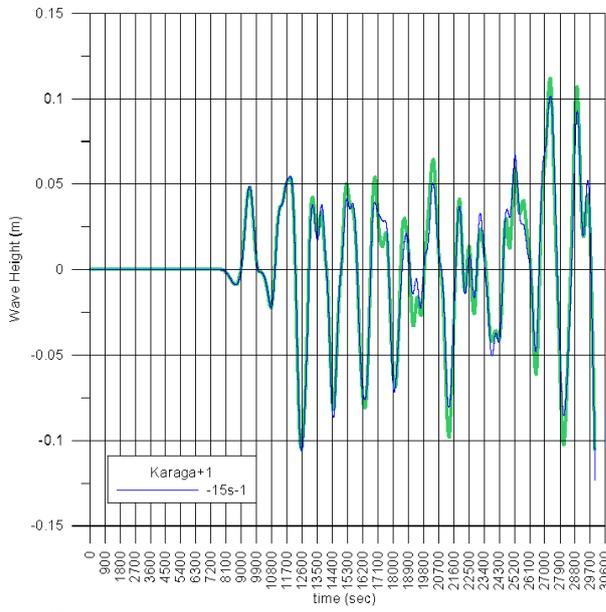
**Рисунок 7. Сравнение результатов расчетов распространения цунами от источника «37b» с магнитудой 7.8 в подобласти «78-3» на 15-секундной сетке с учетом нелинейности (тонкие черные кривые) и в линейной постановке (жирные красные кривые).**

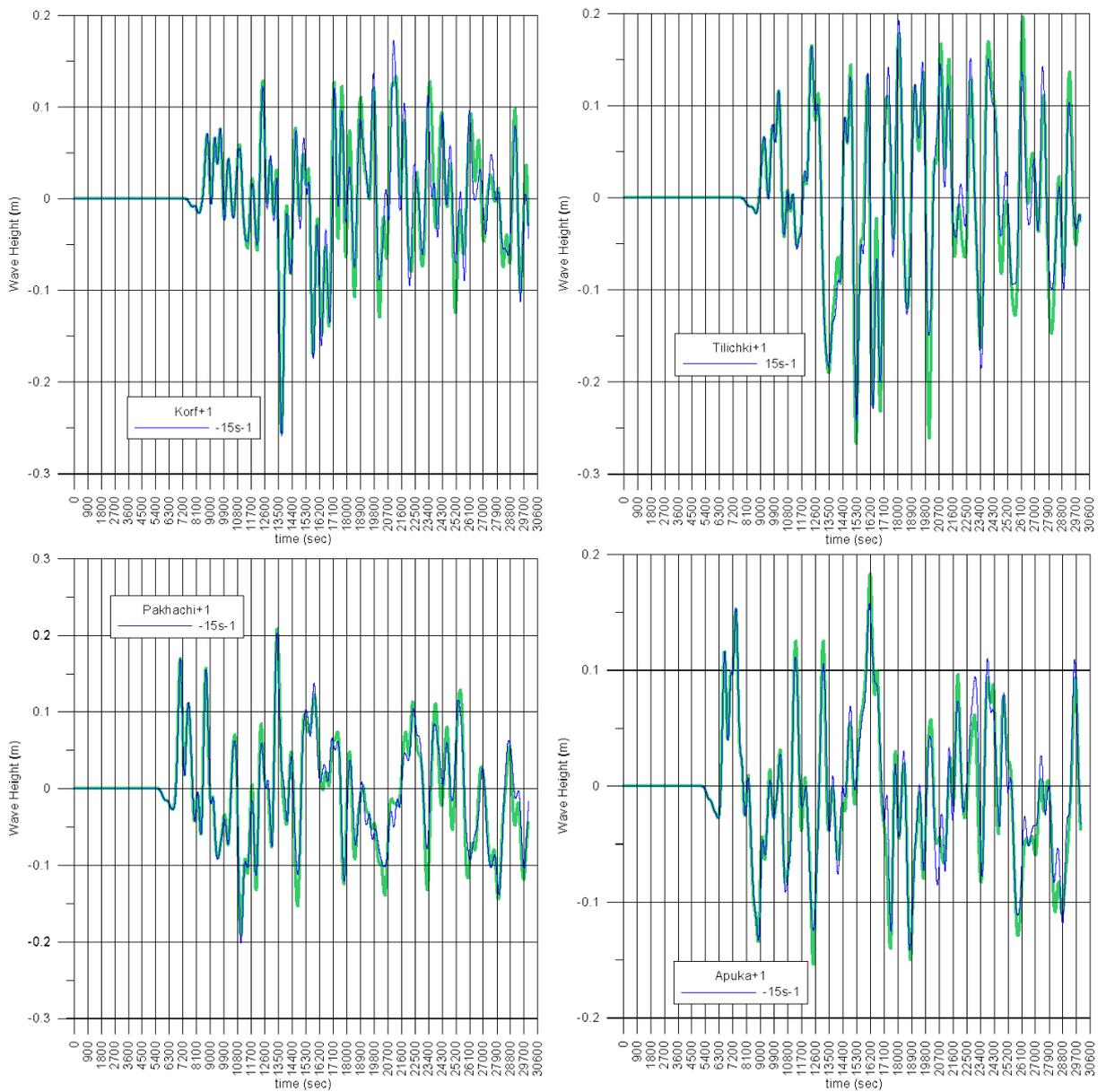
**Сравнение результатов расчетов по нелинейной и линейной моделям, вычисленных для некоторых модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4 в частично перекрывающихся подобластях.**

Графики (Рисунок 8) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «2b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**



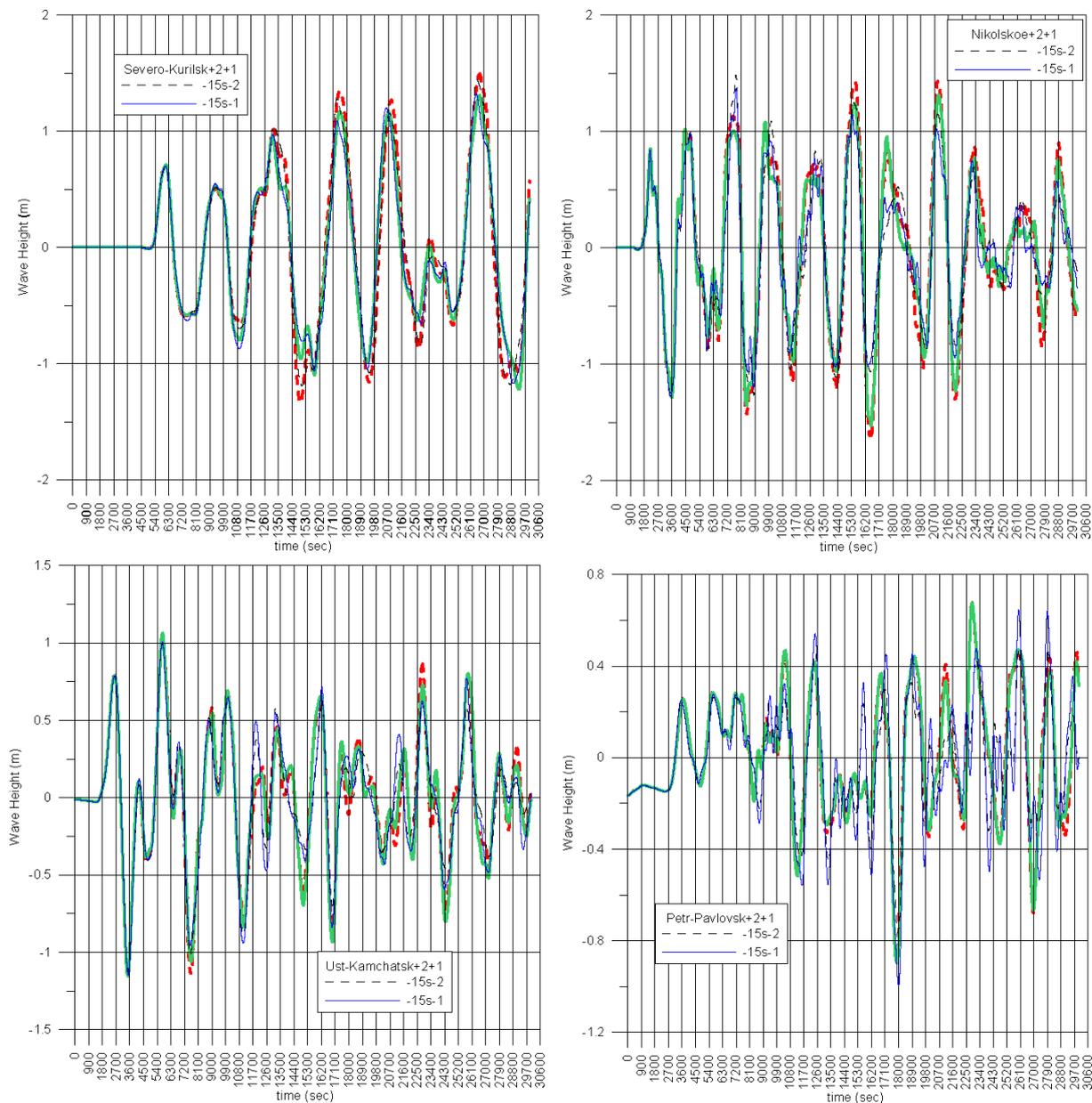


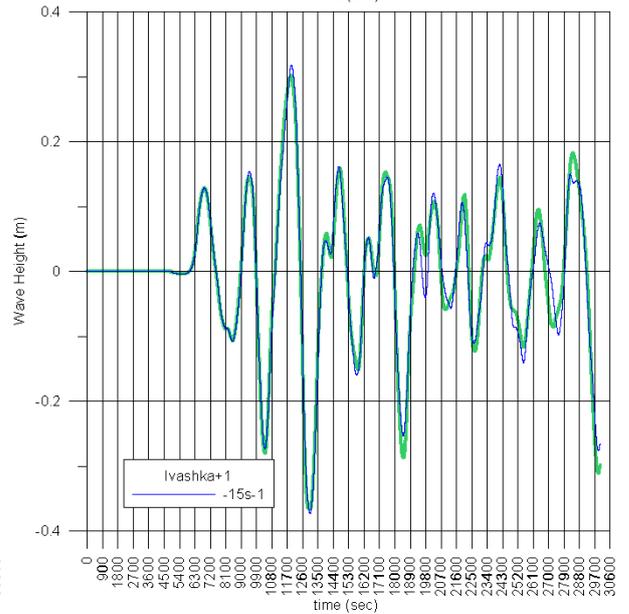
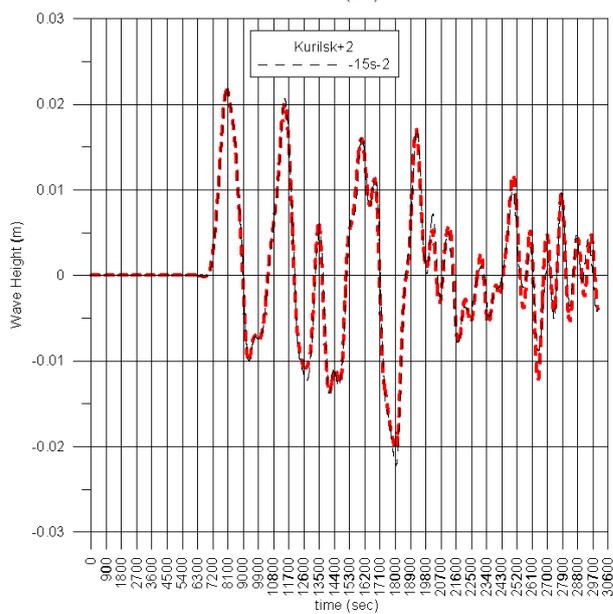
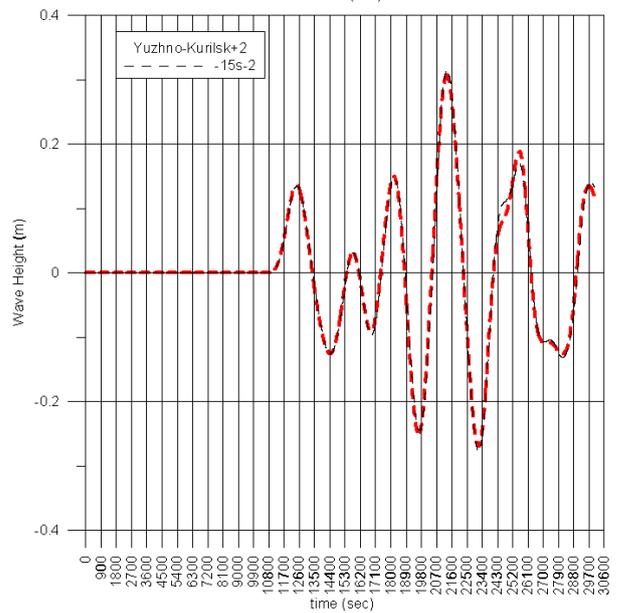
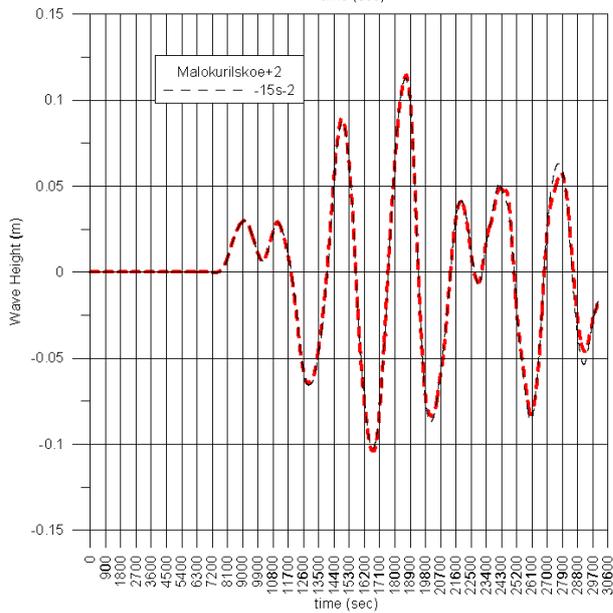
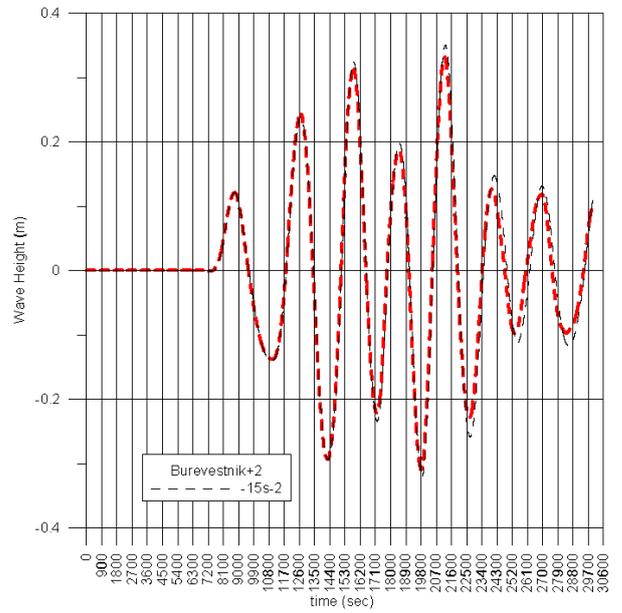
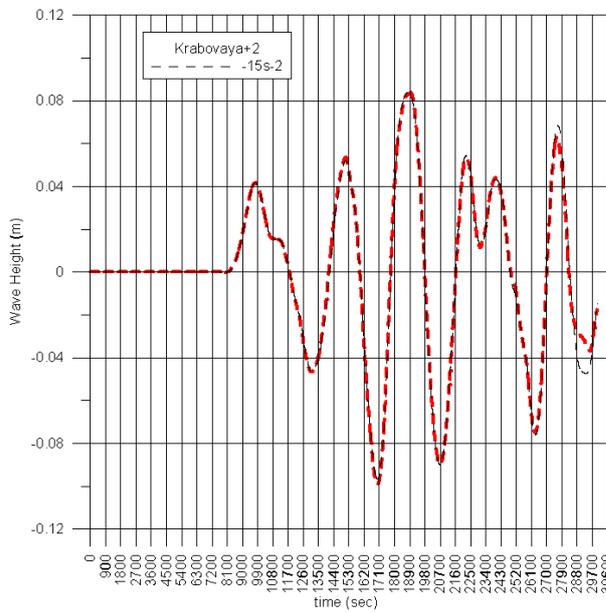


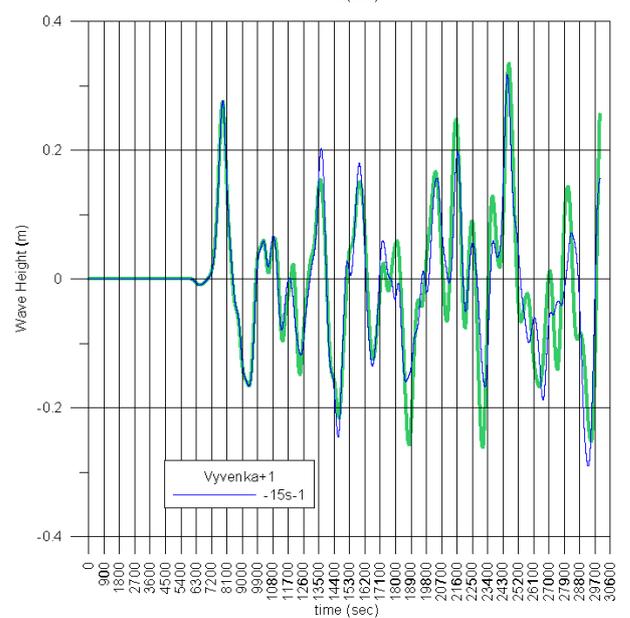
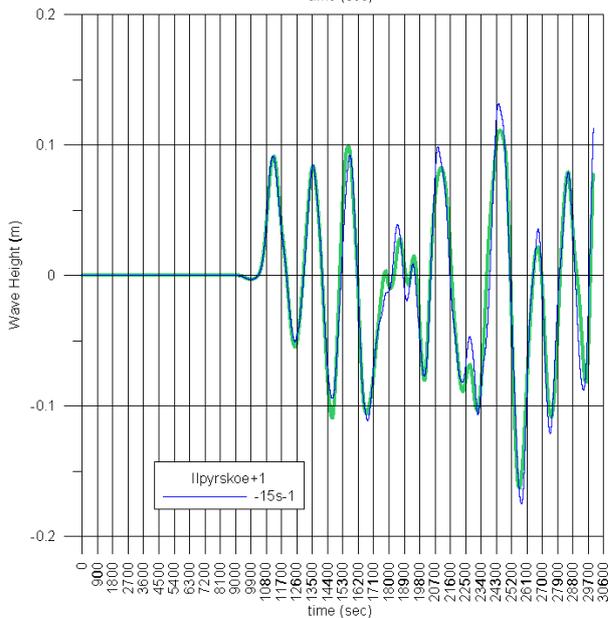
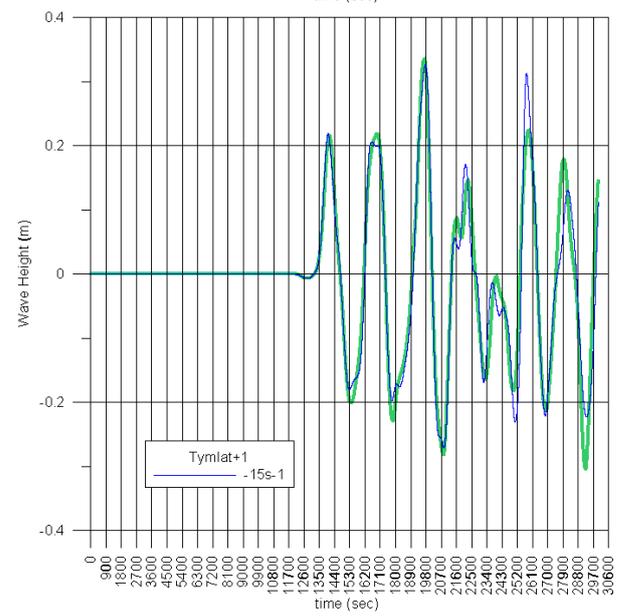
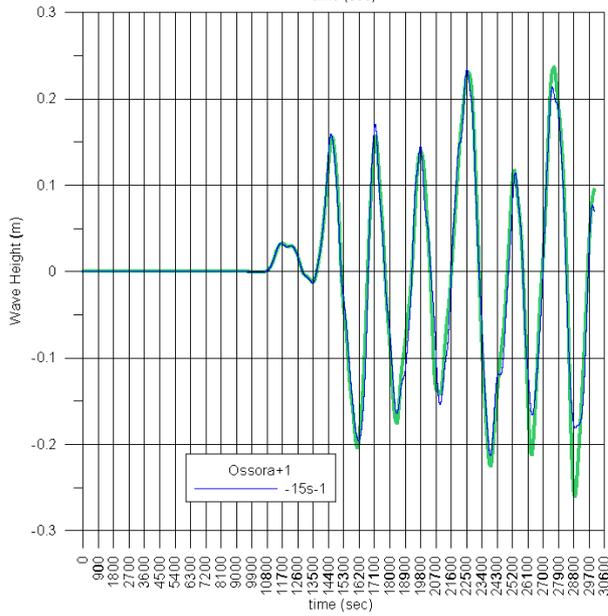
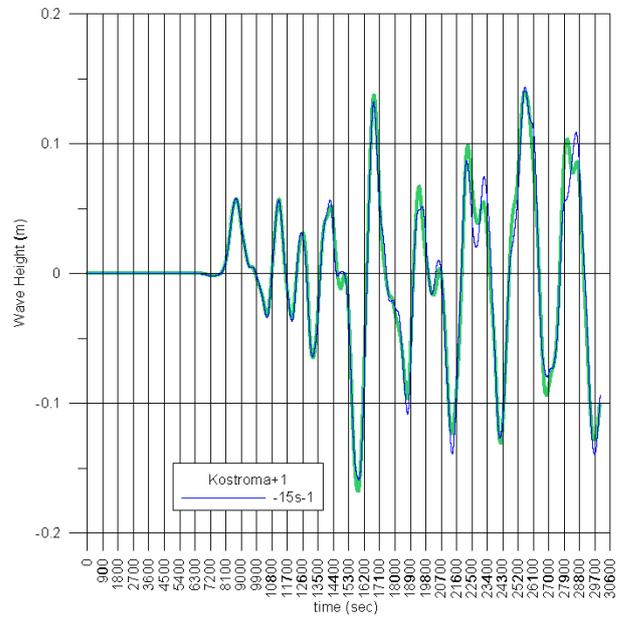
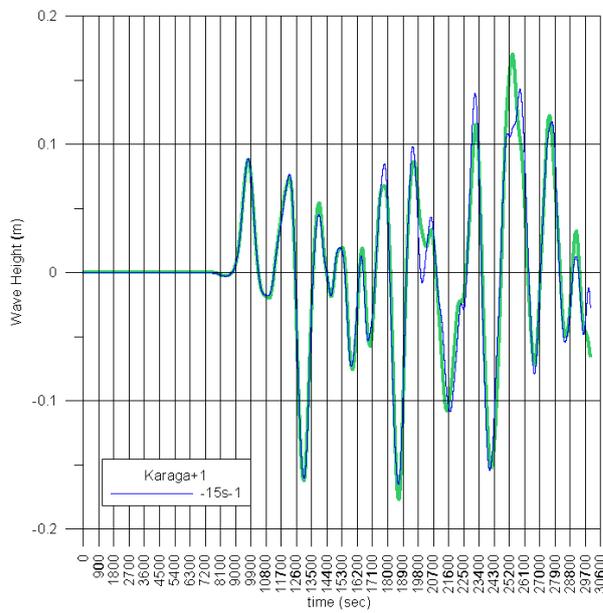


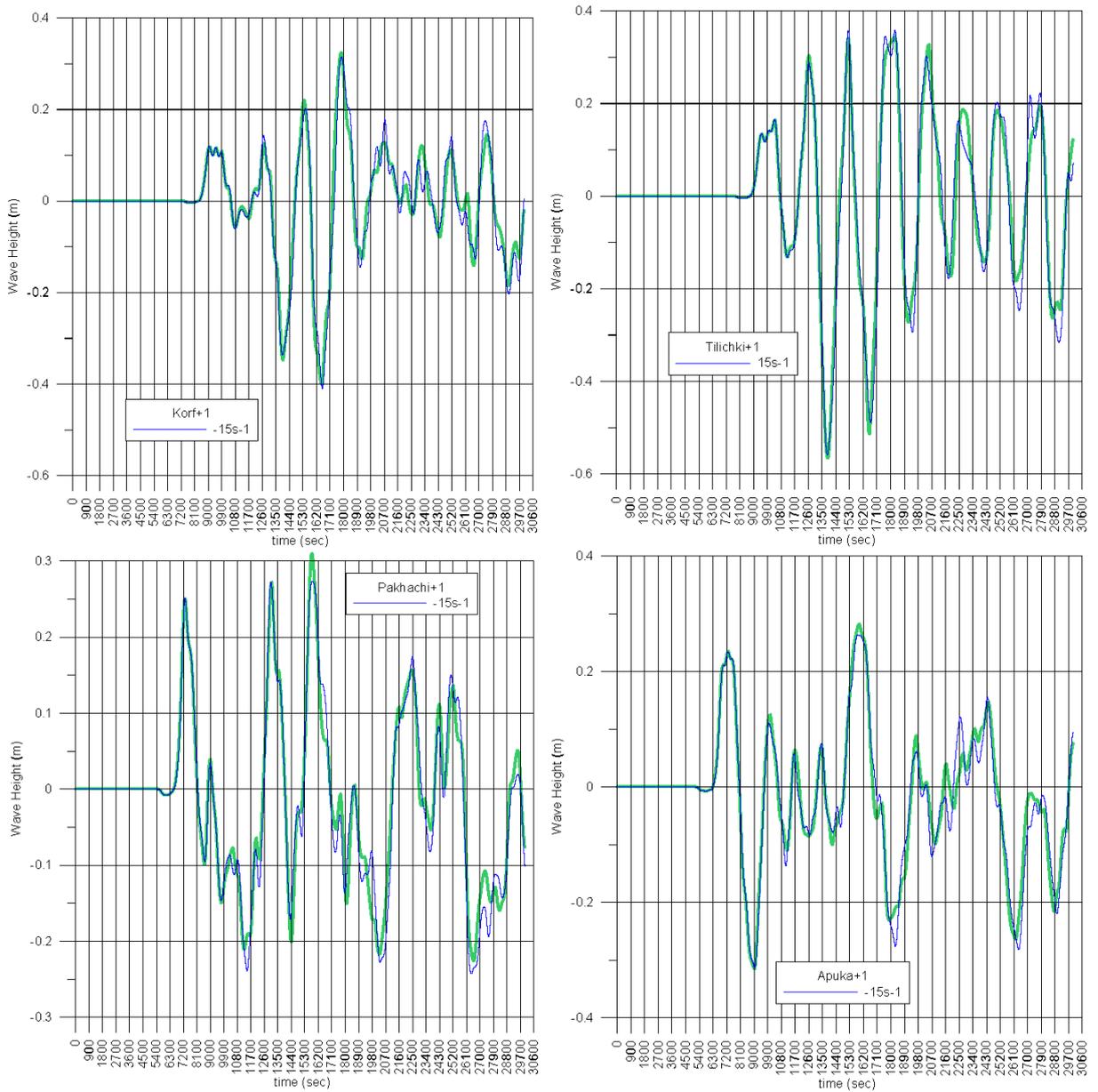
**Рисунок 8. Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «2b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**

Графики (Рисунок 9) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «2d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная.** **Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**



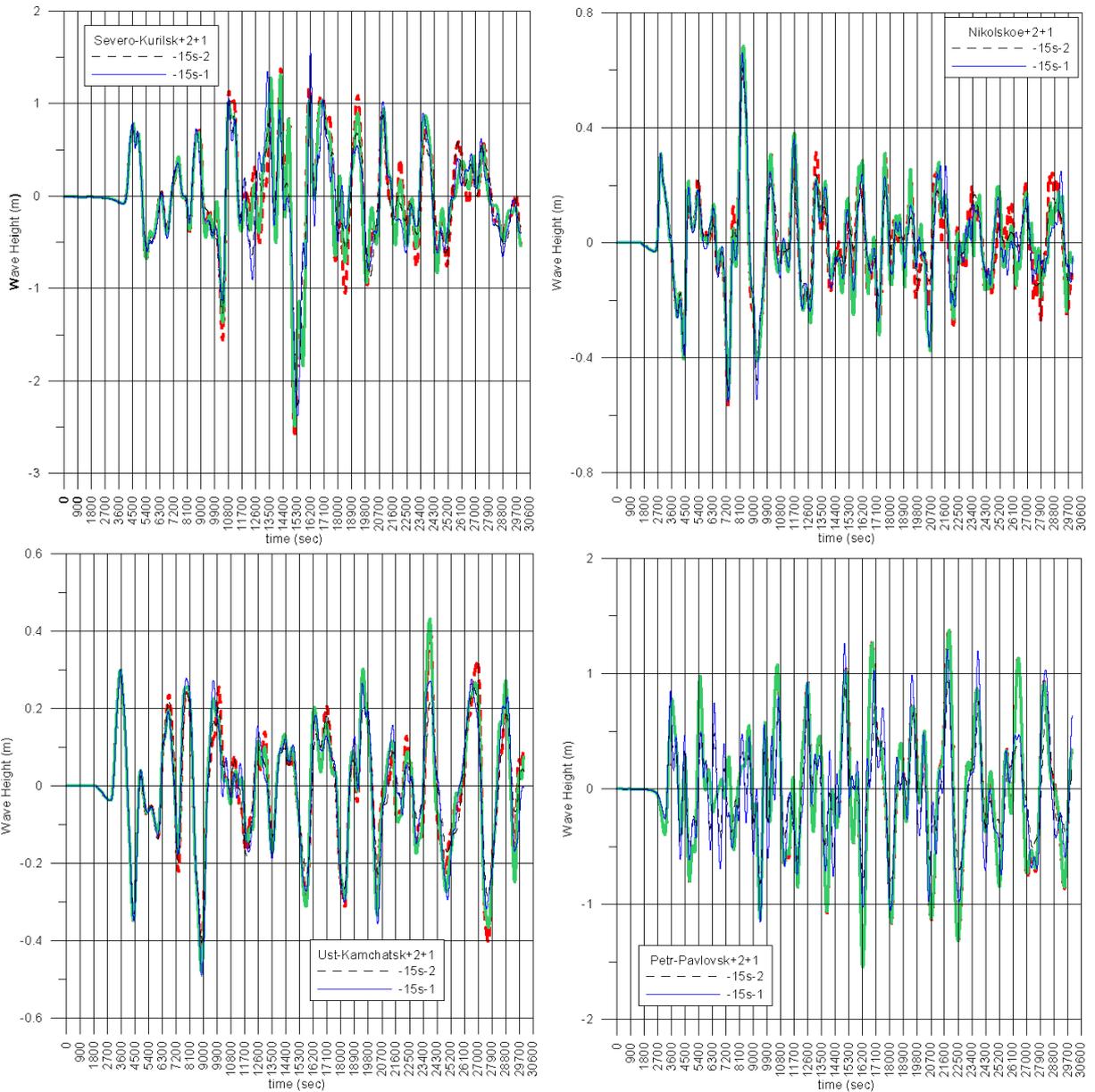


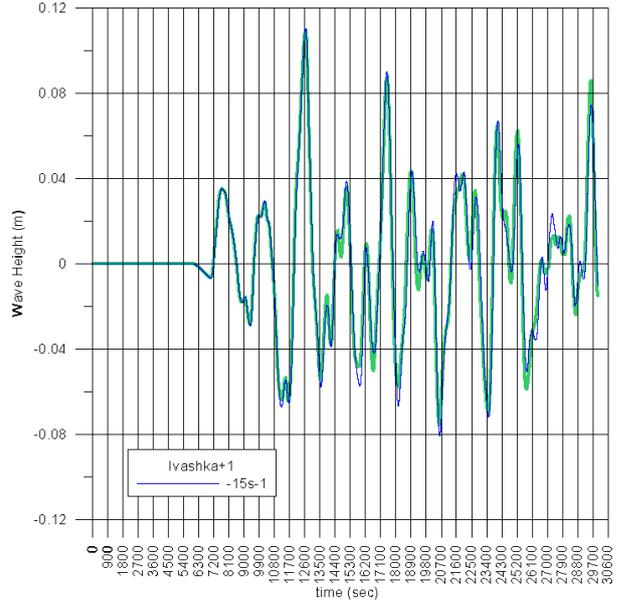
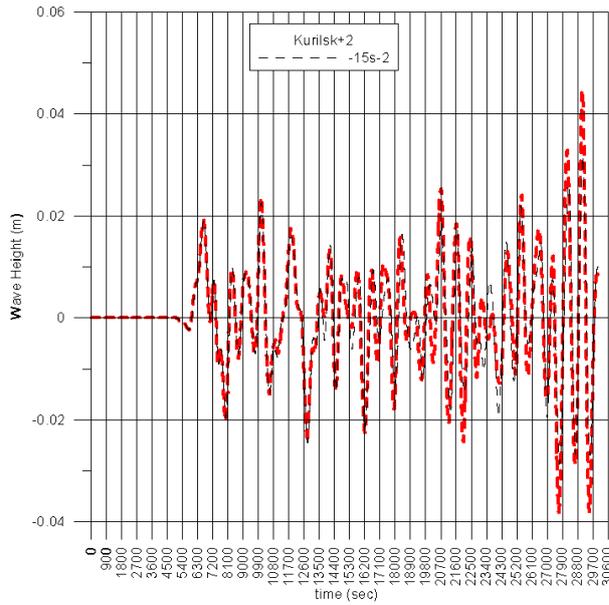
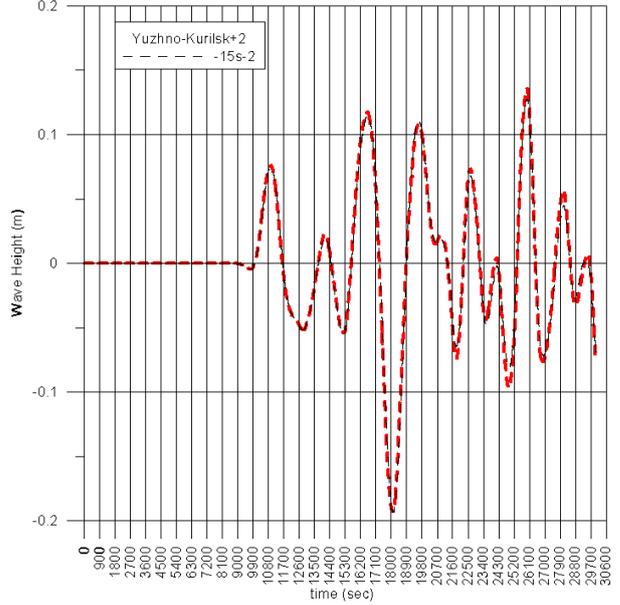
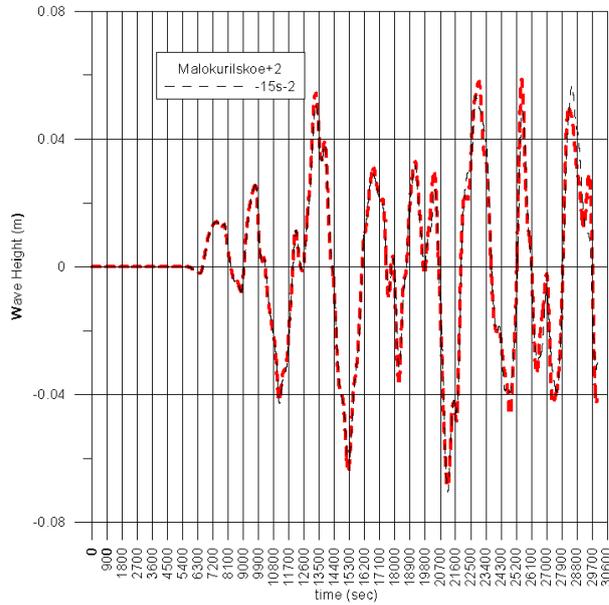
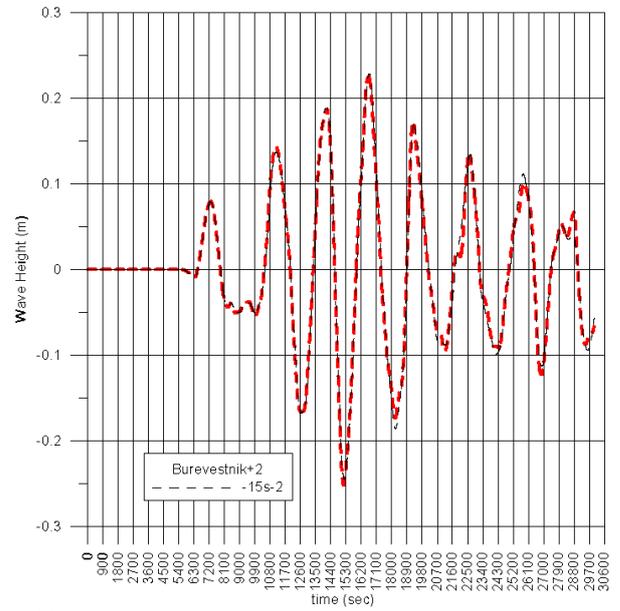
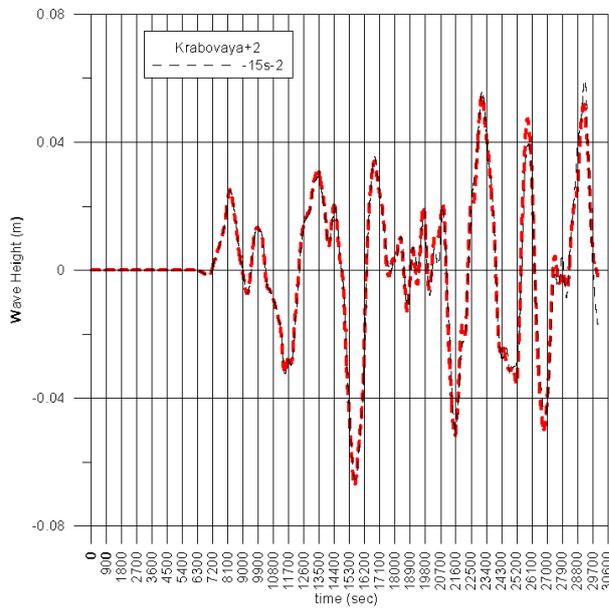


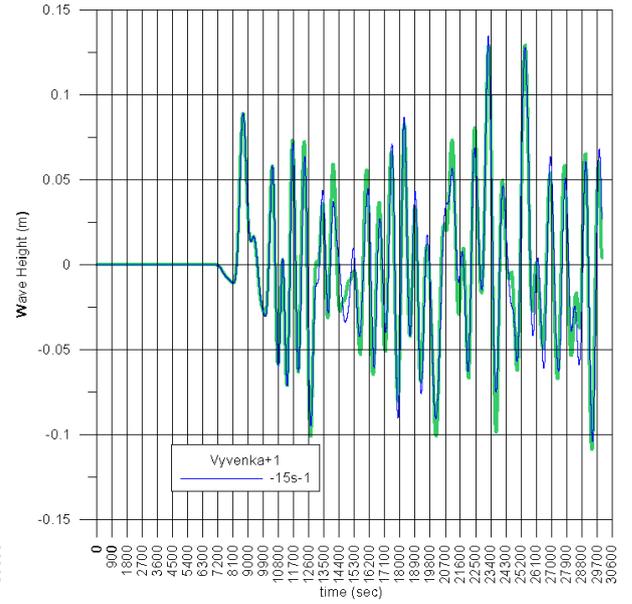
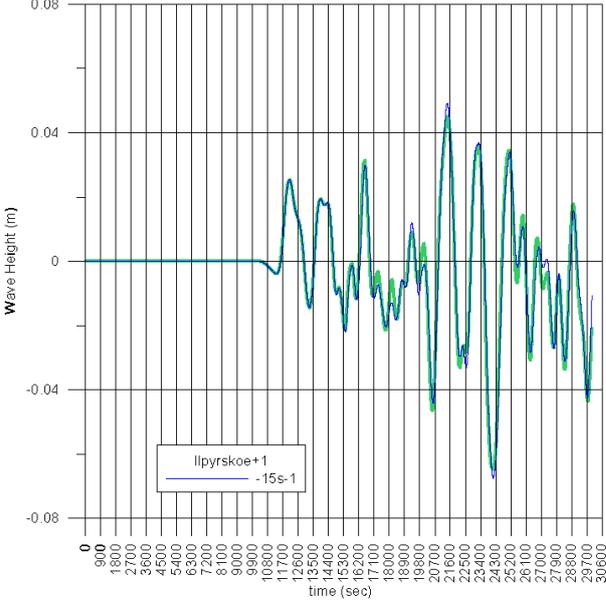
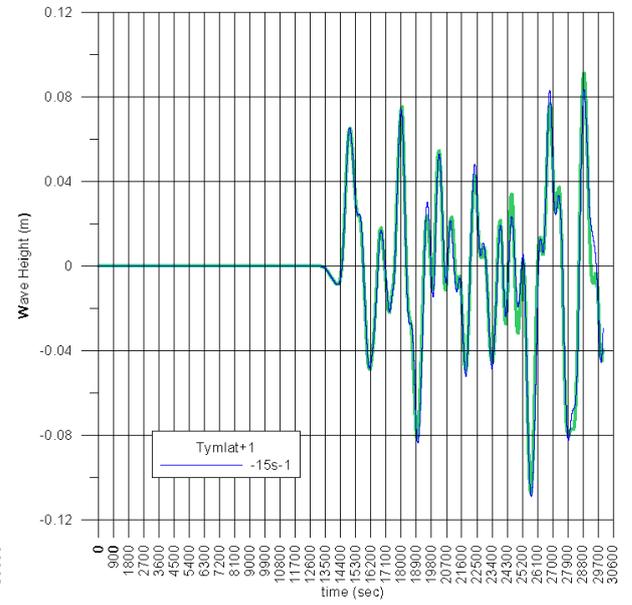
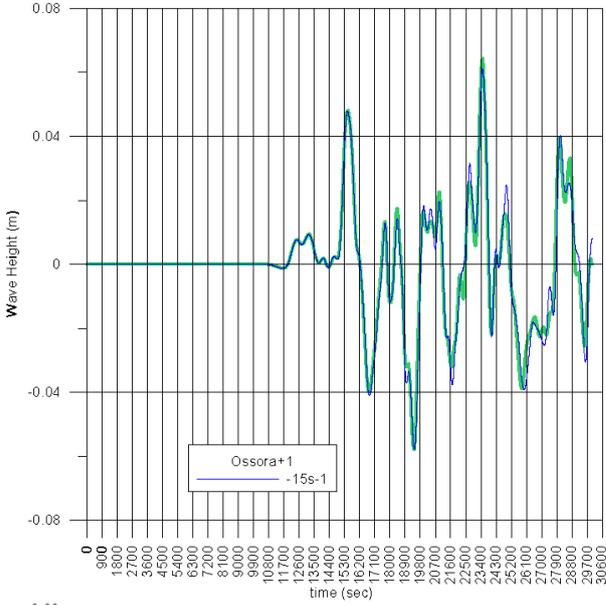
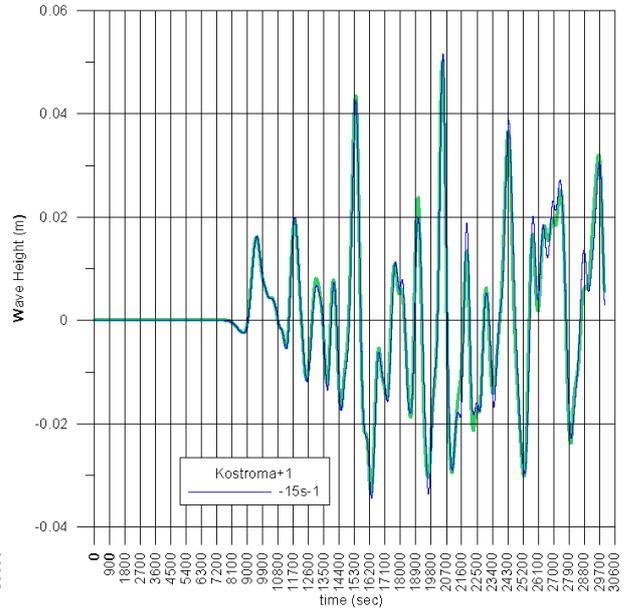
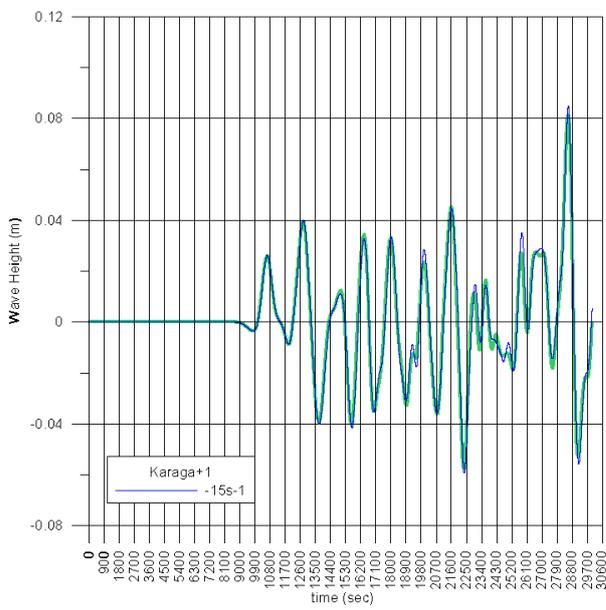


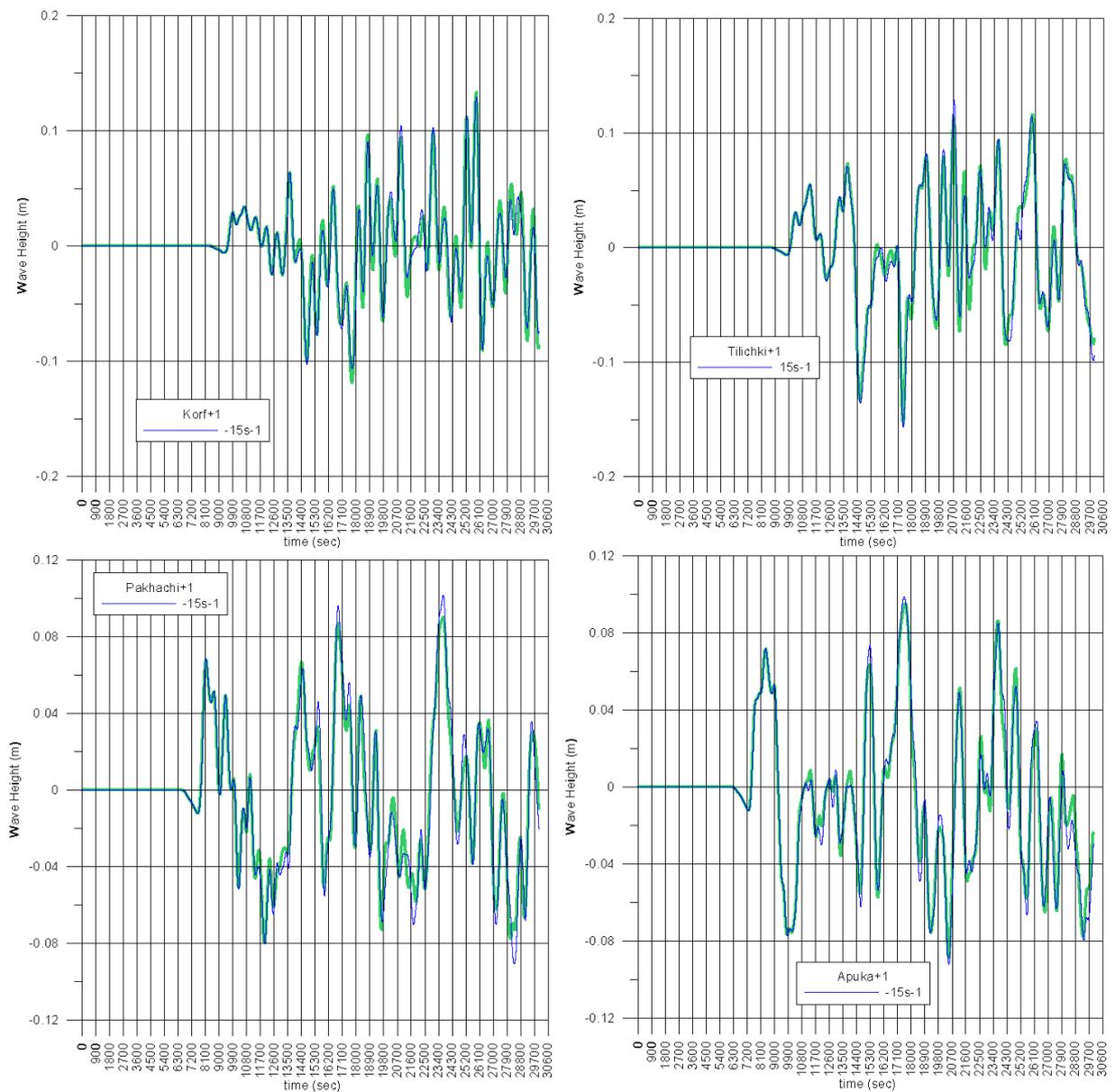
**Рисунок 9.** Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «2d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.

Графики (Рисунок 10) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «4b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная.** **Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**



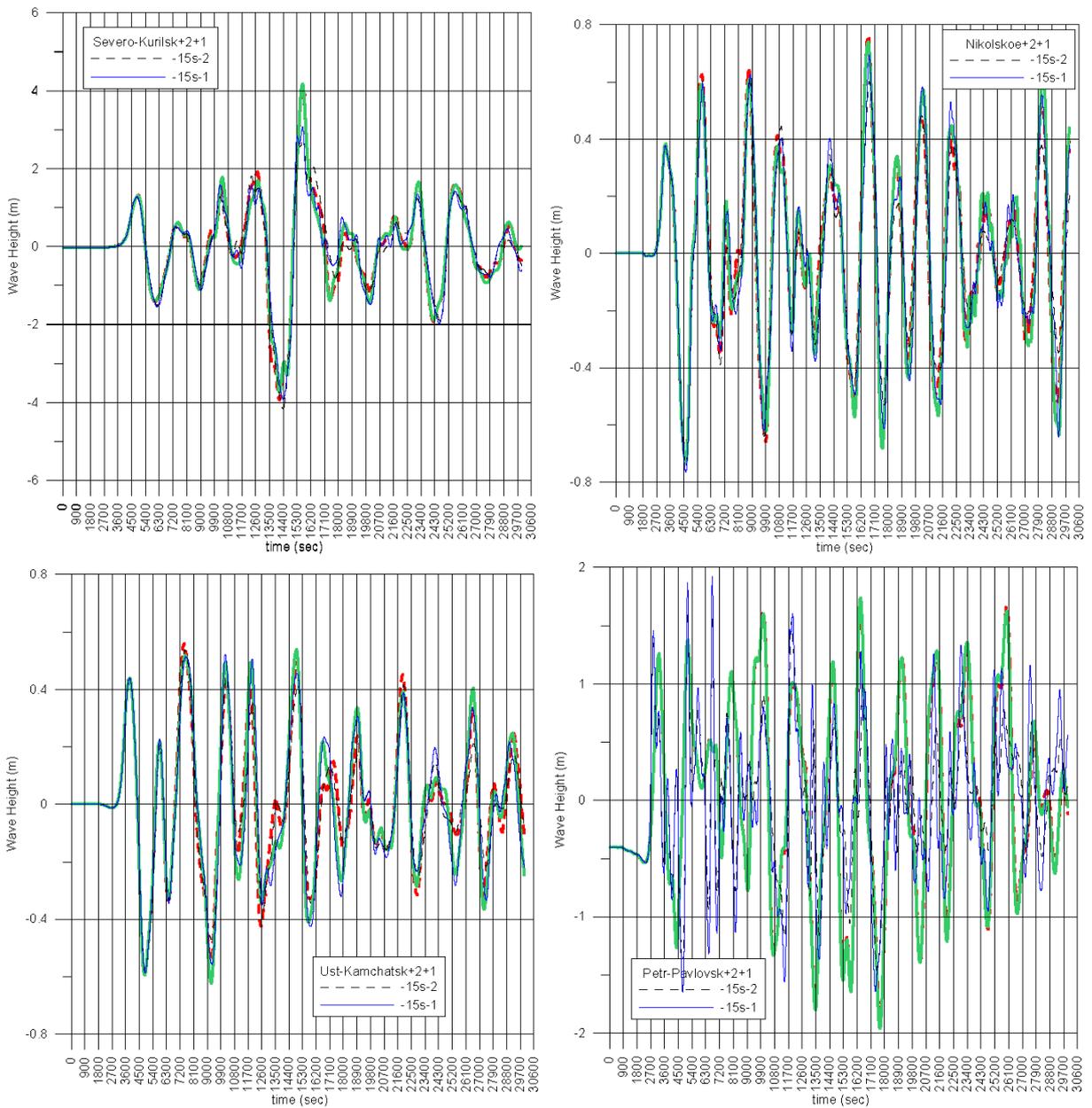


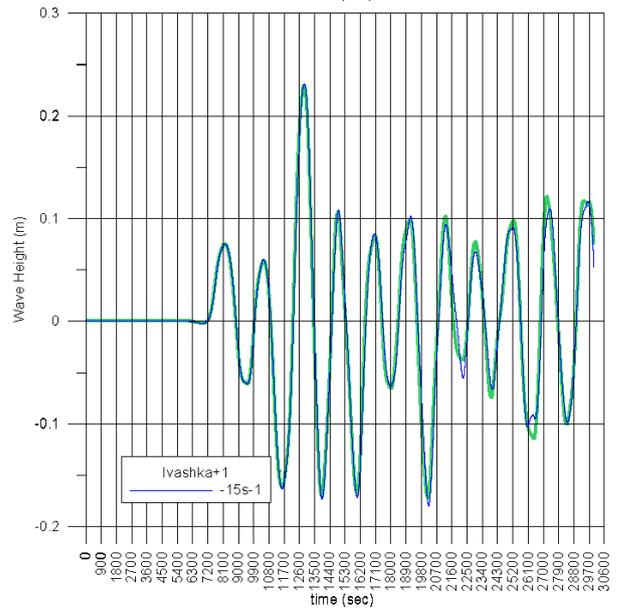
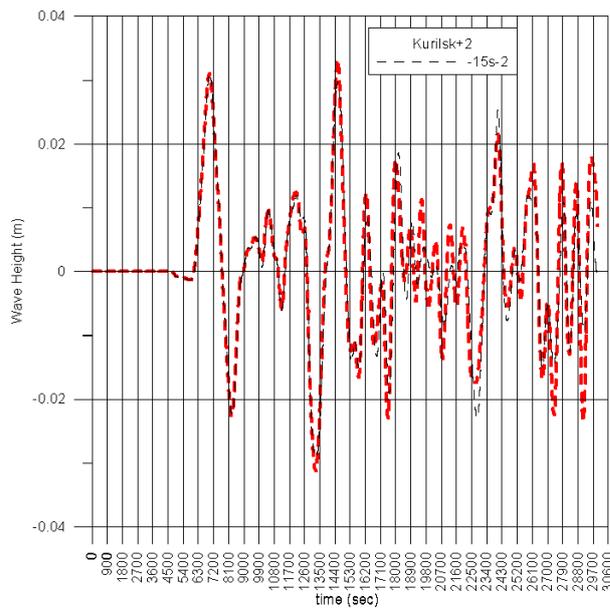
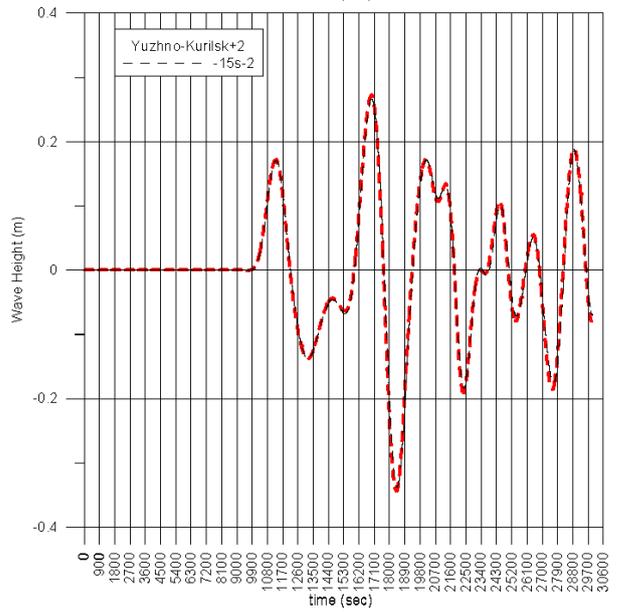
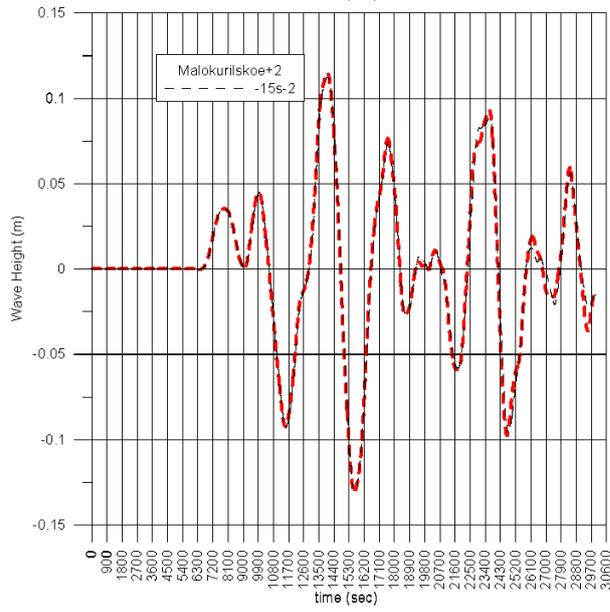
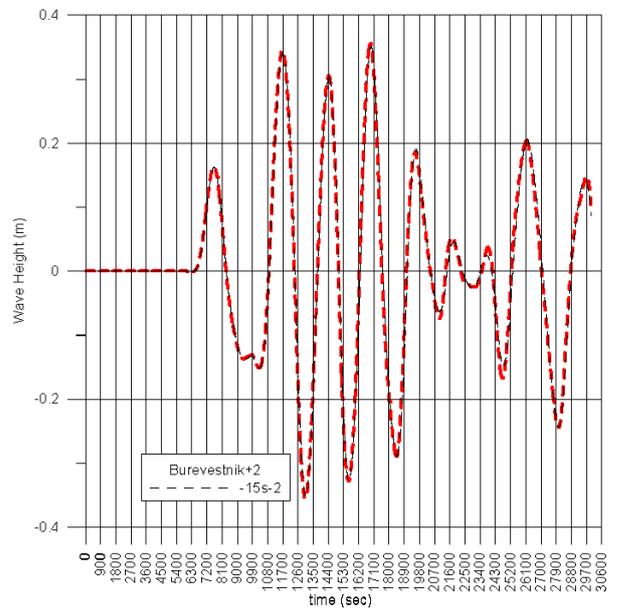
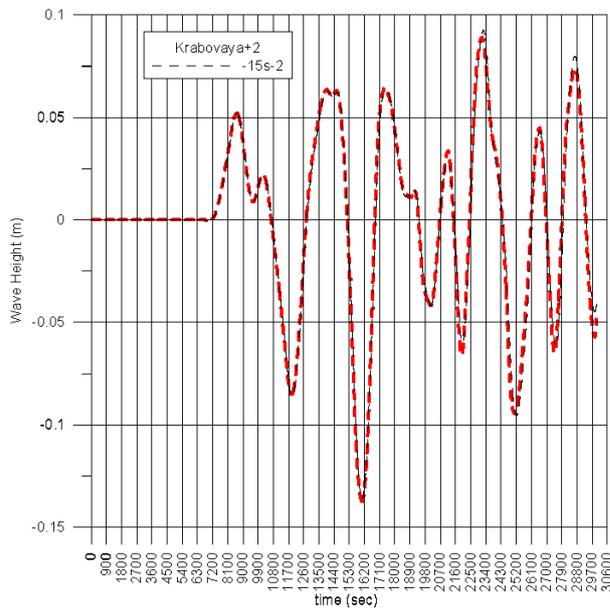


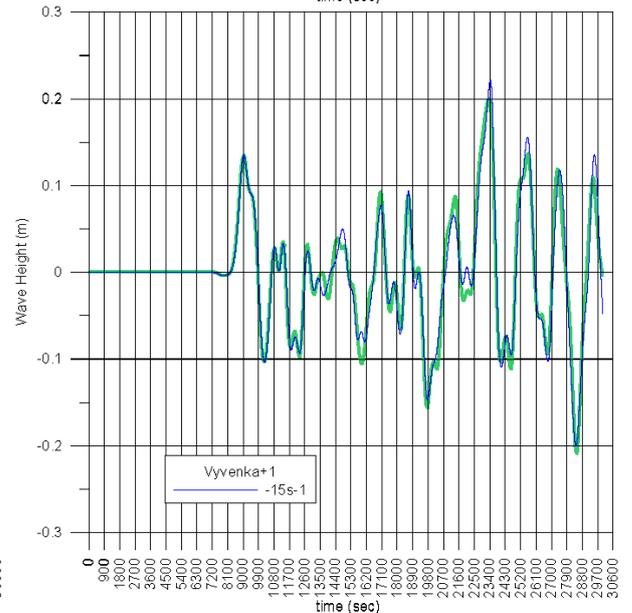
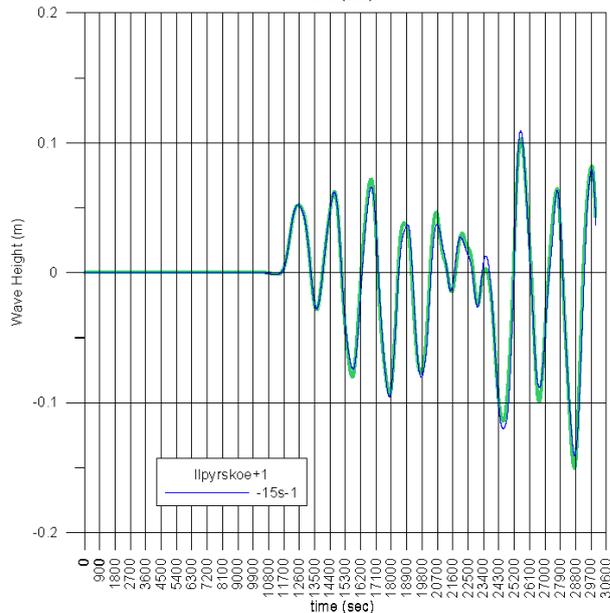
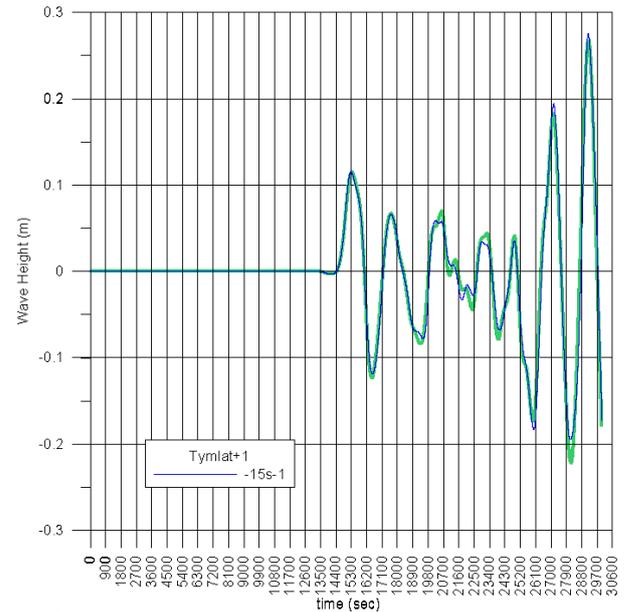
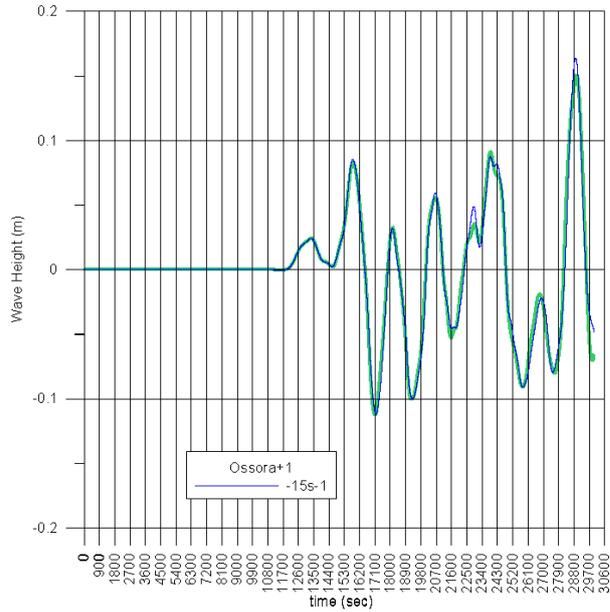
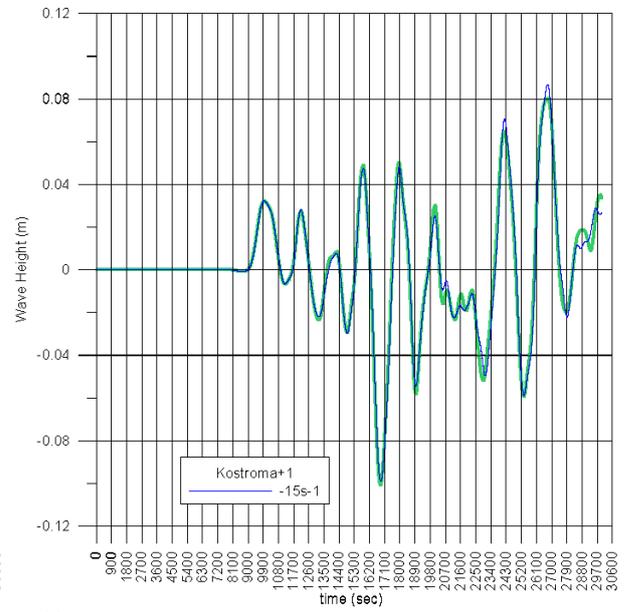
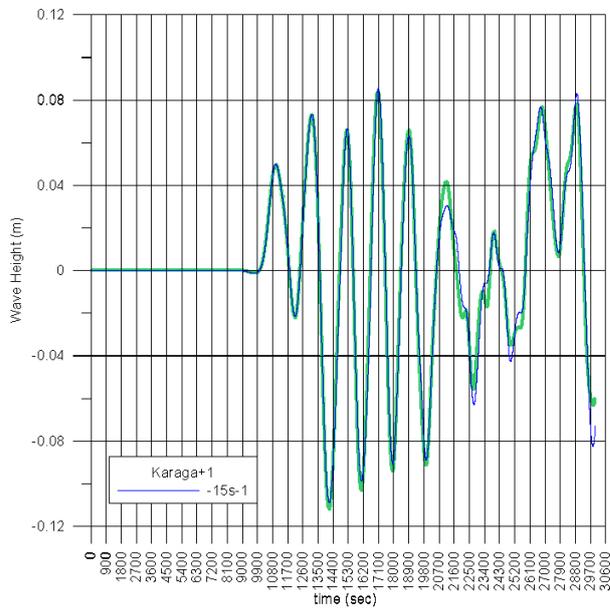


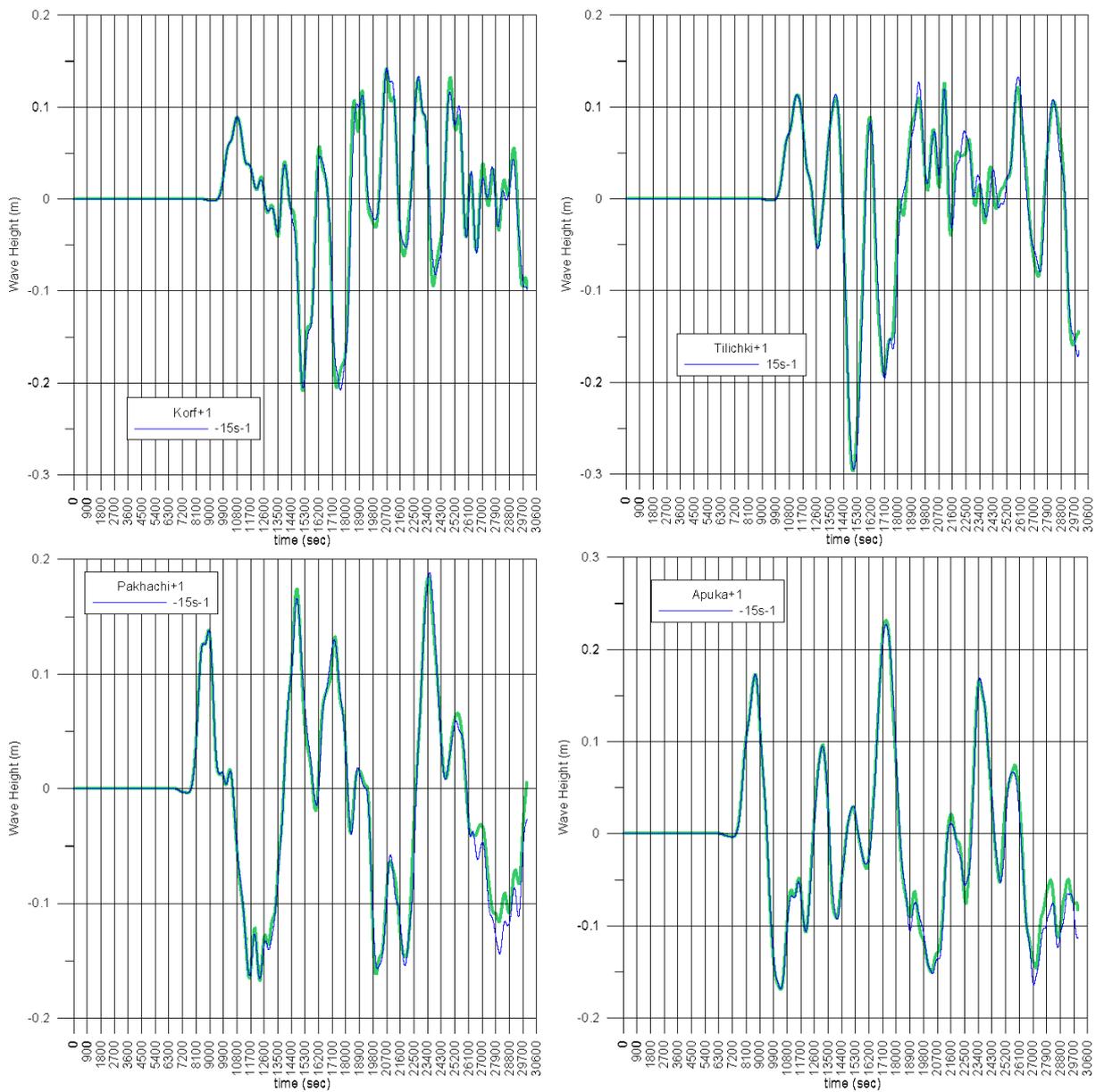
**Рисунок 10. Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «4b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**

Графики (Рисунок 11) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «4d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная.** **Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная.** **Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**



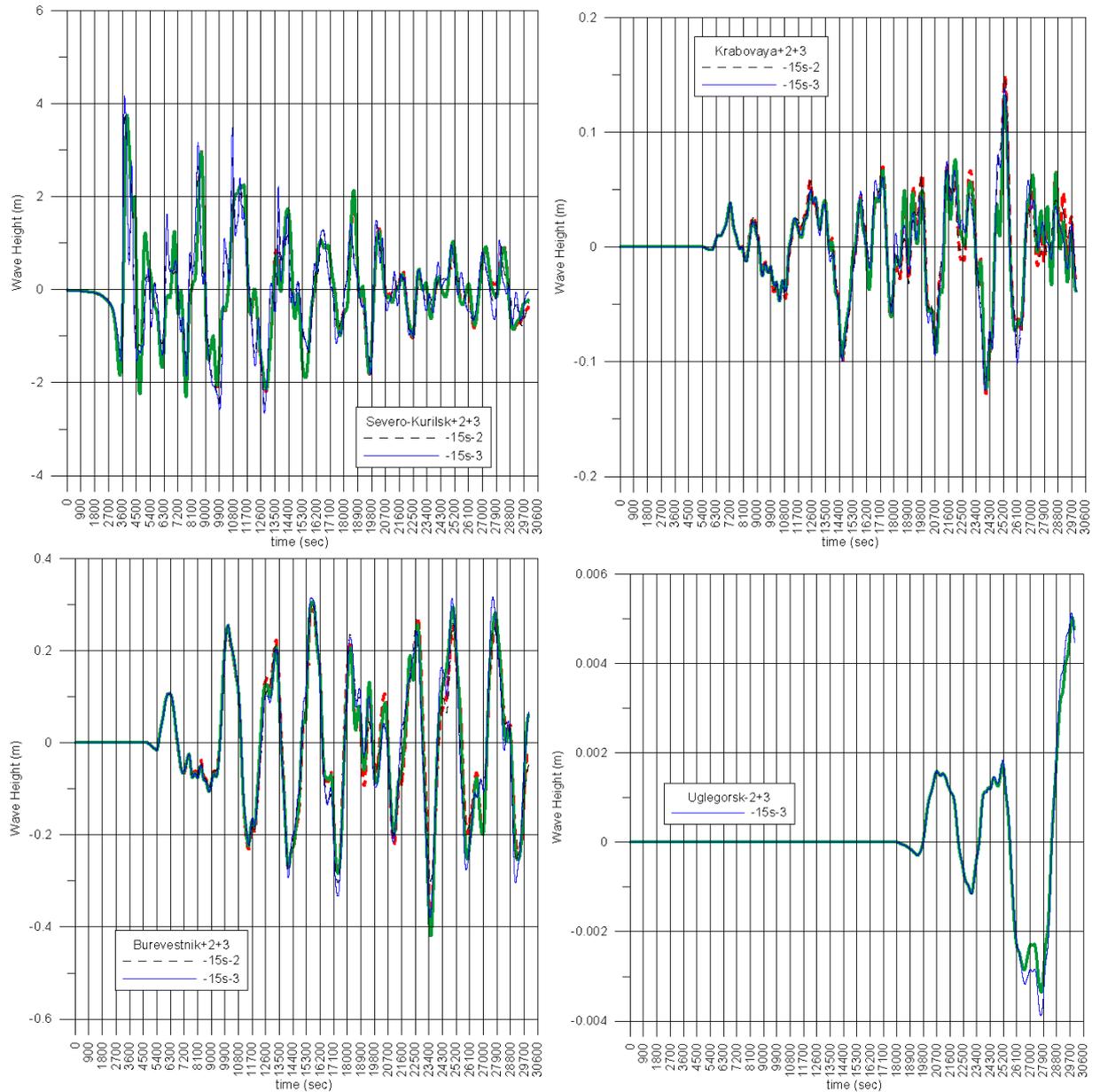


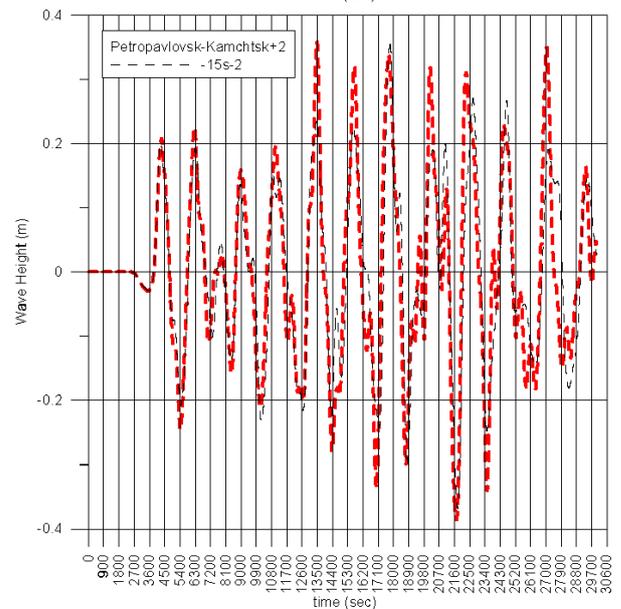
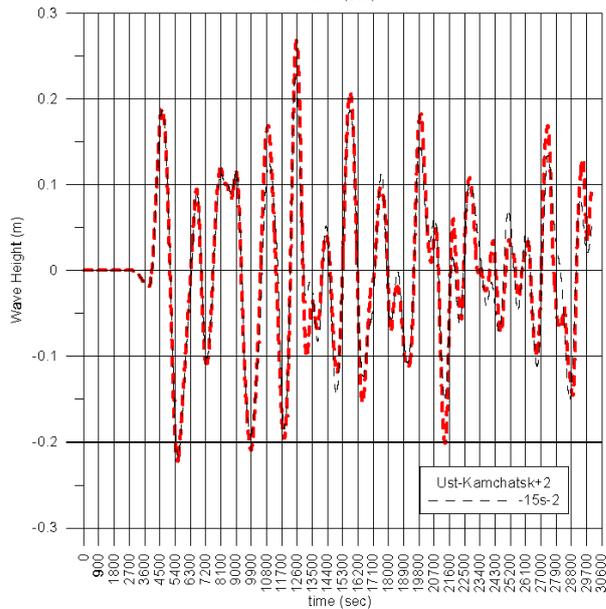
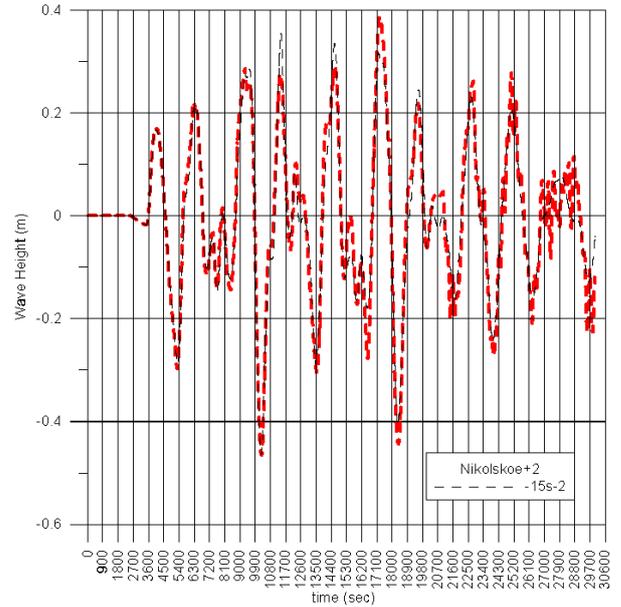
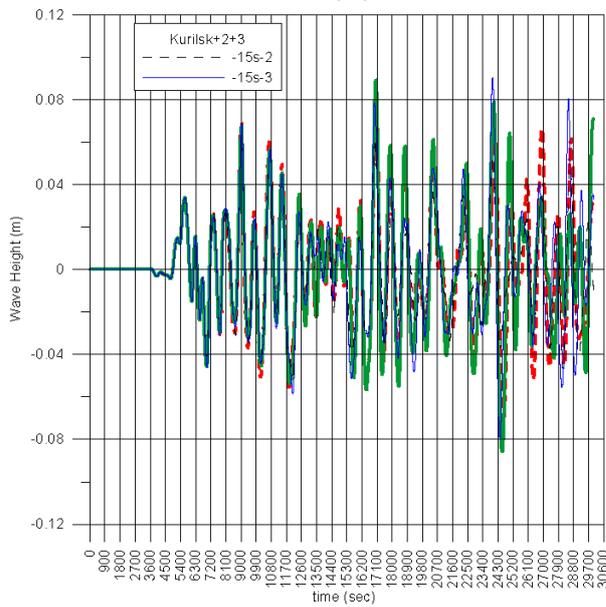
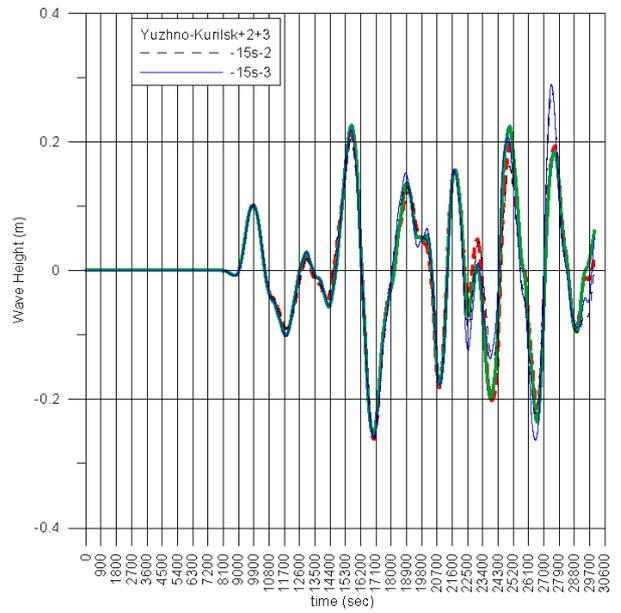
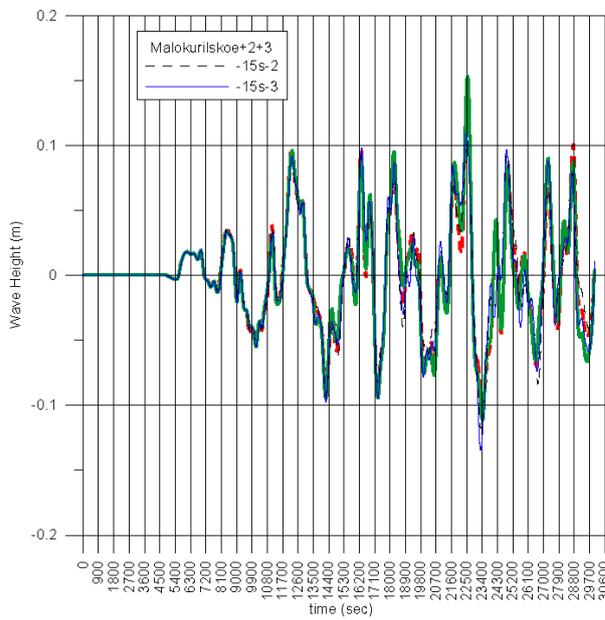


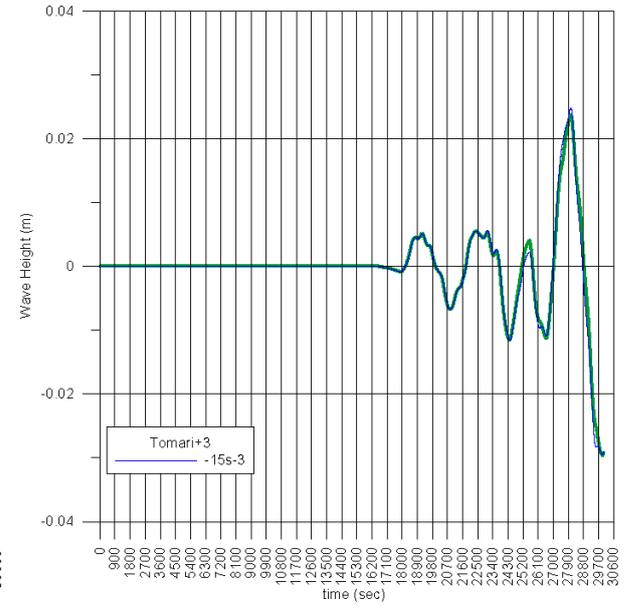
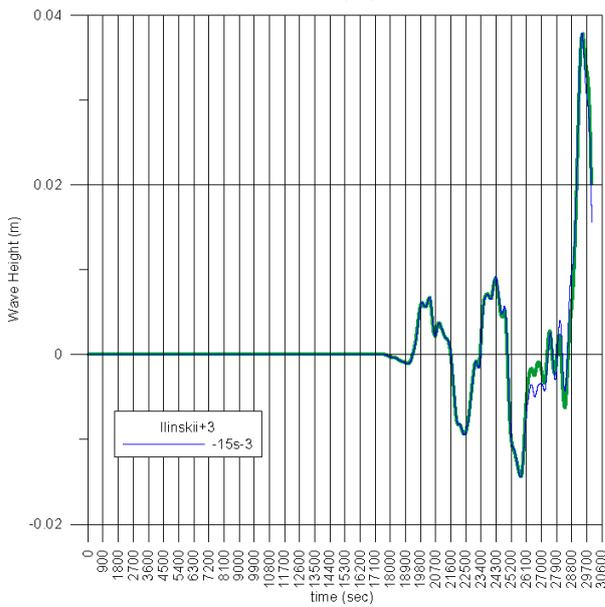
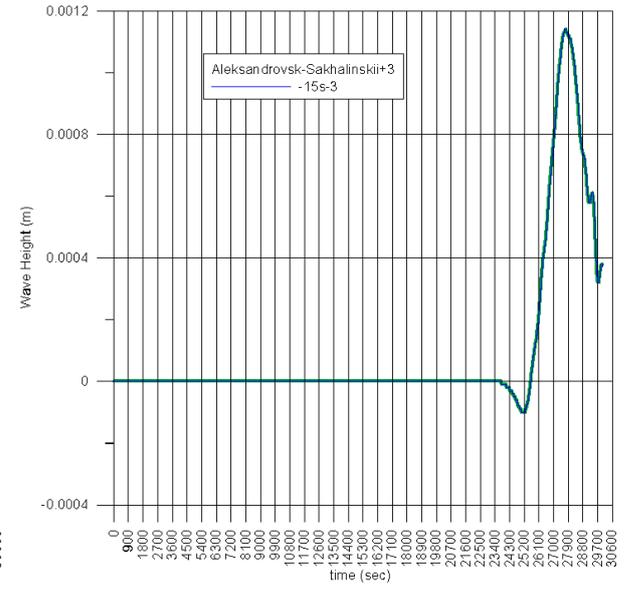
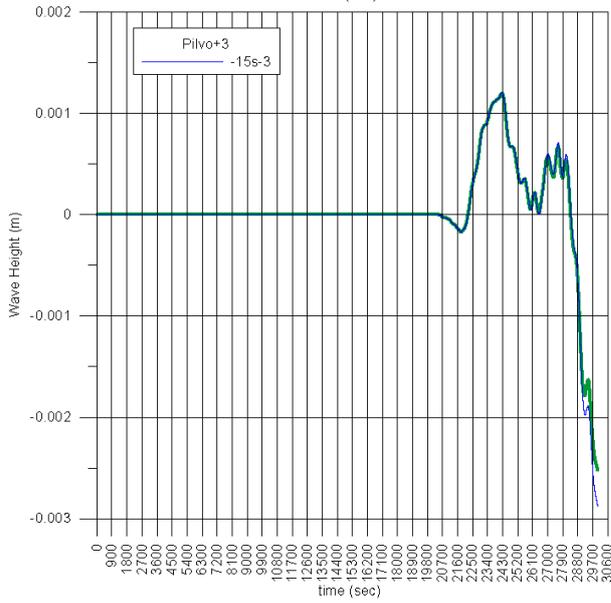
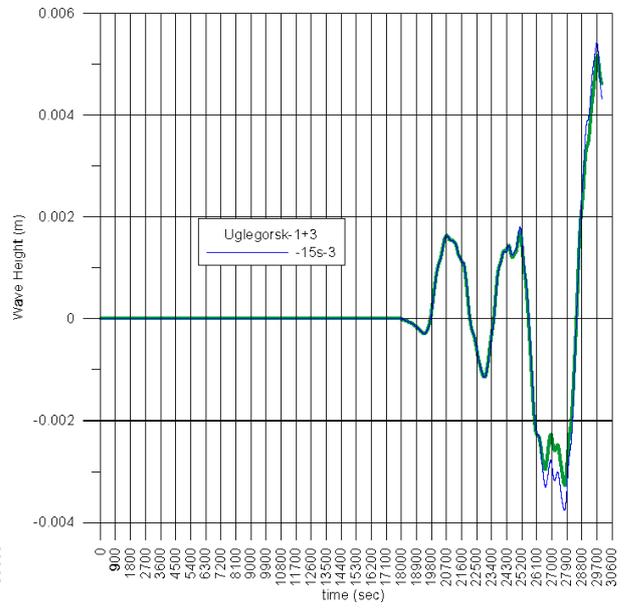
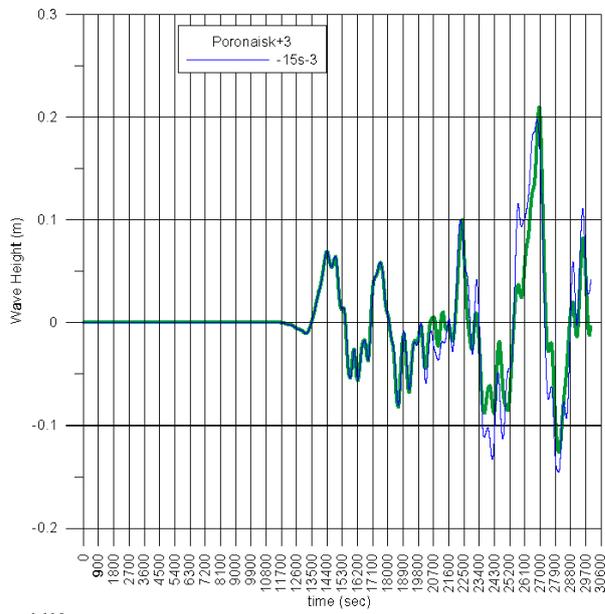


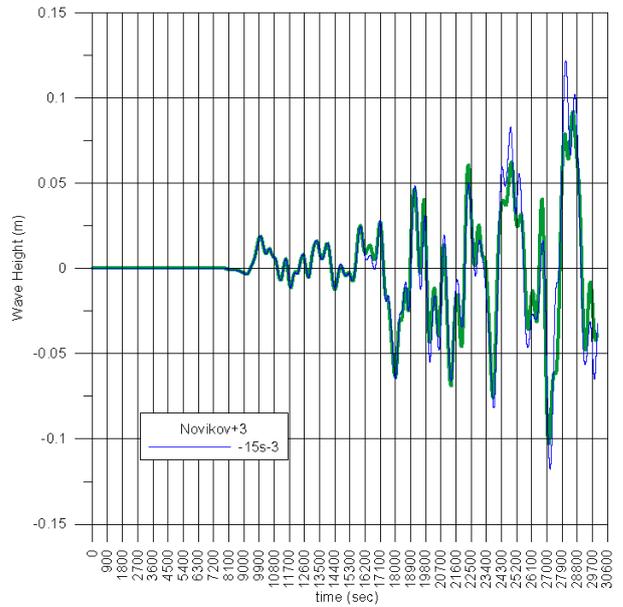
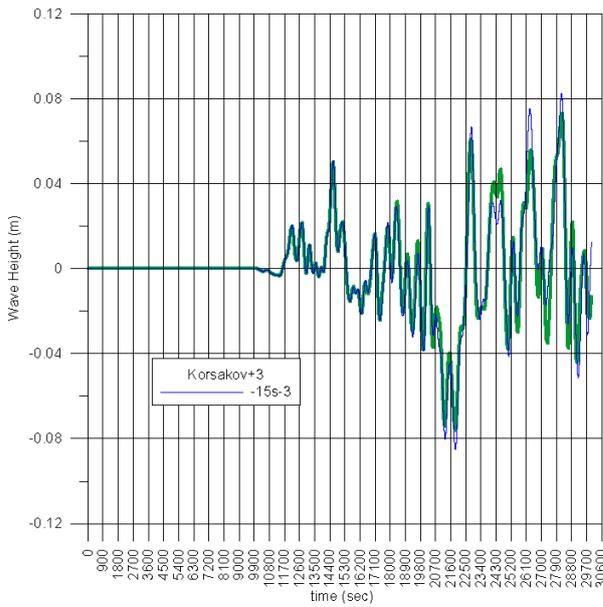
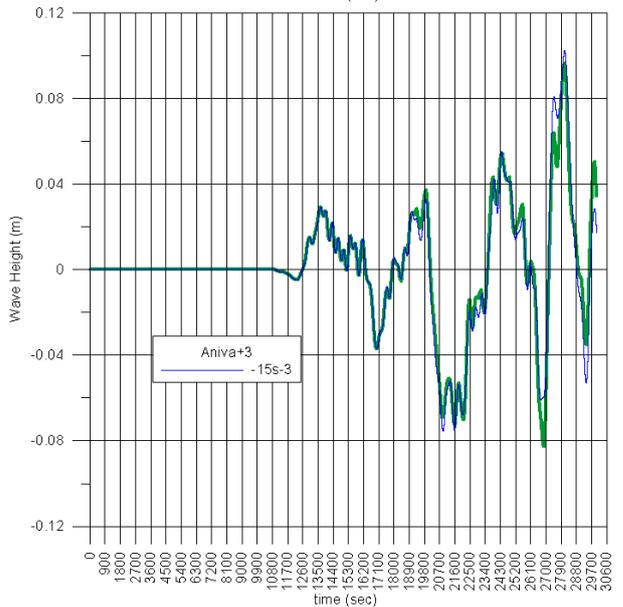
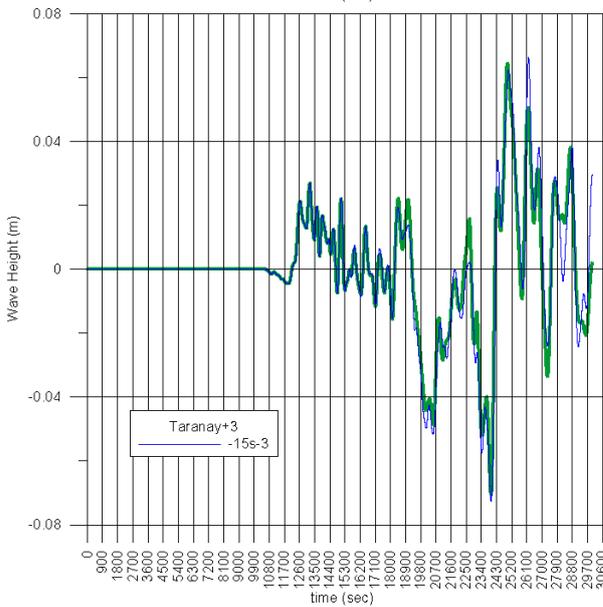
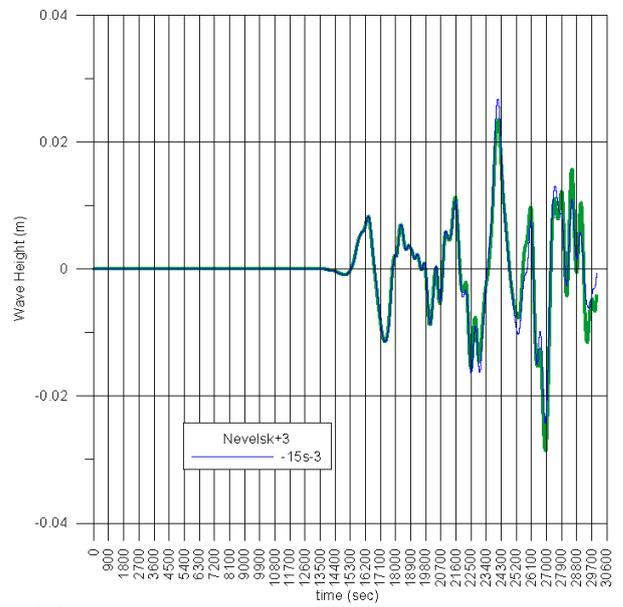
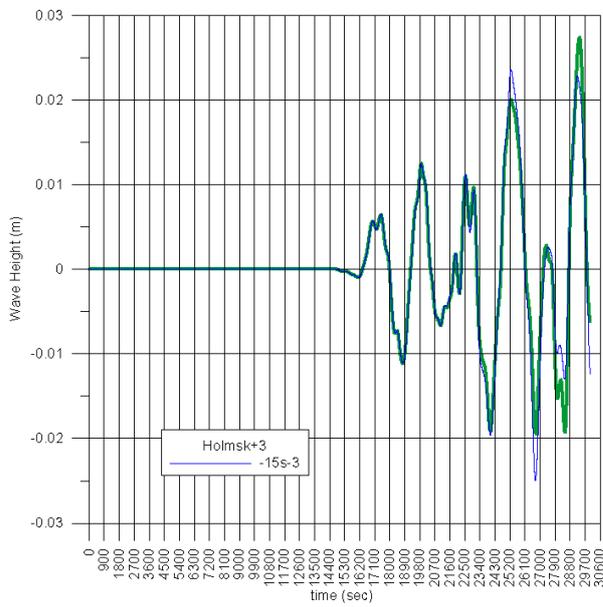
**Рисунок 11.** Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «4d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-1» (сплошные линии) и «84-2» (штрих) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-1» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-1» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.

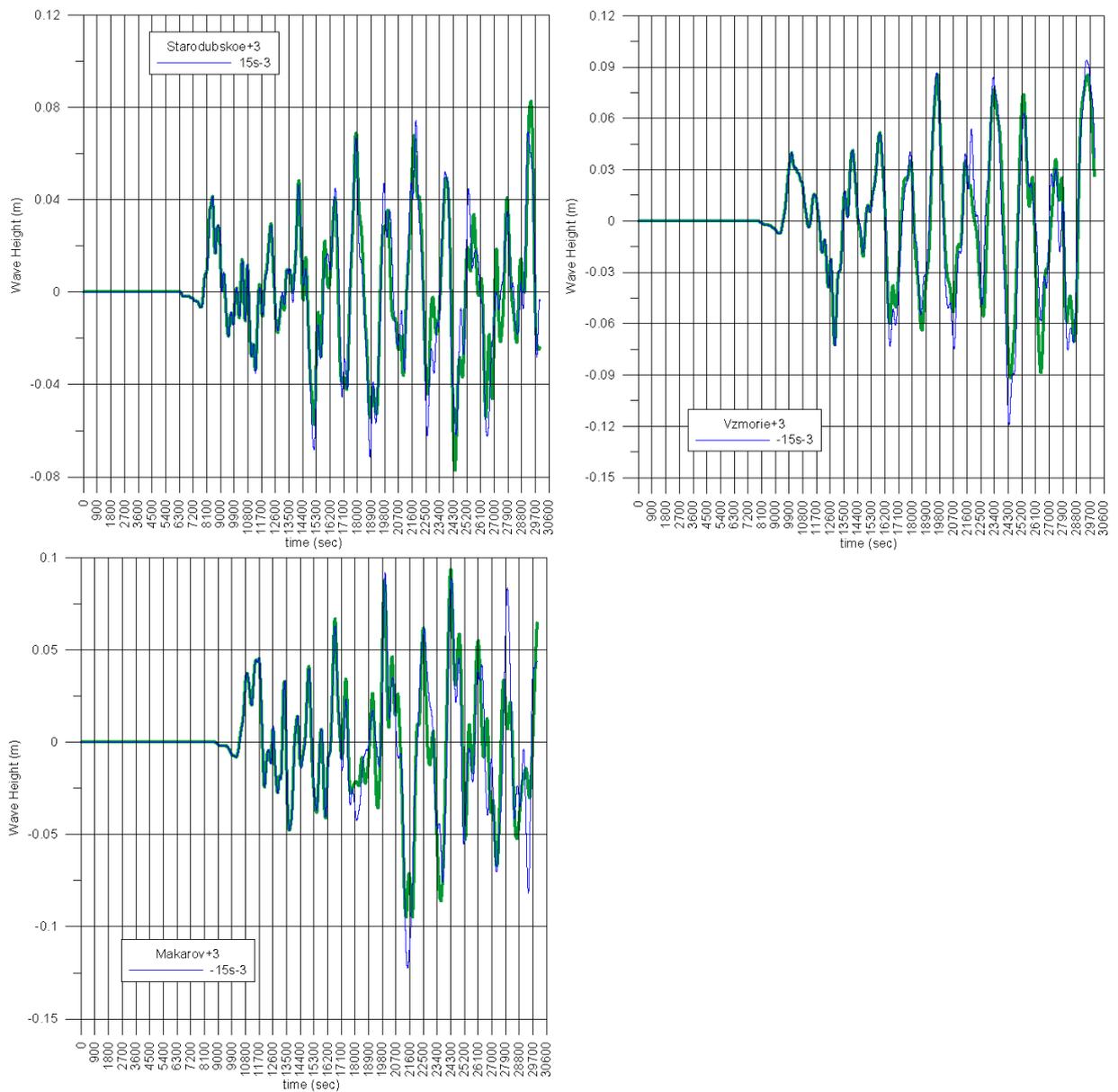
Графики (Рисунок 12) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «бб» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная** модель, расчет в области «84-3» – **зеленая, жирная, сплошная**. **Линейная** модель, расчет в области «84-2» – **красная, жирная, штрих**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-3» – **синяя, тонкая, сплошная**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-2» – **черная, тонкая, штрих**.





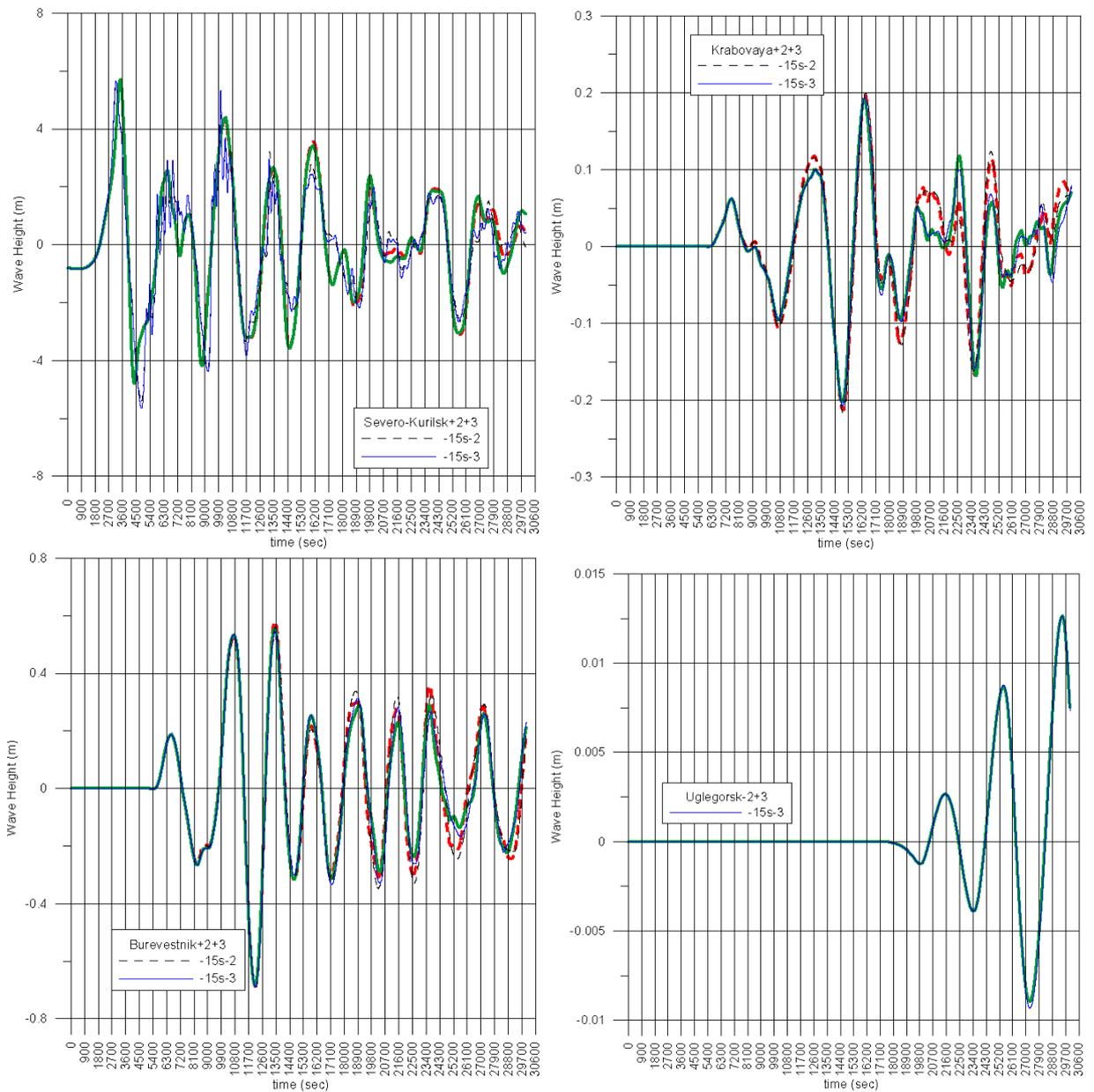


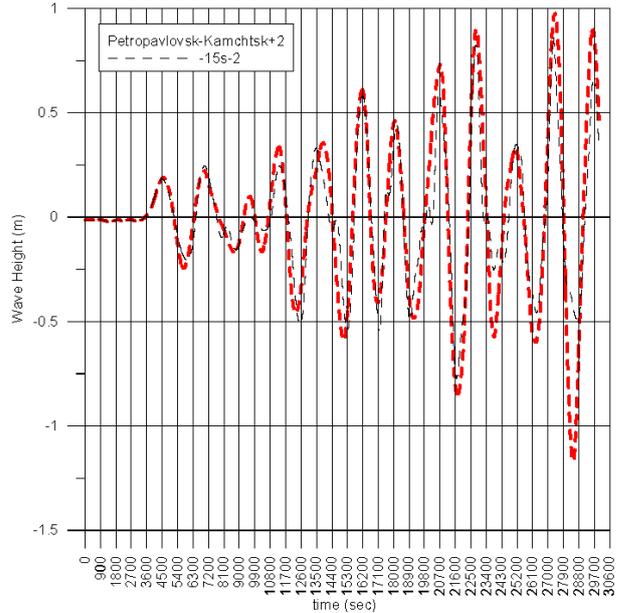
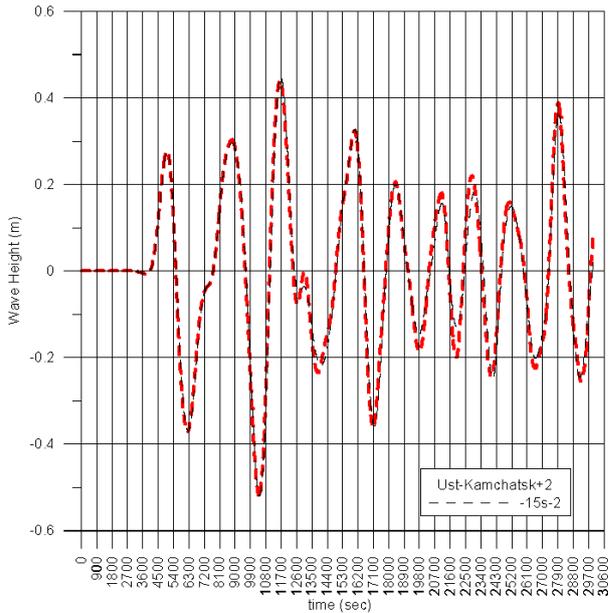
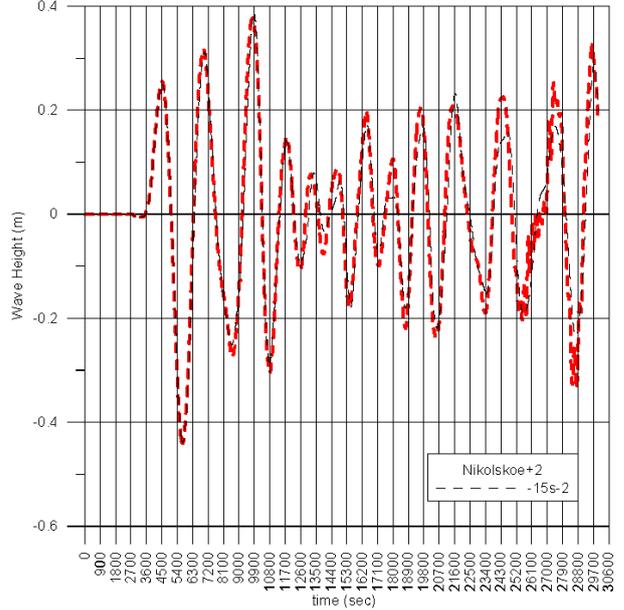
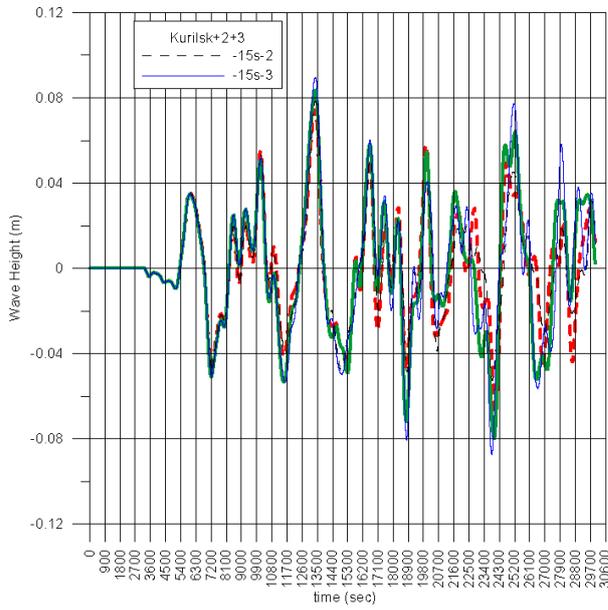
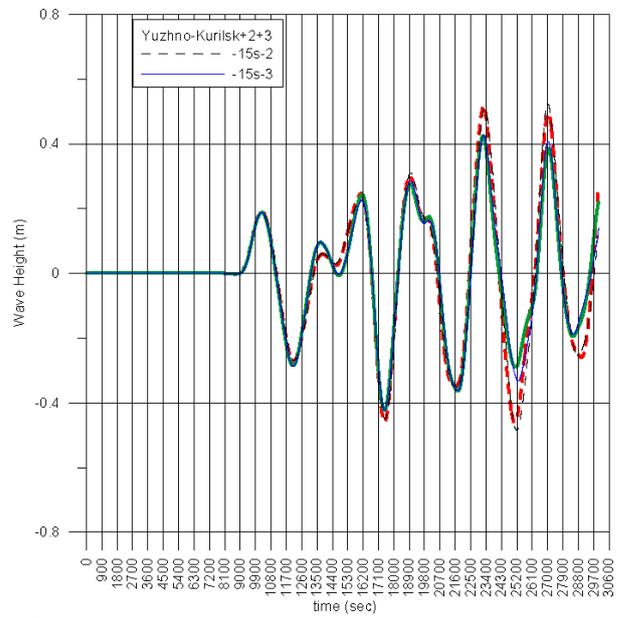
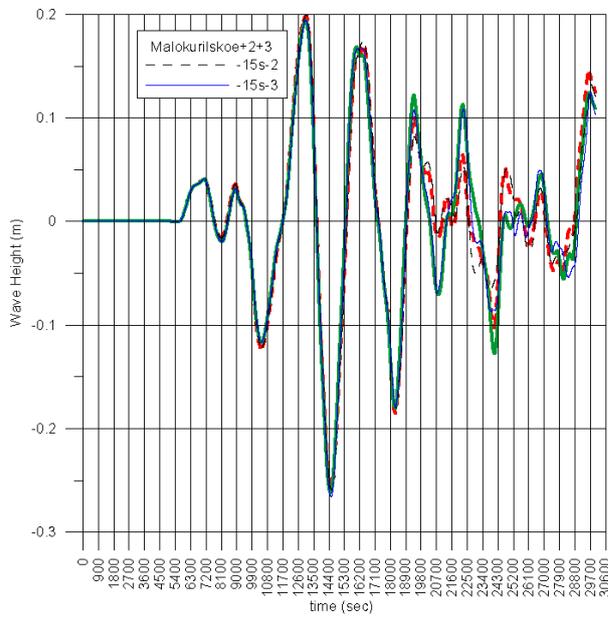


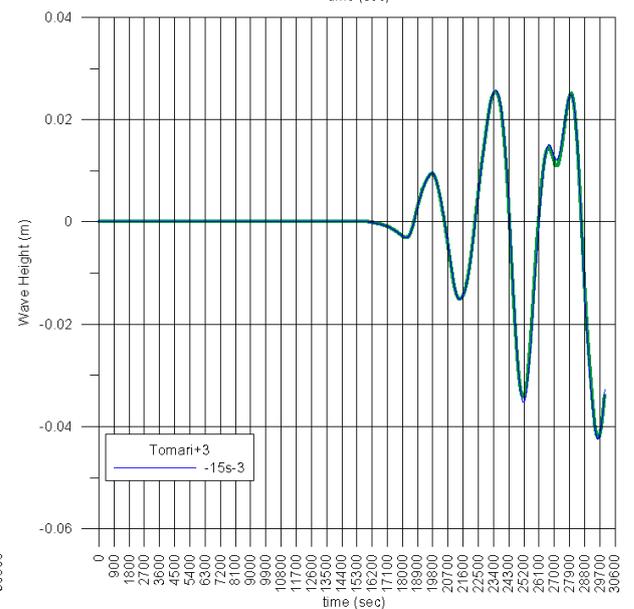
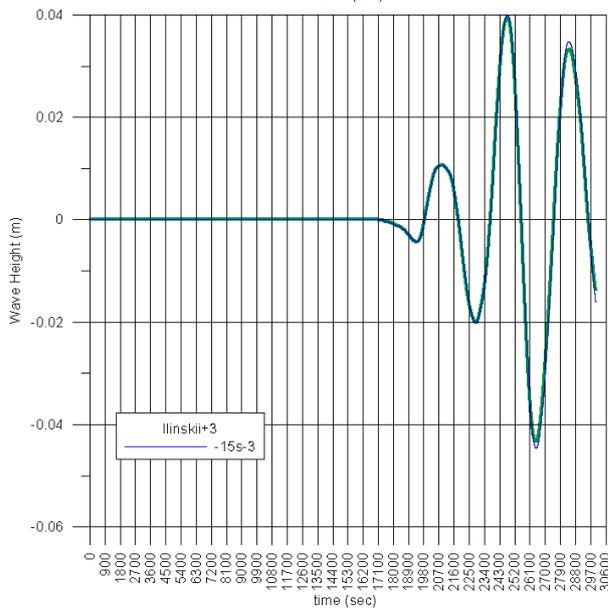
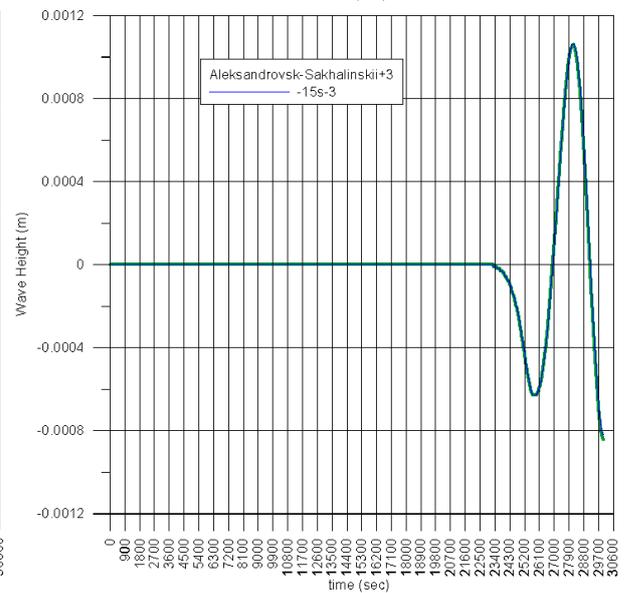
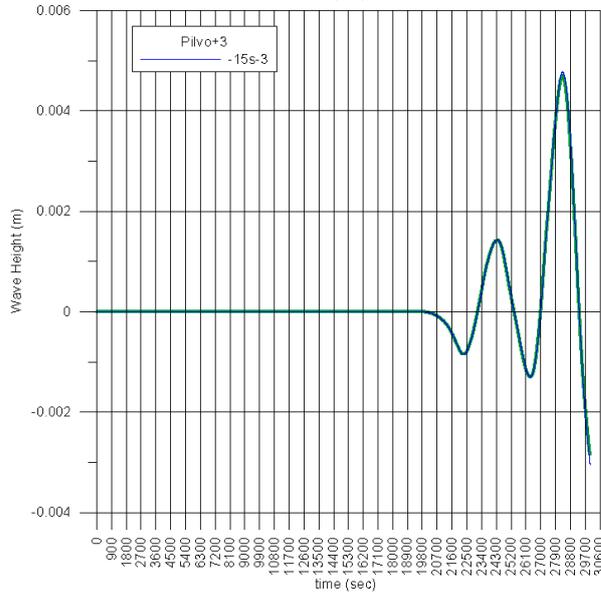
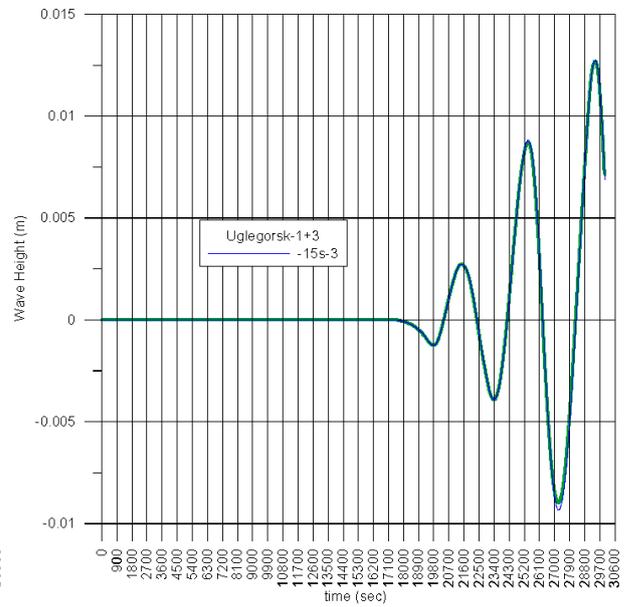
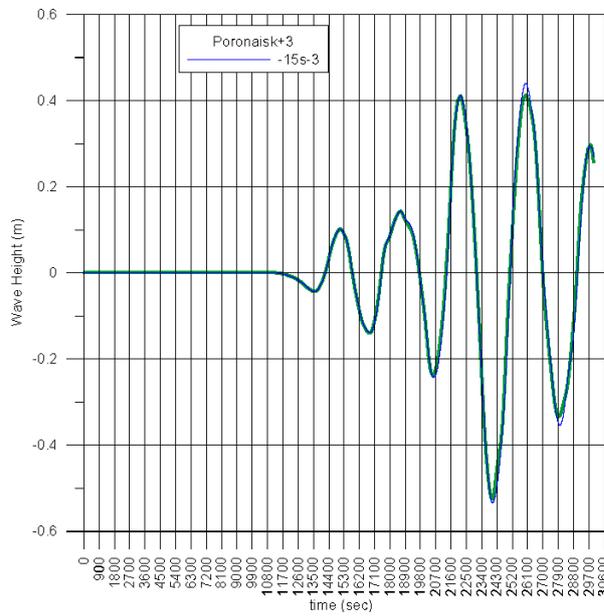


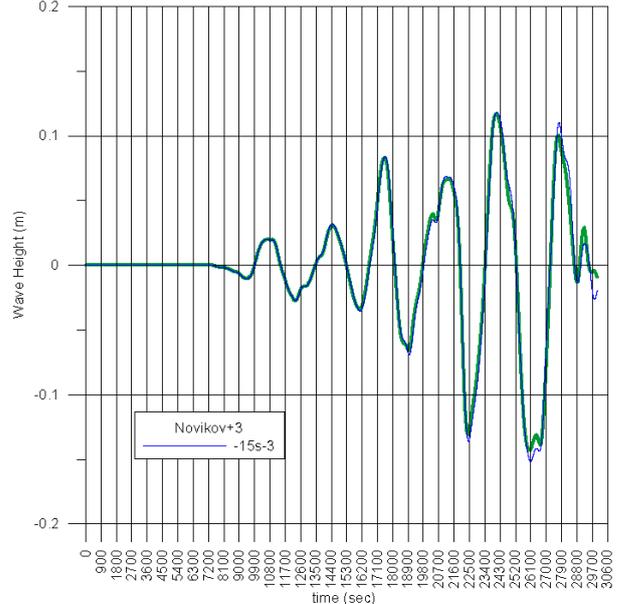
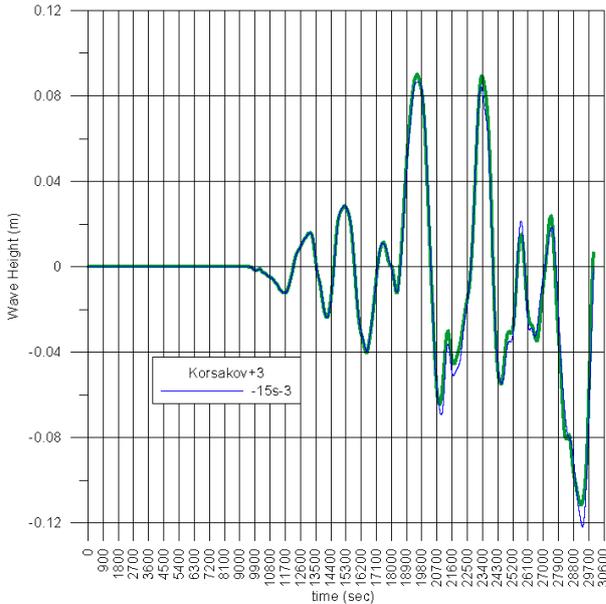
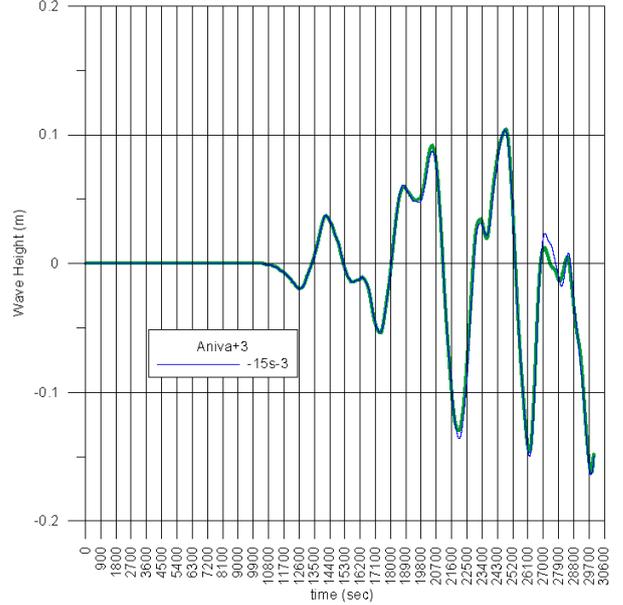
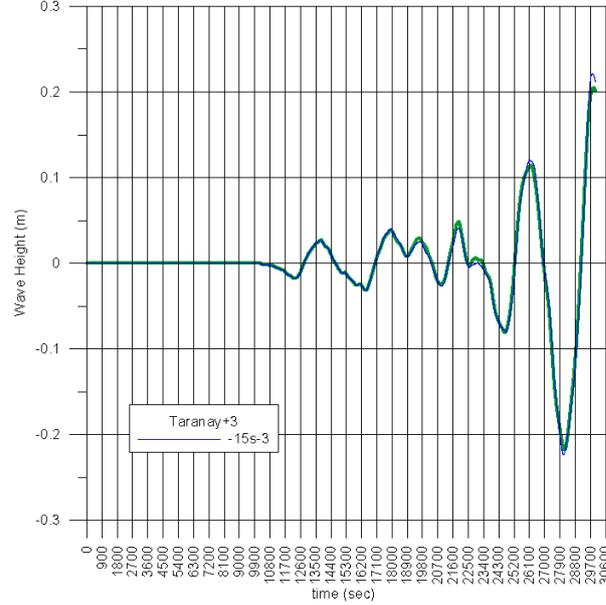
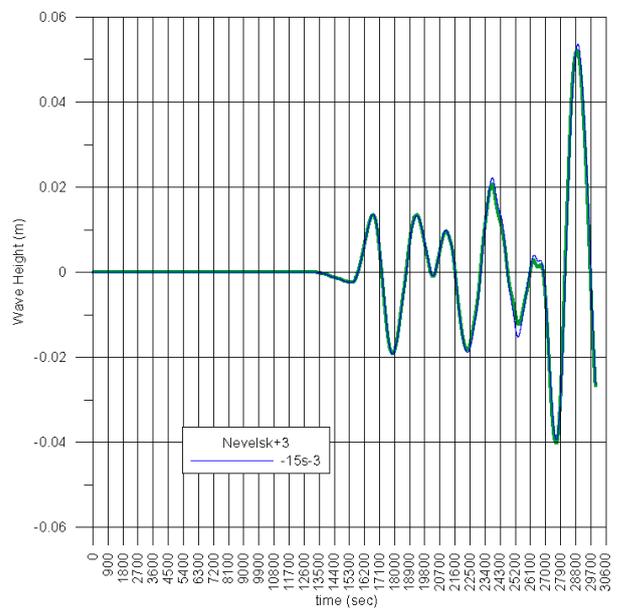
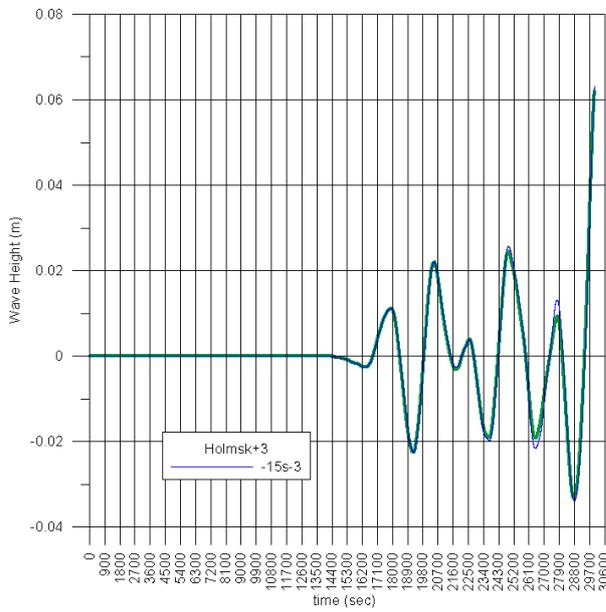
**Рисунок 12. Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «бб» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-3» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-3» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**

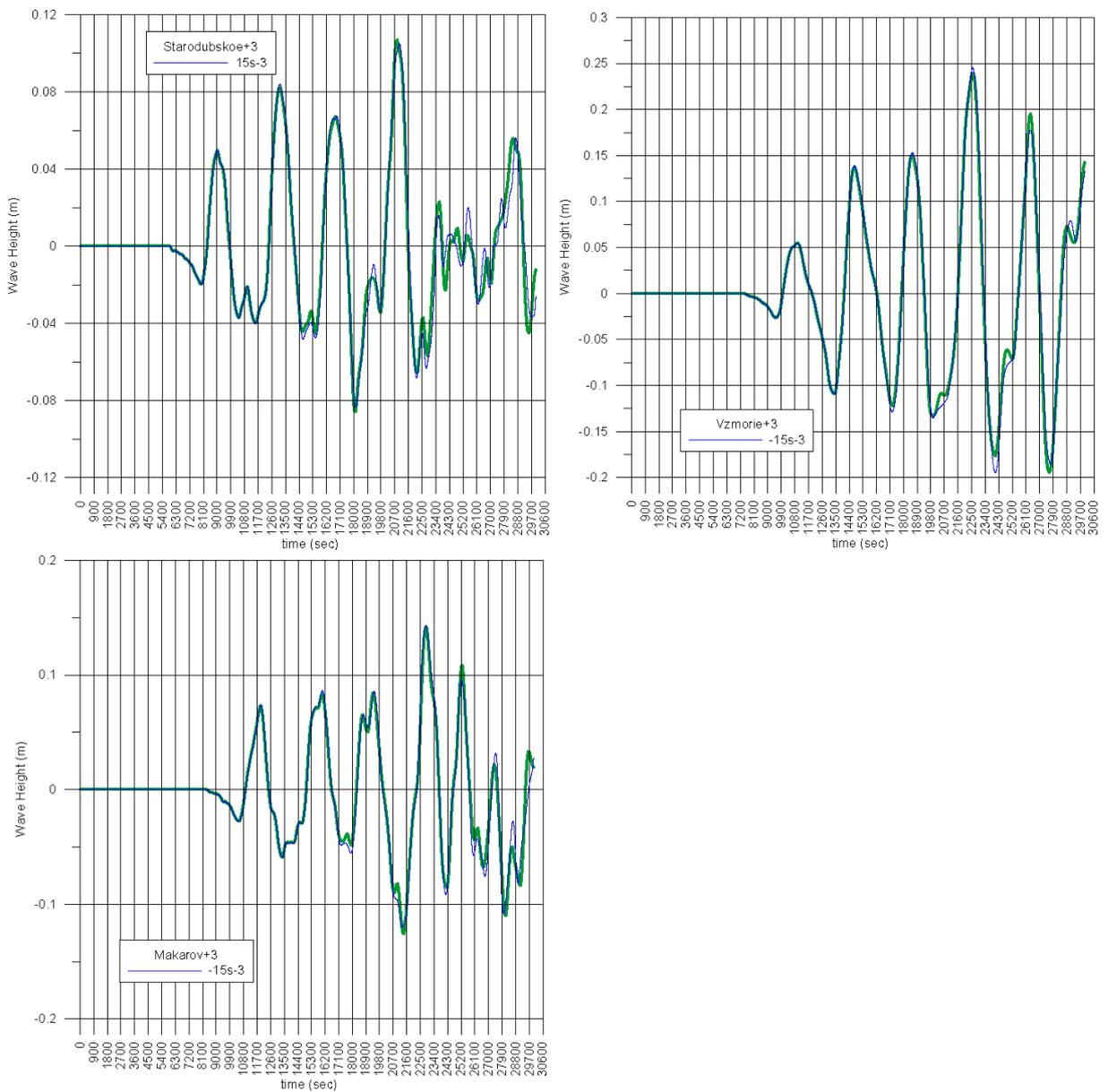
Графики (Рисунок 13) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «6d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная** модель, расчет в области «84-3» – **зеленая, жирная, сплошная**. **Линейная** модель, расчет в области «84-2» – **красная, жирная, штрих**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-3» – **синяя, тонкая, сплошная**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-2» – **черная, тонкая, штрих**.





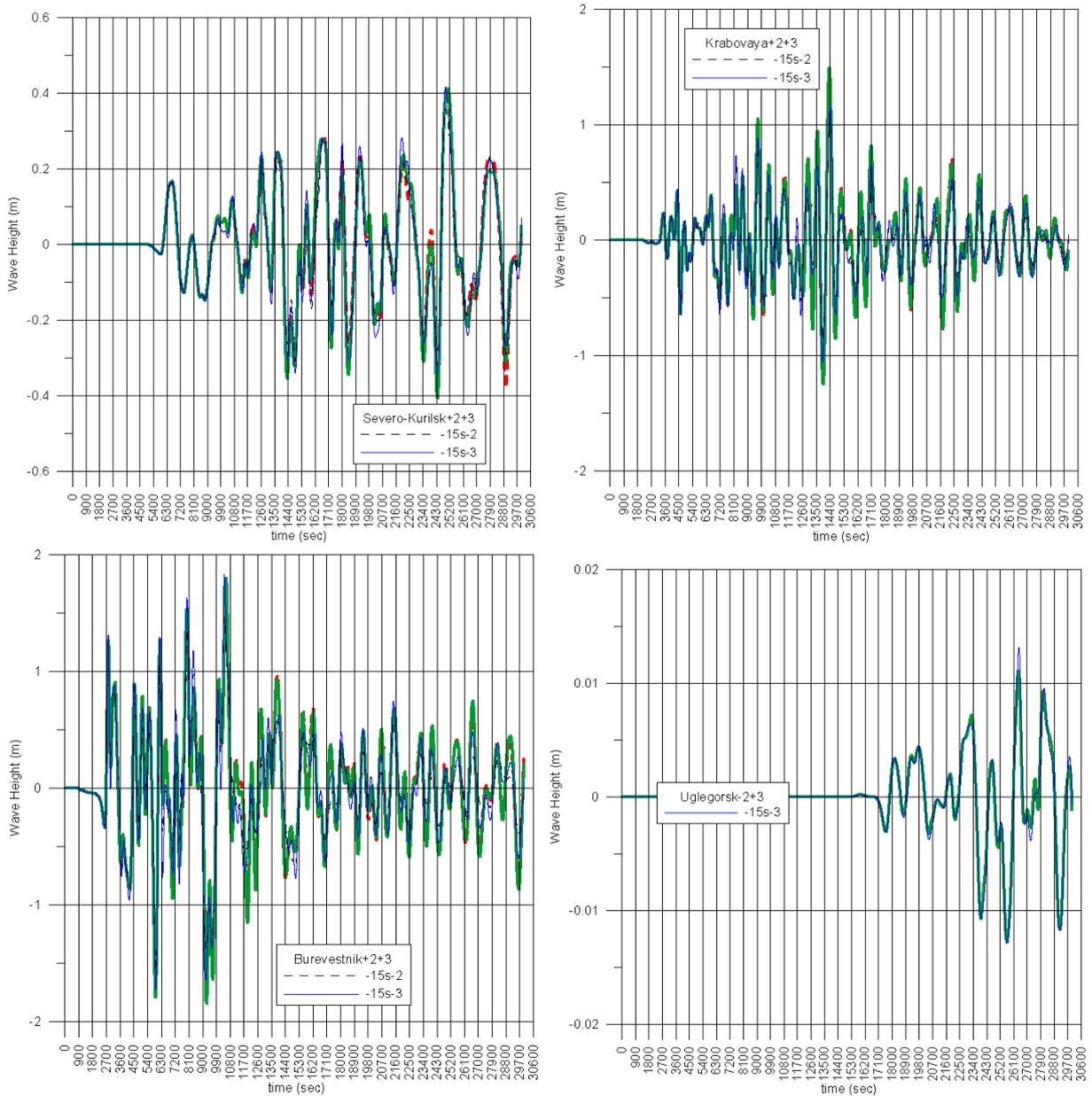


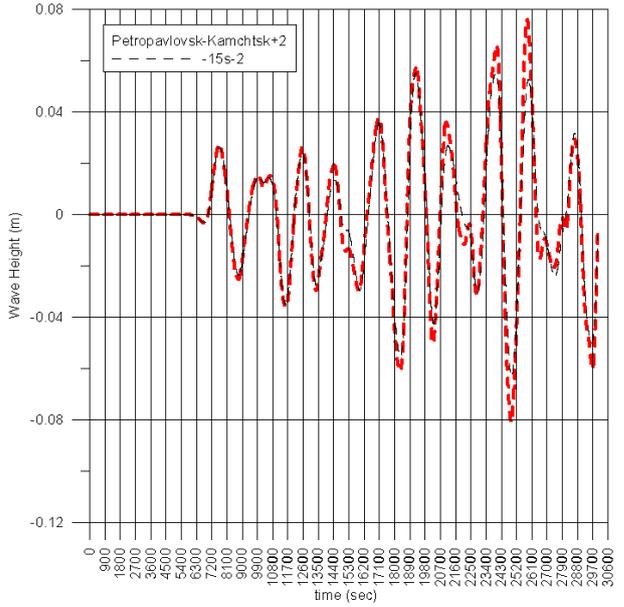
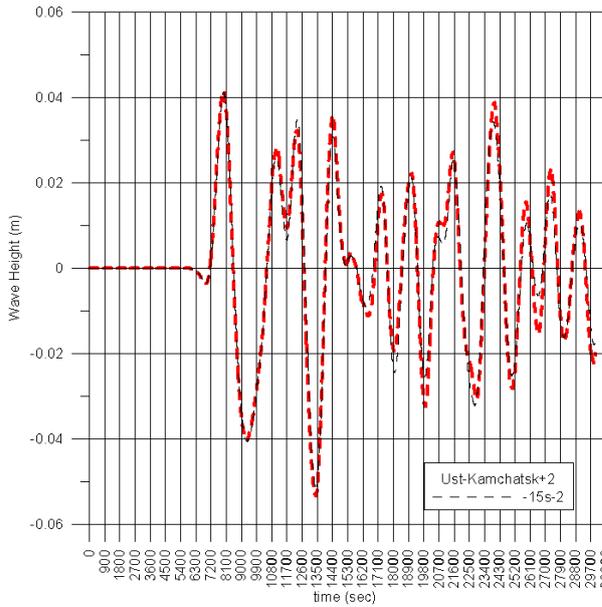
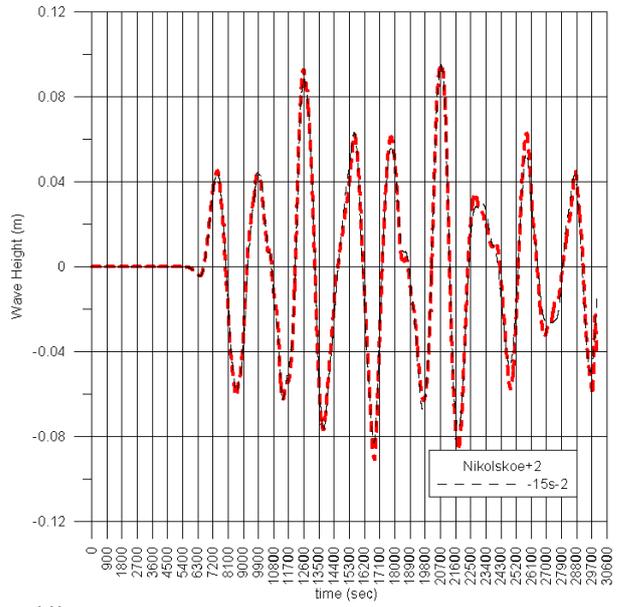
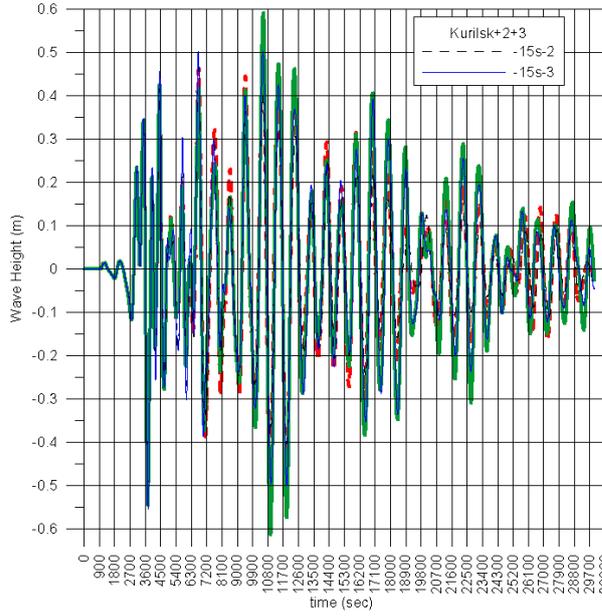
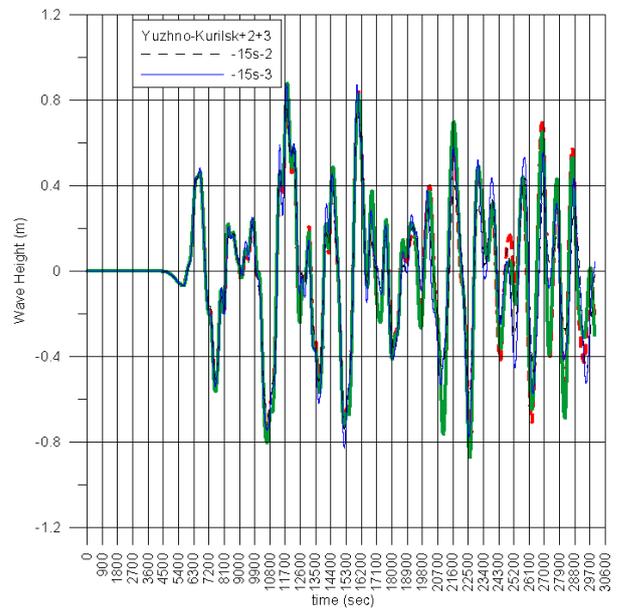
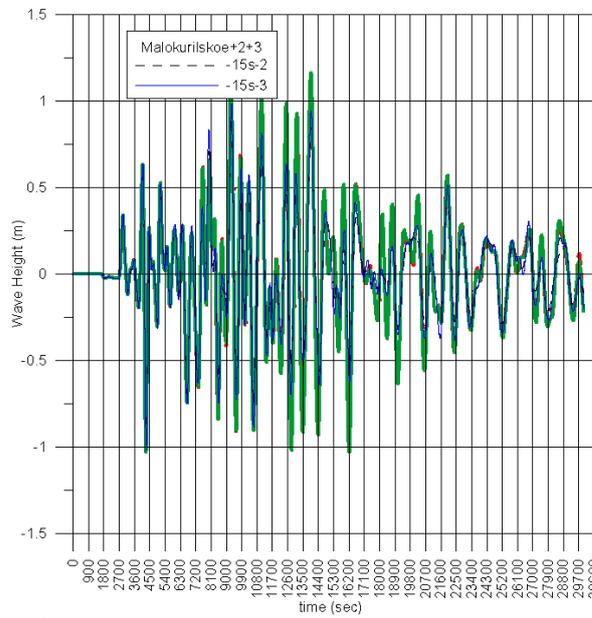


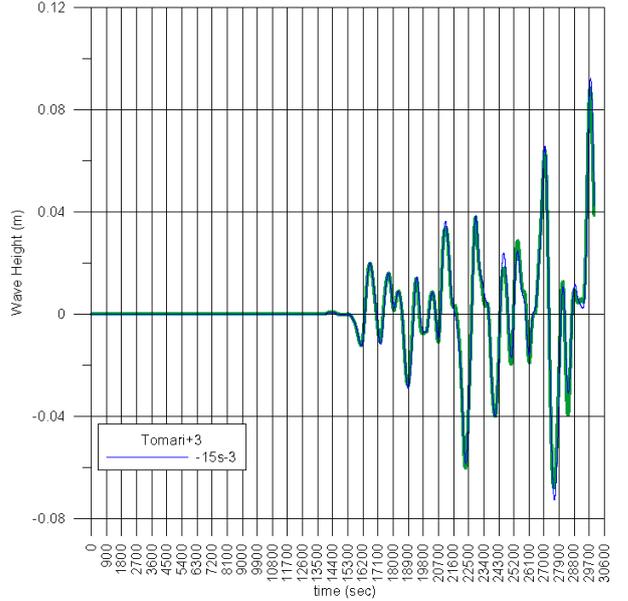
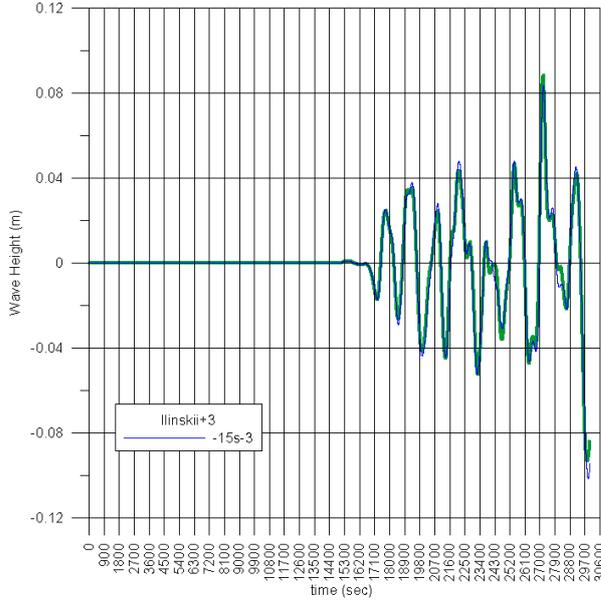
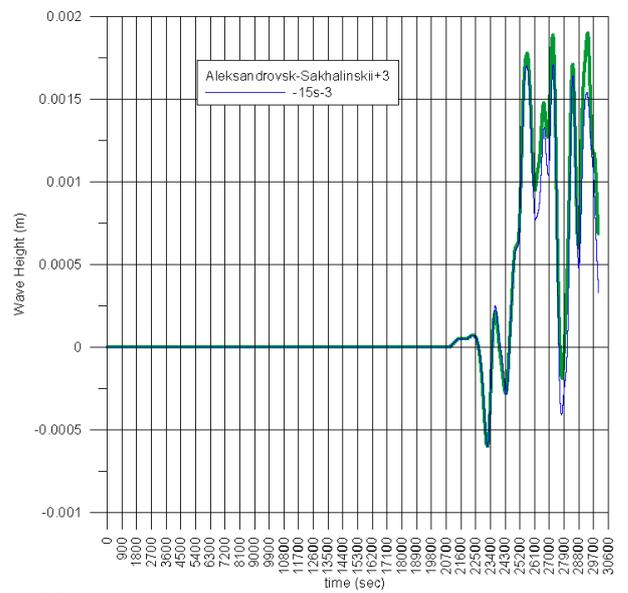
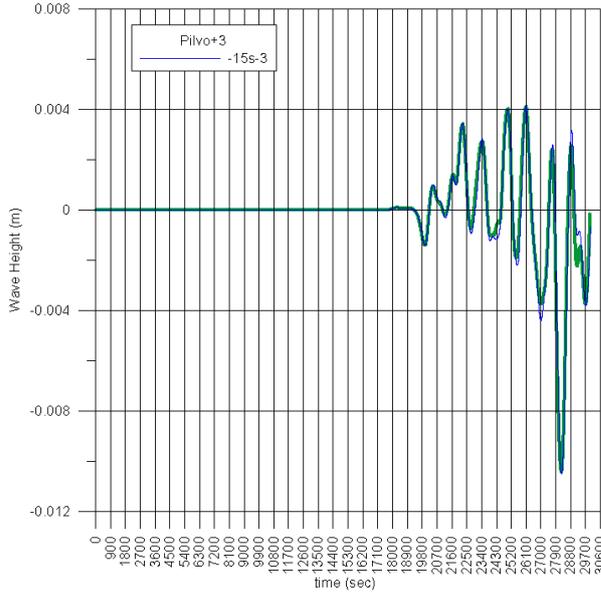
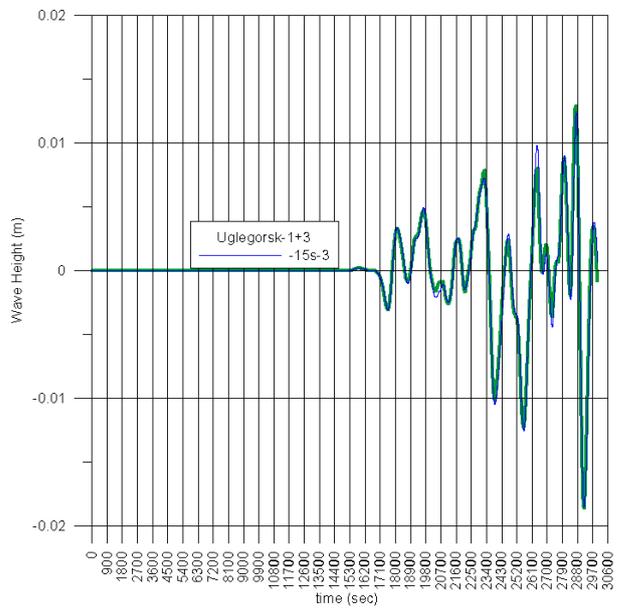
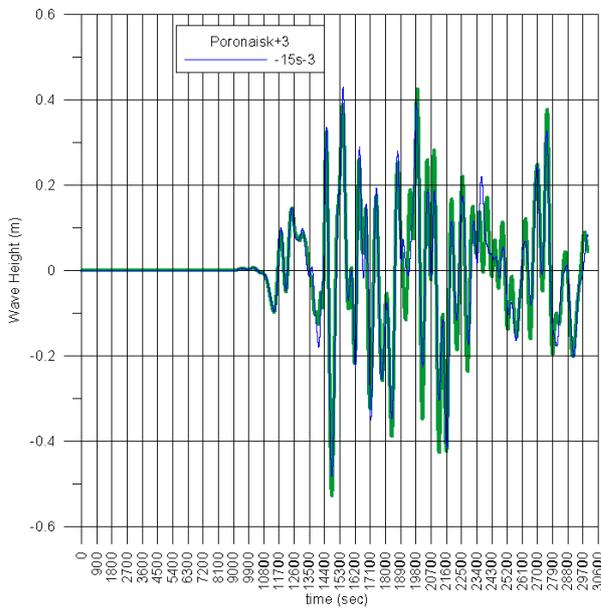


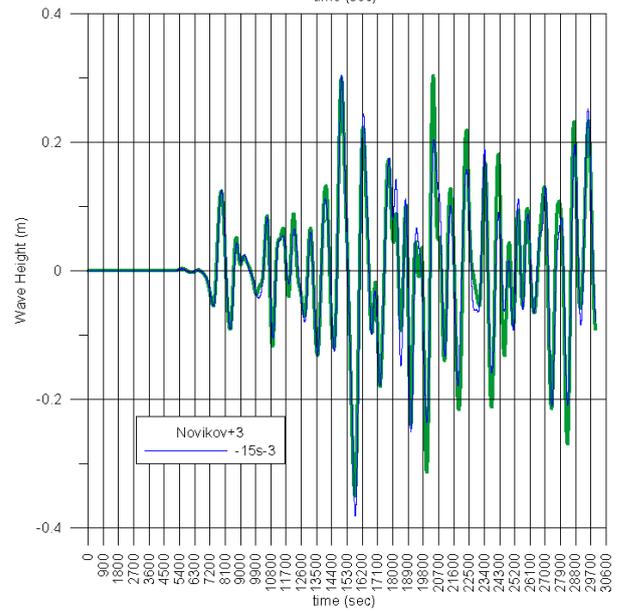
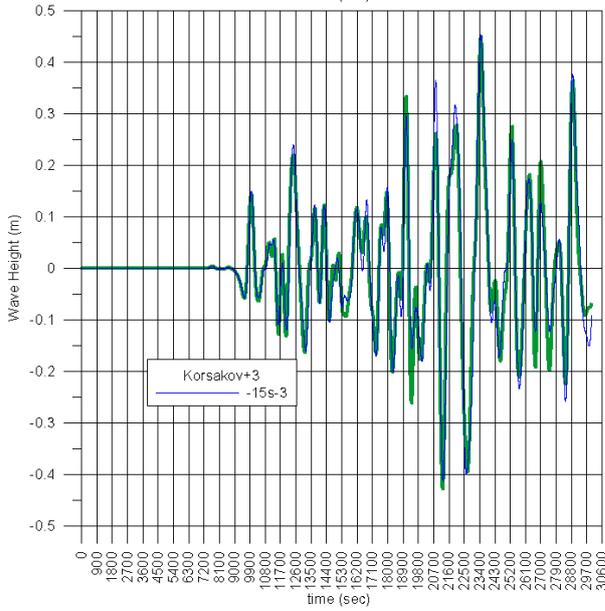
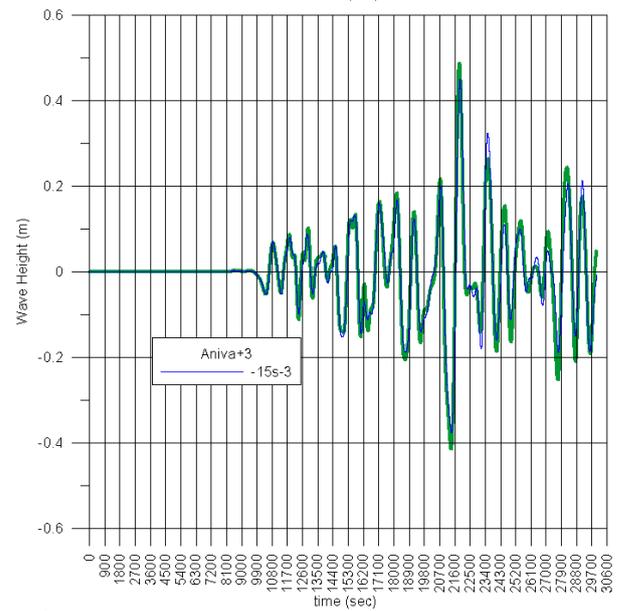
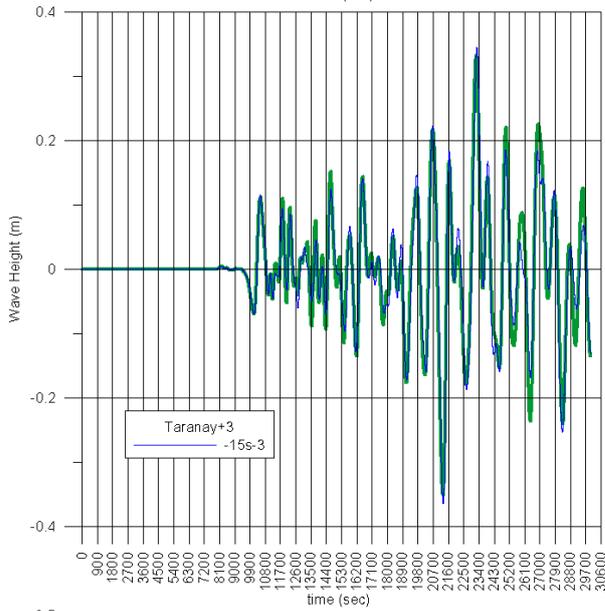
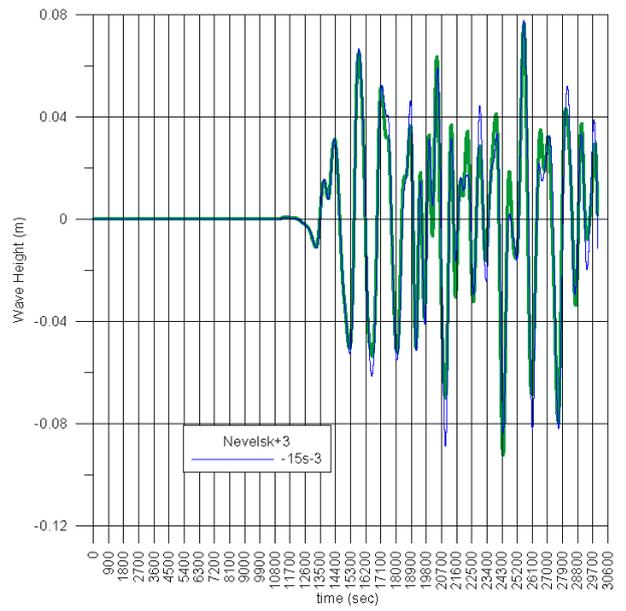
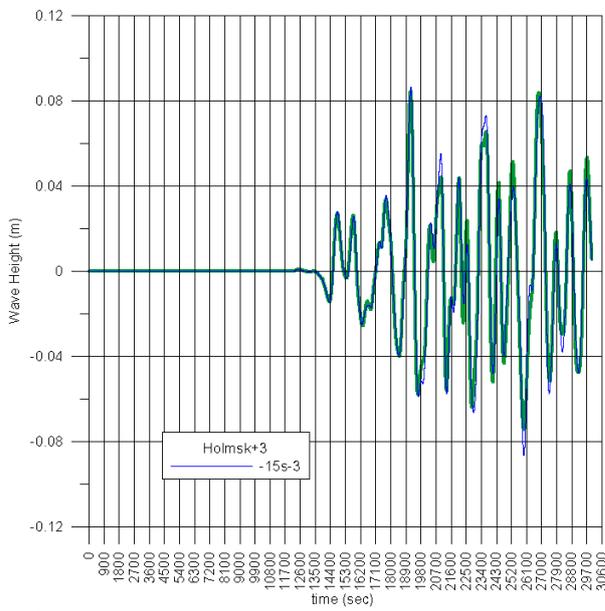
**Рисунок 13.** Графики иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «6д» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-3» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-3» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.

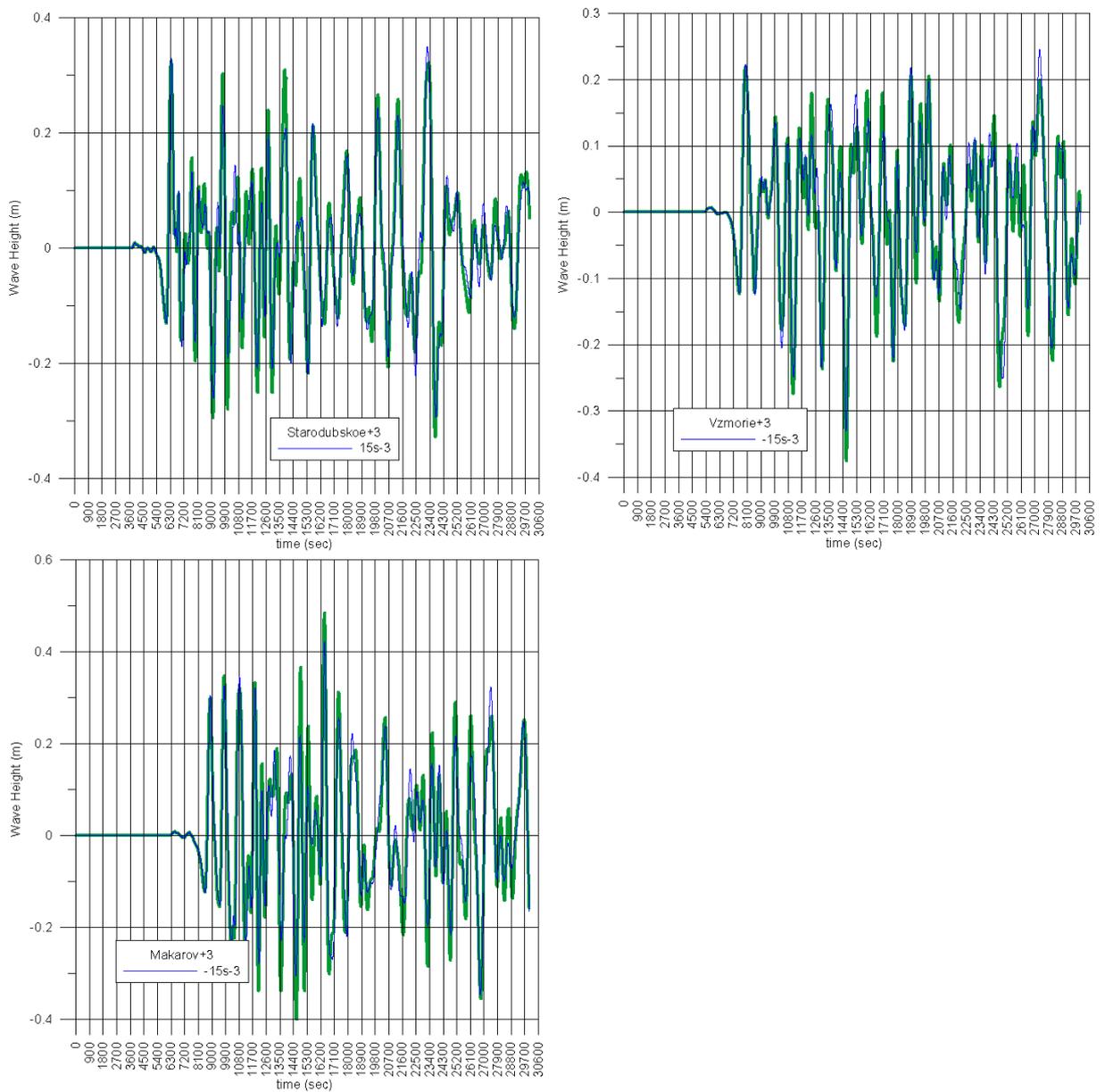
Графики (Рисунок 14) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «12b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (**тонкие** кривые) и в линейной постановке (**жирные** кривые). **Линейная** модель, расчет в области «84-3» – **зеленая, жирная, сплошная**. **Линейная** модель, расчет в области «84-2» – **красная, жирная, штрих**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-3» – **синяя, тонкая, сплошная**. **Нелинейная** модель, расчет в области «84-2» – **черная, тонкая, штрих**.





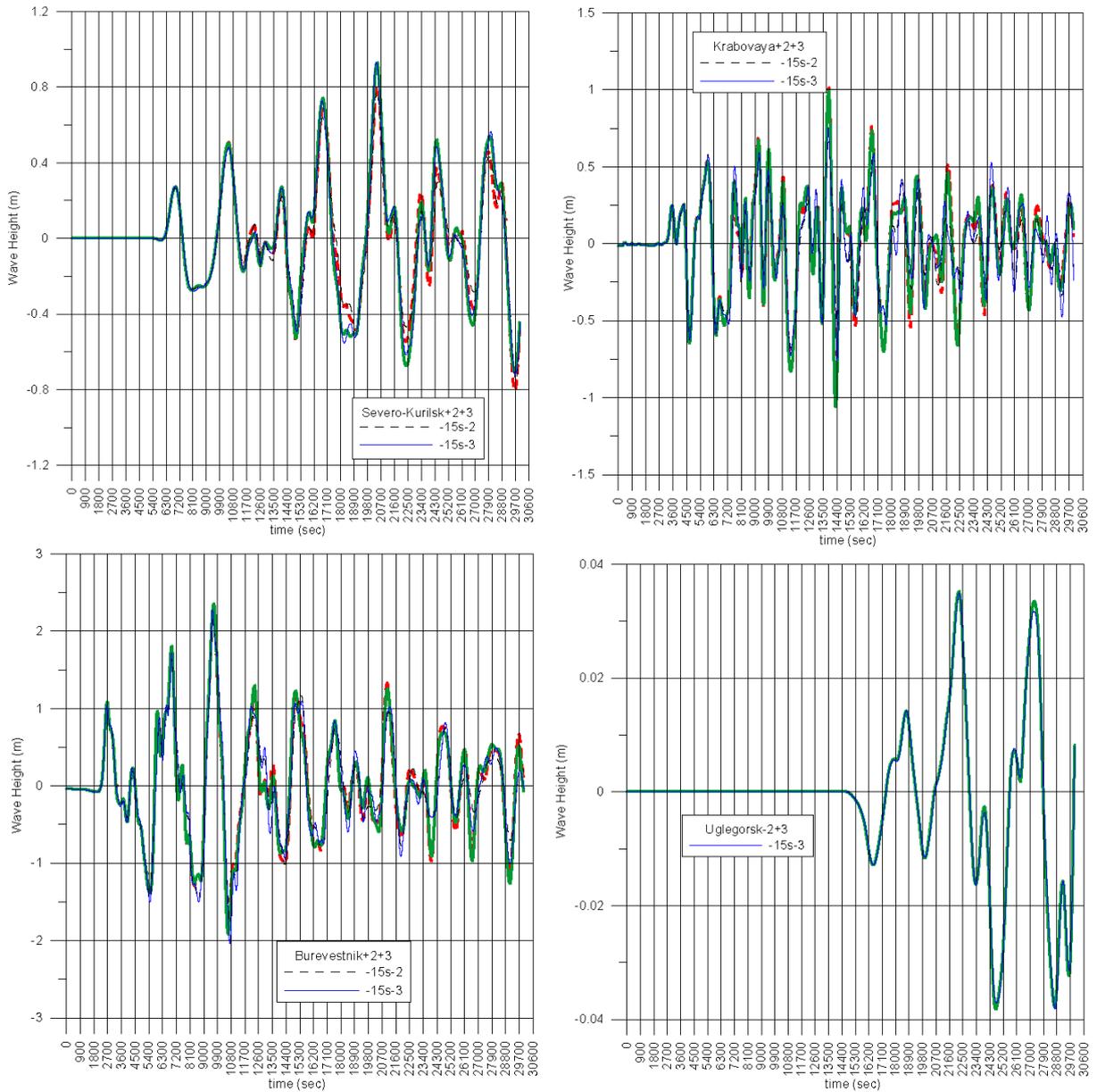


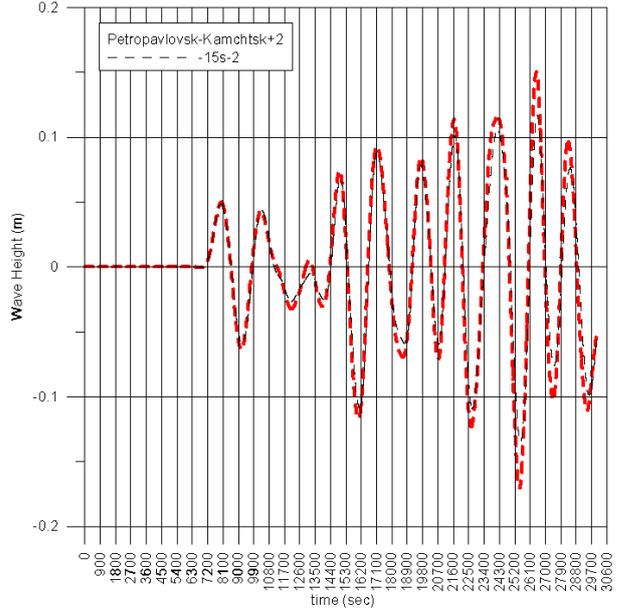
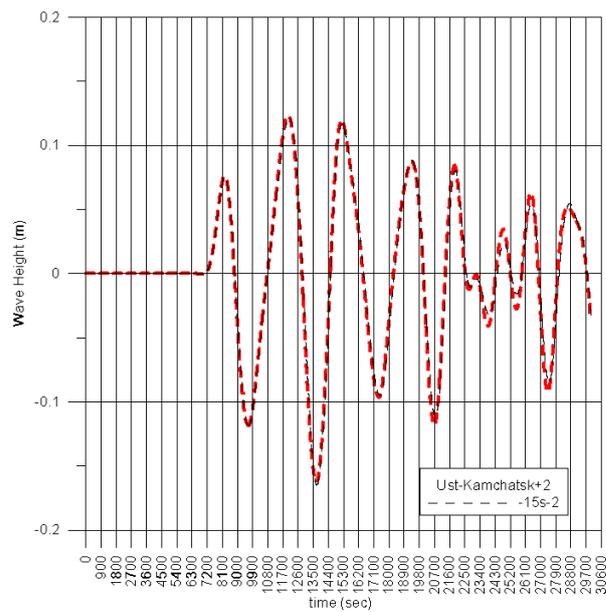
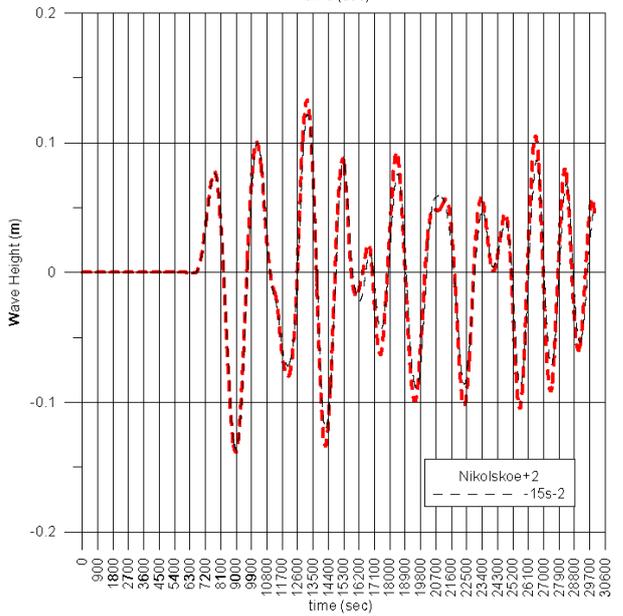
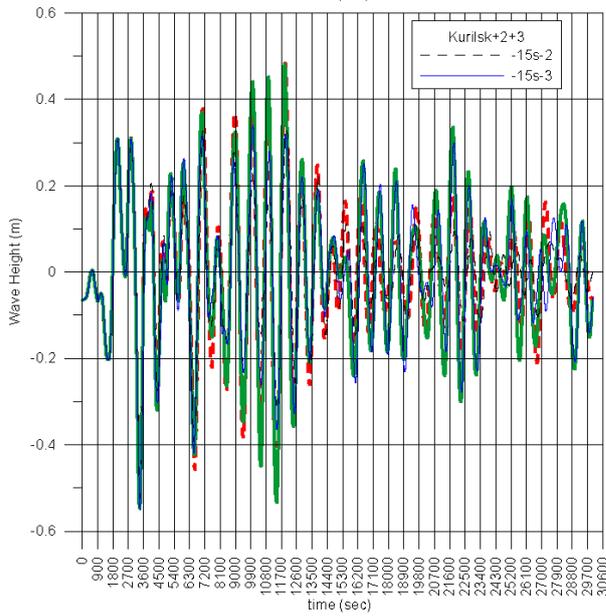
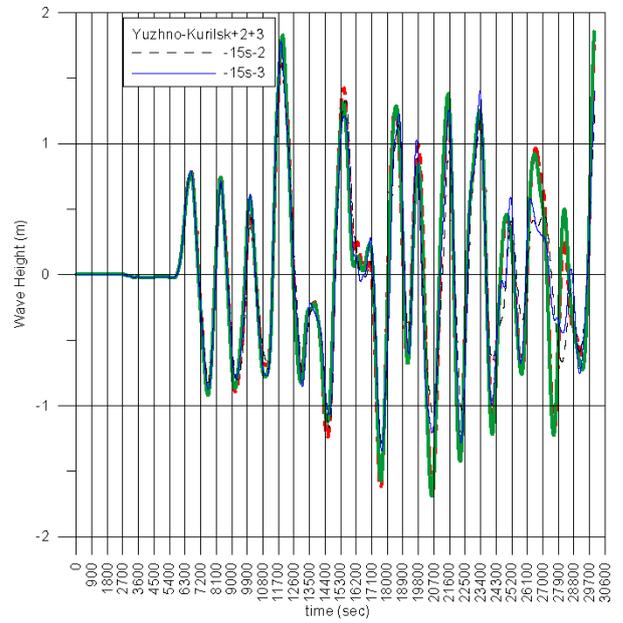
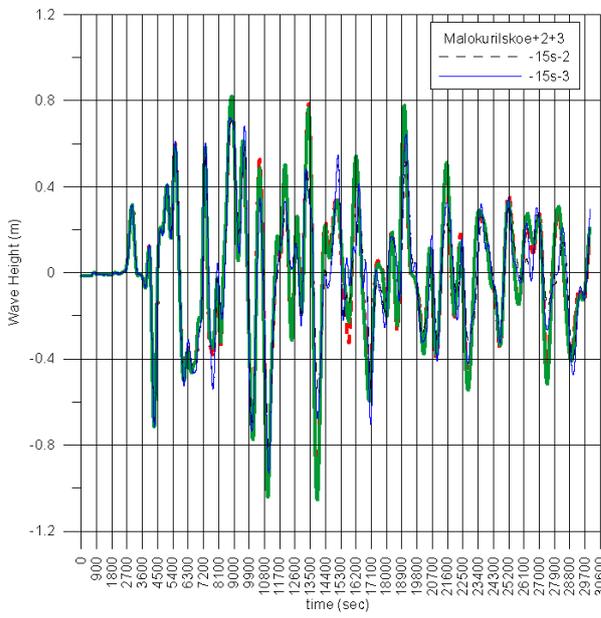


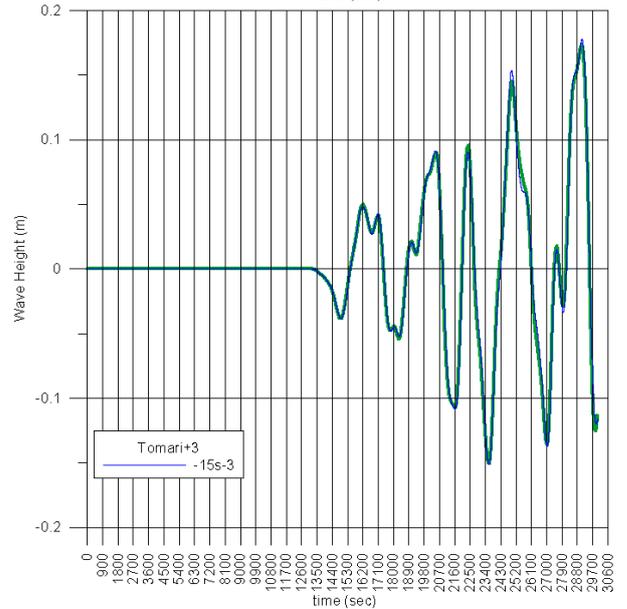
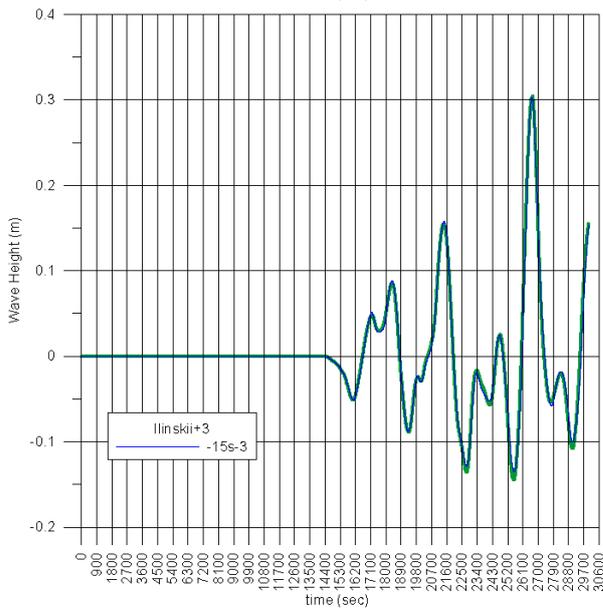
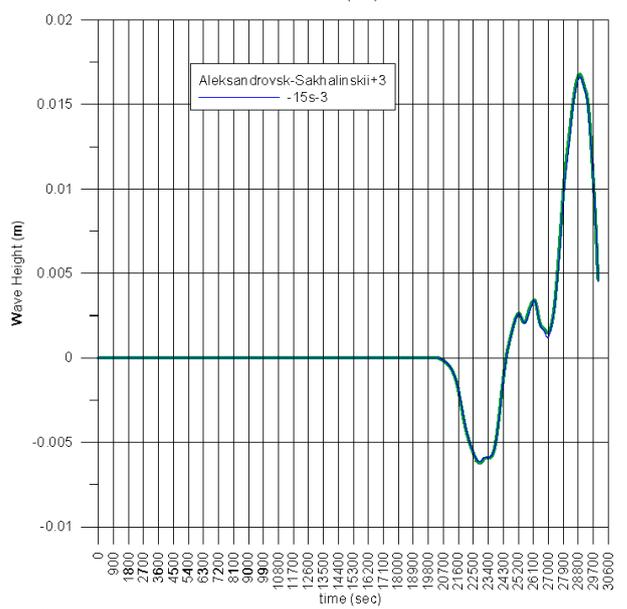
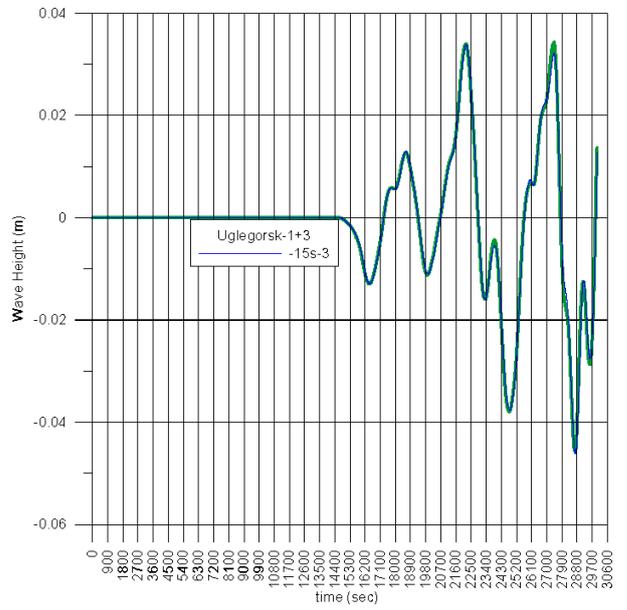
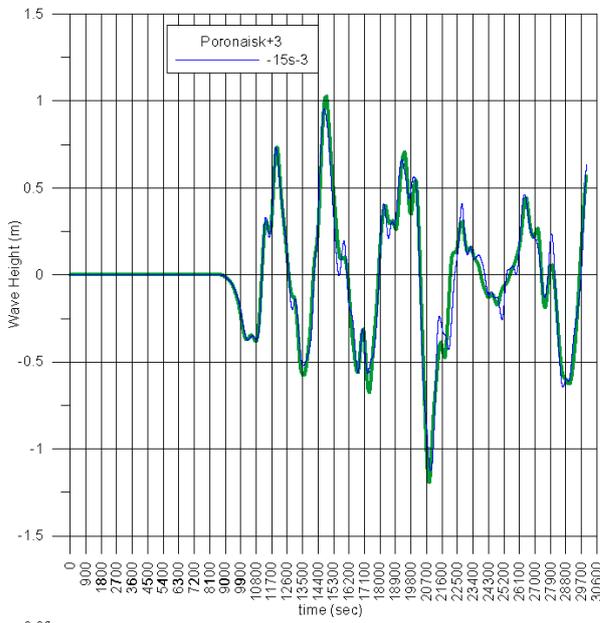


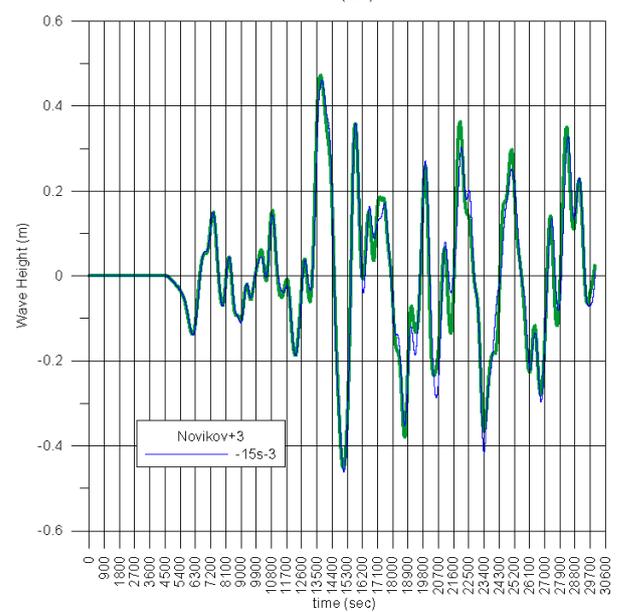
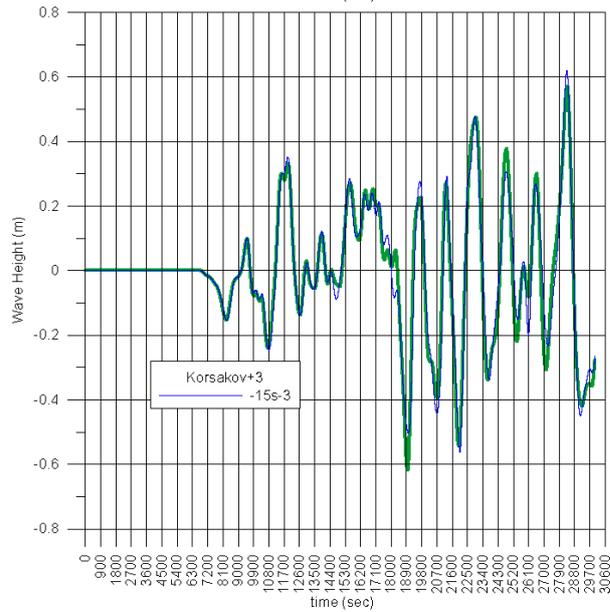
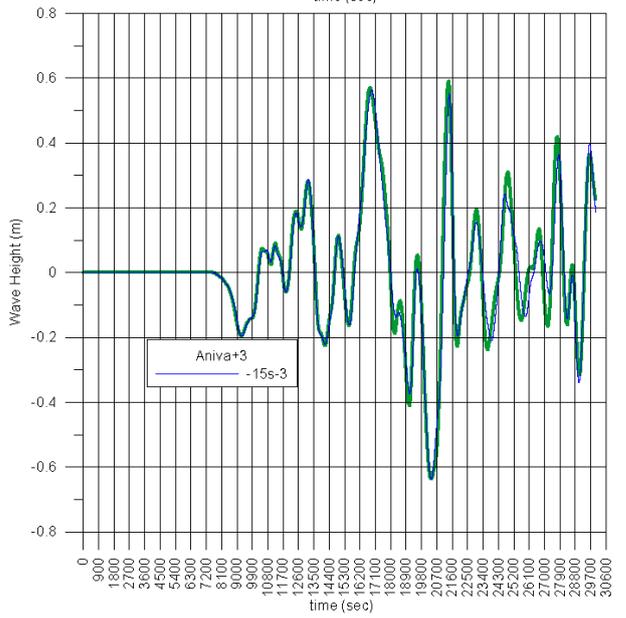
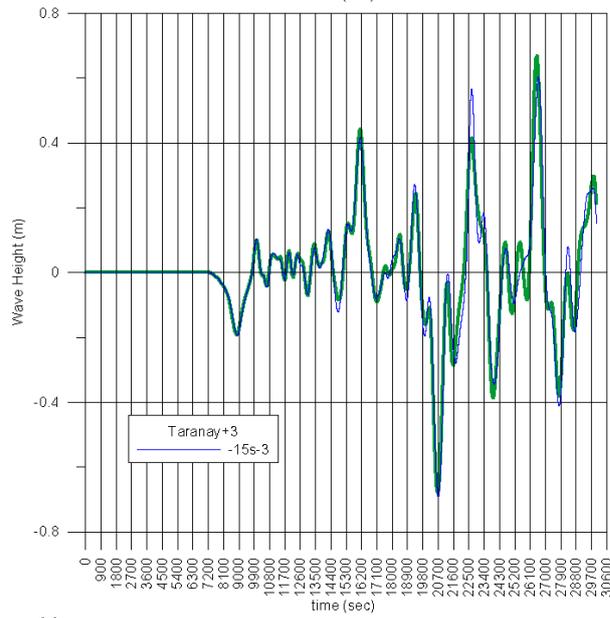
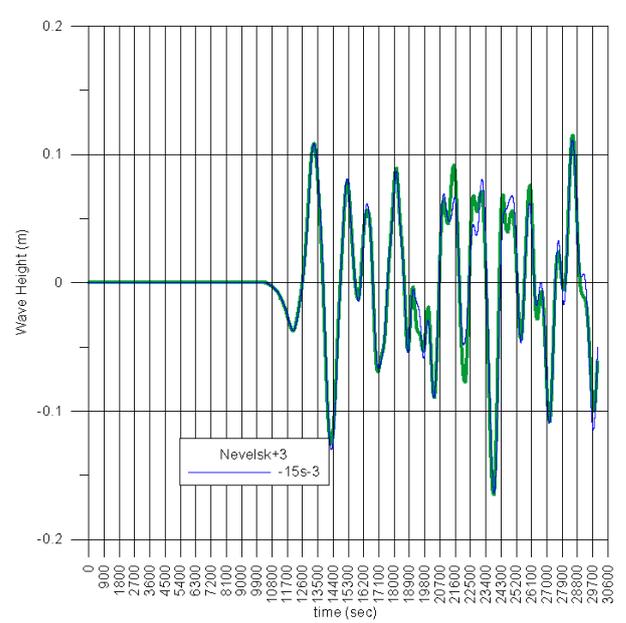
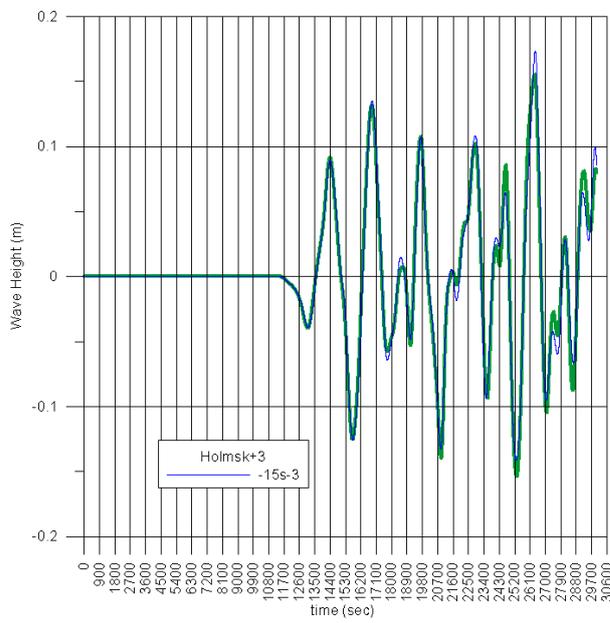
**Рисунок 14.** Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «12b» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-3» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-3» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.

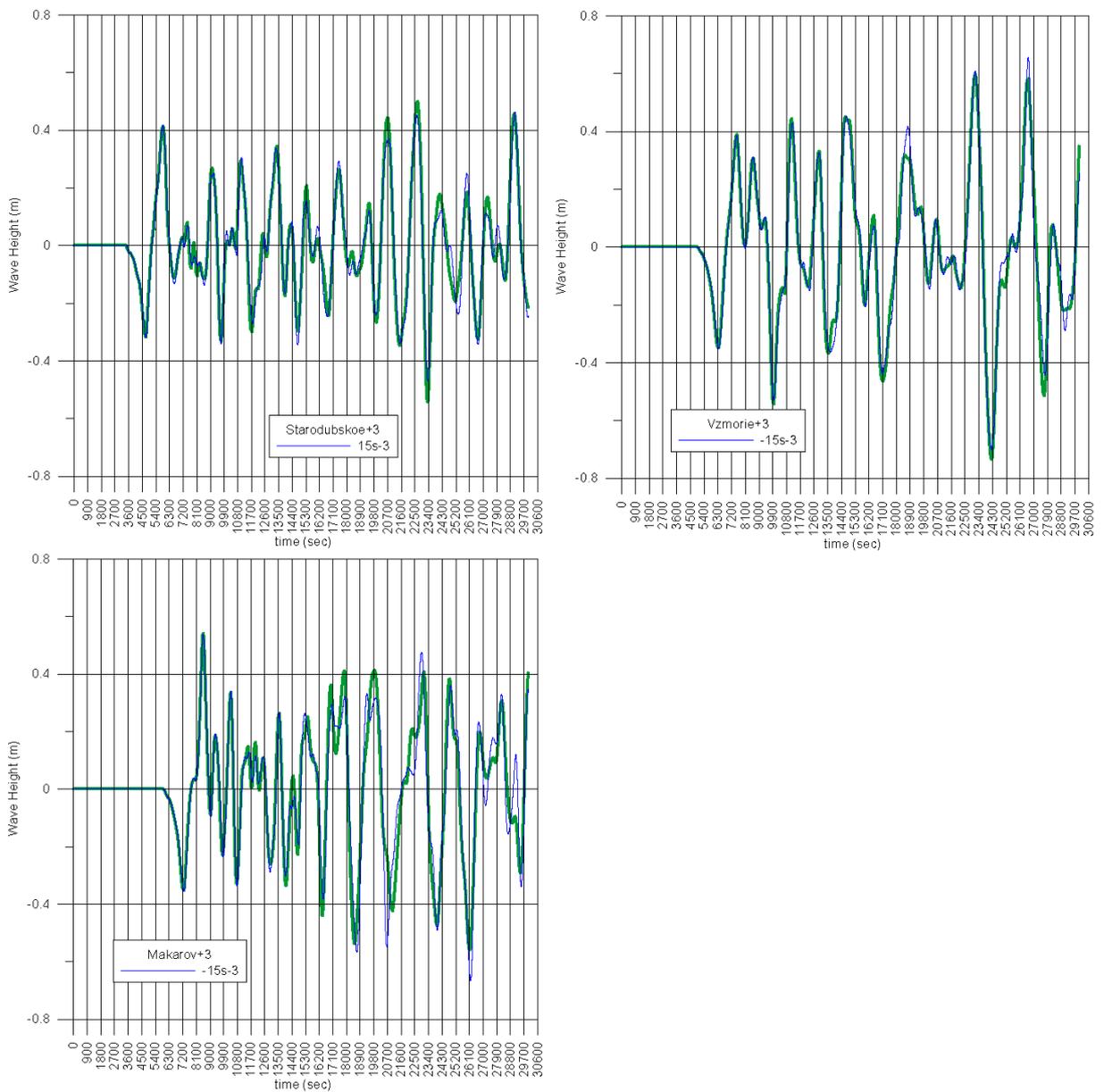
Графики (Рисунок 15) иллюстрируют сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «12d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). **Линейная модель, расчет в области «84-3» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-3» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.**











**Рисунок 15.** Сравнение результатов расчетов на 15-секундной сетке распространения цунами от источника «12d» с магнитудой 8.4 в подобластях «84-2» (штрих) «84-3» (сплошные линии) с учетом нелинейности (тонкие кривые) и в линейной постановке (жирные кривые). Линейная модель, расчет в области «84-3» – зеленая, жирная, сплошная. Линейная модель, расчет в области «84-2» – красная, жирная, штрих. Нелинейная модель, расчет в области «84-3» – синяя, тонкая, сплошная. Нелинейная модель, расчет в области «84-2» – черная, тонкая, штрих.