

ЭКОНОМИЧНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ¹

Бейзель С.А.

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: beisel_s@ngs.ru*

Гусяков В.К.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: gvk@sccc.ru*

Елецкий С.В.

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: s_v_e@ngs.ru*

Федотова З.И.

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: zf@ict.nsc.ru*

Чубаров Л.Б.

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: chubarov@ict.nsc.ru*

Efficient approaches are discussed to improve the accuracy of results in tsunami wave modeling. Examples of successful application of these approaches to the solving of problems in model and real water areas are given. Results of numerical experiments which were carried out by the authors imply that proposed methods enable to maintain desired accuracy of modeling tsunami wave transformation along paths from source to protected part of the coast within acceptable limits on the computational resources.

1. Введение.

Исследования особенностей проявления волн цунами у берегов Камчатки, проведенные авторами в последние годы, потребовали проведения ресурсоемких серийных вычислительных экспериментов. Близкие по характеру работы ведутся и сейчас для некоторых участков побережья Камчатки, зоны Приморья, Сахалина и Курильских островов, а также для побережья Восточного Средиземноморья. При этом использовались и будут использоваться численные алгоритмы, основанные на различных модификациях схемы Мак-Кормака, аппроксимирующей линейные и нелинейные модели мелкой воды с учетом донного трения, сферичности Земли и т.п. Исследование расчетных материалов и их сопоставление с известными натурными данными показали, что исходная минутная равномерная сетка не всегда обеспечивает требуемую точность. Так, значения амплитуд волн, рассчитанные для прибрежных мареографов на грубой сетке, оказываются сильно заниженными в тех случаях, когда акватории содержат протяженные мелководные зоны и резкие перепады глубин, а соответствующие цунамигенные землетрясения располагаются в глубоководных зонах.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (06-05-72014, 07-05-13583, 06-05-64869), программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН (проекты 28, 113), программы Государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации ИШ-931.2008.9, проектов INTAS 06-1000013-9236.

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 (I) находился в глубоководной зоне акватории, другой (II) – на мелководье. Численные эксперименты выполнялись на трех сетках (самая грубая – минутная, каждая последующая получалась уменьшением шага сетки вдвое). Изменения уровня свободной поверхности регистрировались на виртуальных мареографах, установленных вдоль берега.

Для расчета начальных возмущений использовалась «поршневая модель» возбуждения цунами, широко применяемая в задачах численного моделирования этих волн в случаях, когда известны параметры очага землетрясения. Такой подход впервые был применен Подъяпольским [3], затем использовался в работах Гусякова [4], Yamashita, Sato [5], Ward [6]. При построении соответствующего численного алгоритма использовались расчетные формулы, полученные в работе Гусякова [7]. Сравнение результатов с расчетами по формулам, приведенным в более поздней работе Okada [8], показало, что они совпадают с точностью до различий в реализации численных алгоритмов на разных ЭВМ. В принятой модели вычисление остаточных смещений дна океана производится для пространственной дислокационной модели очага землетрясения, описываемой следующим набором параметров: L – длина в плоскости разлома, W – ширина в плоскости разлома, δ – угол падения плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости), λ – направление подвижки в плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома), D_0 – величина подвижки по плоскости разлома, h_0 – глубина верхнего края разрыва.

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 рисунке 1, где пунктирными линиями изображены результаты, полученные на минутной сетке, сплошными тонкими – на 30-ти секундной, сплошными жирными – на 15-ти секундной.

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 II, полностью расположенного на мелководье. Здесь мареограммы, рассчитанные в тех же пунктах на различных сетках (рис. 1), 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 I с глубинами 10 и 2000 метров. Использование различных значений должно было подтвердить или опровергнуть гипотезу о важности именно неоднородности распределения глубин, а не их абсолютного значения. Результаты этих экспериментов (рис. 2) показали, что в акваториях с постоянной глубиной, независимо от ее значения, различий при расчетах на сетках с разной разрешающей способностью не наблюдается.

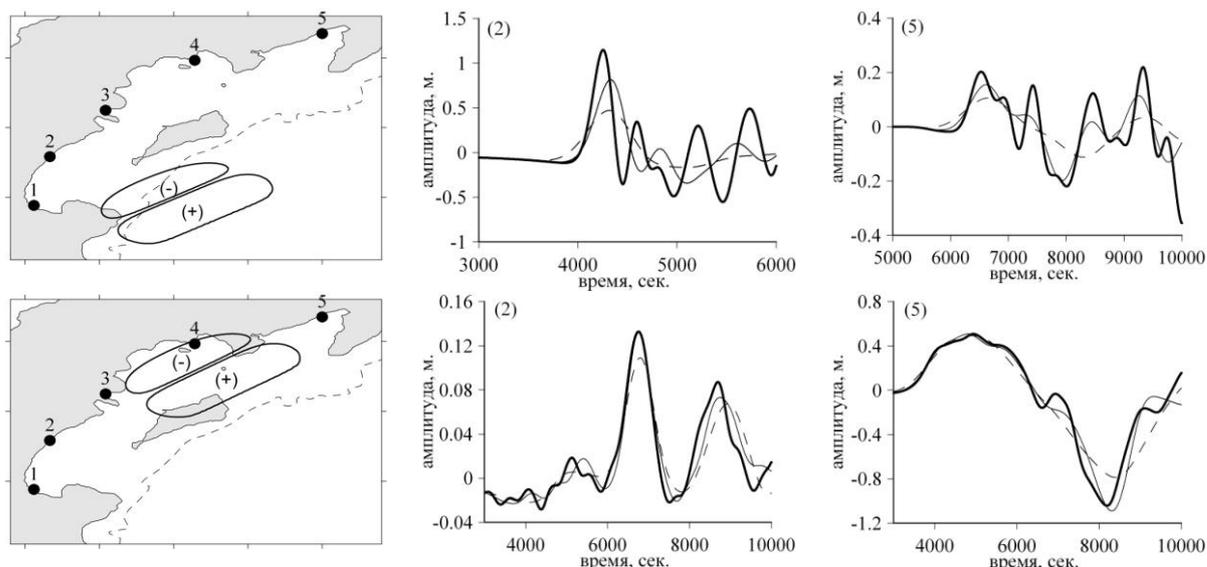


Рисунок 1. Верхние рисунки соответствуют источнику I, нижние – источнику II. Слева показано расположение источников, тонким пунктиром отмечена изобата 200м, к востоку от которой начинается глубоководная зона. Записи 2-го (в центре) и 5-го (справа) мареографов: пунктирная линия – минутная сетка, сплошная тонкая – полуминутная, сплошная жирная – четвертьминутная.

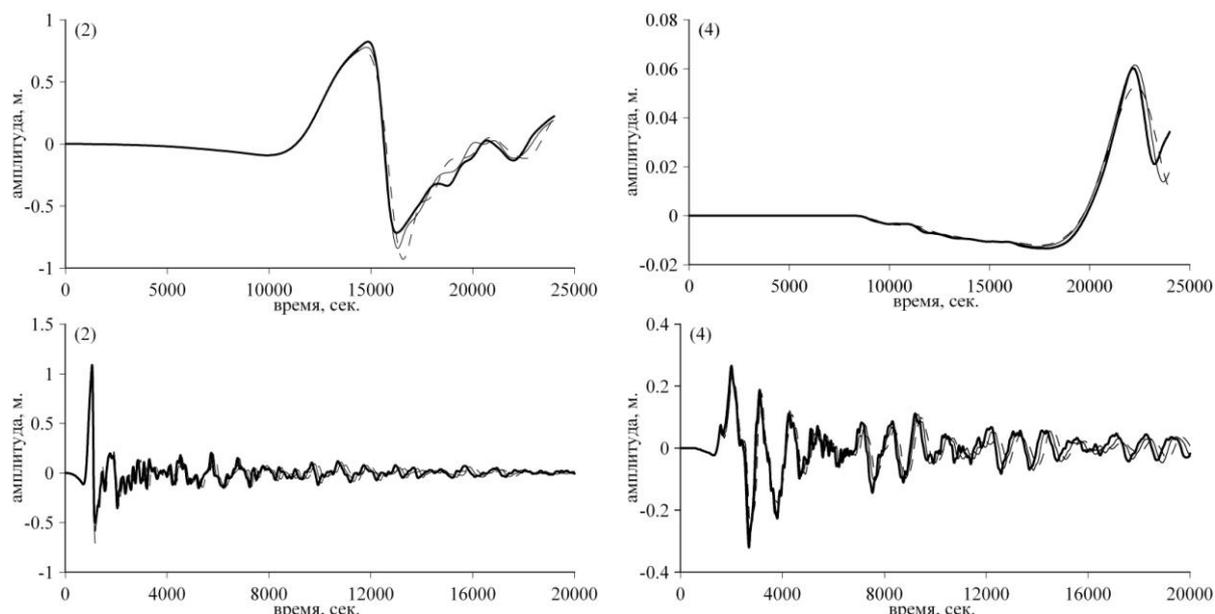


Рисунок 2. Мареограммы, рассчитанные для «глубоководного» источника I в областях с постоянной глубиной на различных сетках: пунктирная линия – минутная сетка, сплошная тонкая – полуминутная, сплошная жирная – четвертьминутная. Верхние графики соответствуют постоянной глубине 10 м, нижние – 2000 м.

Анализ обсуждаемого здесь эффекта завершается на материалах вычислительных экспериментов, выполненных для простой квазиодномерной задачи о распространении плоской одиночной волны в модельной акватории с кусочно-линейным рельефом дна, неизменным в направлении фронта волны (рис 3).

Такая модельная расчетная область применялась авторами ранее [1, 2] для выявления особенностей трансформации волн над неоднородным дном. Распространяющаяся в этой акватории волна не претерпевает воздействия геометрически сложных границ, однако характеристики ее трансформации определяются неоднородностью рельефа дна, который имитирует особенности рельефа дна в окрестности Курило-Камчатского глубоководного желоба.

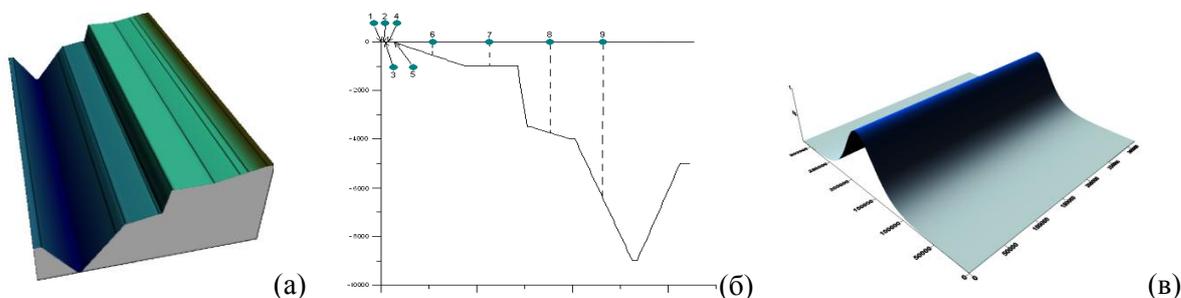


Рисунок 3. Постановка задачи для модельной акватории: (а) – рельеф дна, (б) – схема расстановки виртуальных мареографов; по вертикальной оси отложены значения глубины акватории; (в) – положение волны в начальный момент.

Размеры области по обоим направлениям одинаковы и равны 320000 м. Форма начального возмущения задавалась хорошо известной формулой $\eta|_{t=0} = a \cdot \cosh^{-2}(Y)$, $\vec{u}|_{t=0} = 0$, где $Y = \sqrt{\frac{3a}{4(H+a)}} \frac{y-y_0}{H}$, $y_0 = 230000$ м, $a = 1$ м. На линии берега ($y = 0$) и на боковых стенках ставились условия полного отражения; граница $y = 320000$ являлась свободной. В момент времени $t = 0$ волна распадалась на две, одна из которых уходила в сторону увеличения y -координаты, а вторая – в сторону мелководья. Расчеты проводились на двух сетках, первая из которых (грубая) определялась 257-ю разбиениями по каждому направлению, а вторая (мелкая) – 513-ю разбиениями.

Как показывают результаты (рис. 4), вблизи берега мареограммы, рассчитанные на различных сетках различаются как по амплитудам, так и по форме (по частотным характеристикам). При этом использование грубой сетки приводит к снижению амплитуд и упрощению формы волны. С удалением от берега или, что то же, с увеличением глубины, различия уменьшаются так, что в 7-м мареографе они сохраняются только в хвостовой части волны. Таким образом, результаты вычислительных экспериментов, выполненных как для модельных, так и для реальных акваторий, указывают на необходимость использования сеток с высокой разрешающей способностью, обеспечивающих достаточную точность расчета волновых характеристик в прибрежных зонах.

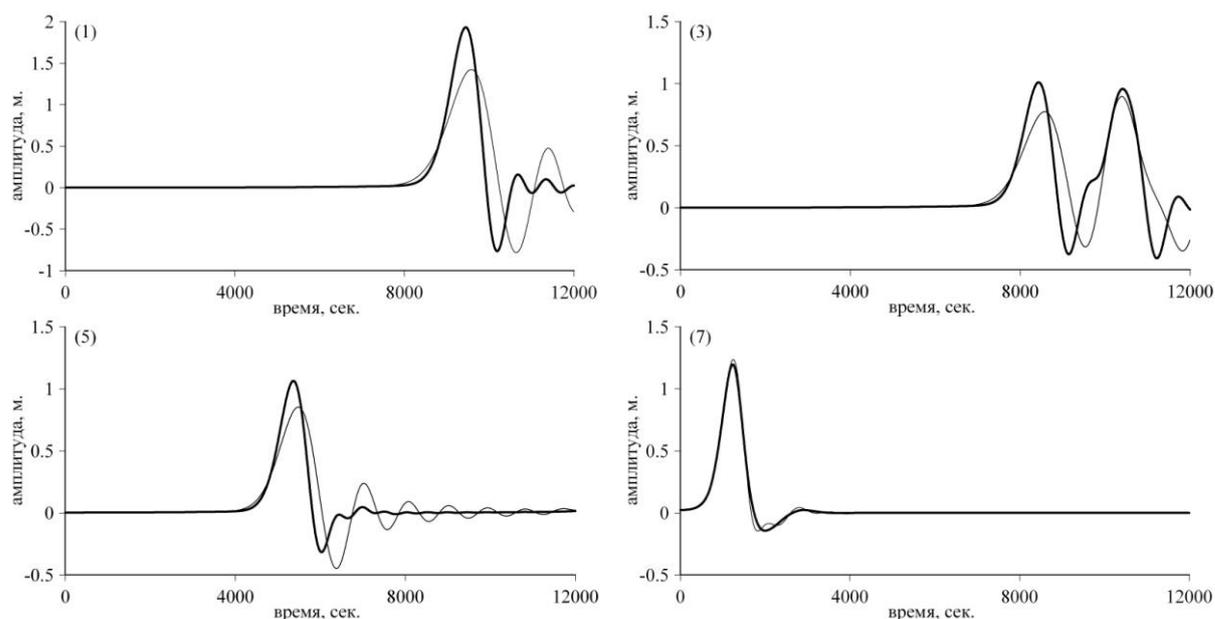


Рисунок 4. Мареограммы: тонкая линия – расчет на грубой сетке, жирная – на мелкой. Слева сверху в поле графиков указаны номера соответствующих мареографов.

2. Предлагаемые схемы организации расчетов.

Обеспечение необходимой точности расчета в таких ситуациях может быть достигнуто различными способами. За пределами обсуждения этой работы 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. 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 ω , содержащей пункты, требующие повышенной точности результатов, с использованием мелкой сетки с шагом по пространству 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 Ω малой подобласти ω , представляющей особый исследовательский интерес и содержащей совокупность защищаемых пунктов или часть этой совокупности;
2. расчет в области Ω на грубой сетке с шагом h с записью мареограмм по периметру $\partial\omega$ области ω ;
3. пересчет (интерполяция) значений мареограмм по периметру $\partial\omega$ с шагом h_1 ;
4. расчет волнового режима в области ω с использованием пересчитанных на предыдущем шаге алгоритма значений на $\partial\omega$ в качестве краевых условий.

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

1. выбор подобласти ω и момента времени t_z на основе анализа результатов предварительных расчетов;
2. расчет в области Ω 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 Ω , выделенной в качестве подобласти ω ;
3. пересчет (интерполяция) значений сохраненных волновых полей в области ω на мелкую сетку с шагом h_1 ;
4. расчет в области ω 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 .

3. Расчеты для модельных акваторий.

Иллюстрация возможностей указанных методик будет начата с задач о трансформации волн в уже упомянутой выше модельной акватории. Первая задача, на которой тестировалась технология «заморозки», – это задача о распространении одиночной волны, параметры которой совпадали с указанными выше. Гребень волны в начальный момент находился над точкой с координатой 175000 м по направлению OY (рис. 5).

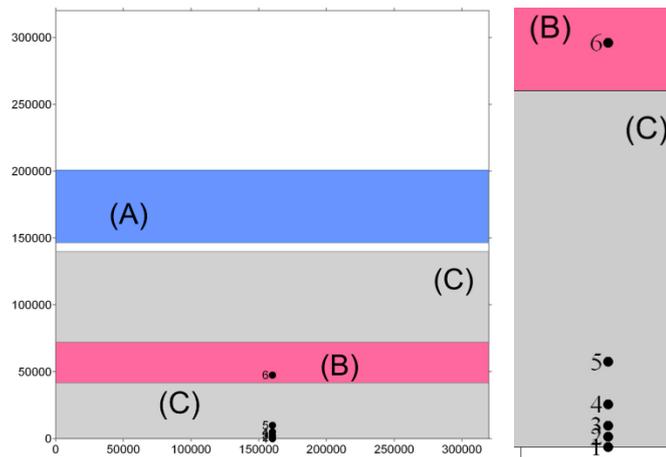


Рисунок 5. Схема первой тестовой задачи: слева – начальное положение одиночной волны (А), возвышение свободной поверхности в момент «заморозки» (В), область «заморозки» (С) и расположение мареографов (справа).

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, 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. 6) показали, что во всех мареографных точках расчет с использованием технологии «заморозки» практически совпадает с эталонным, незначительное расхождение наблюдается только в «хвостах» мареограмм.

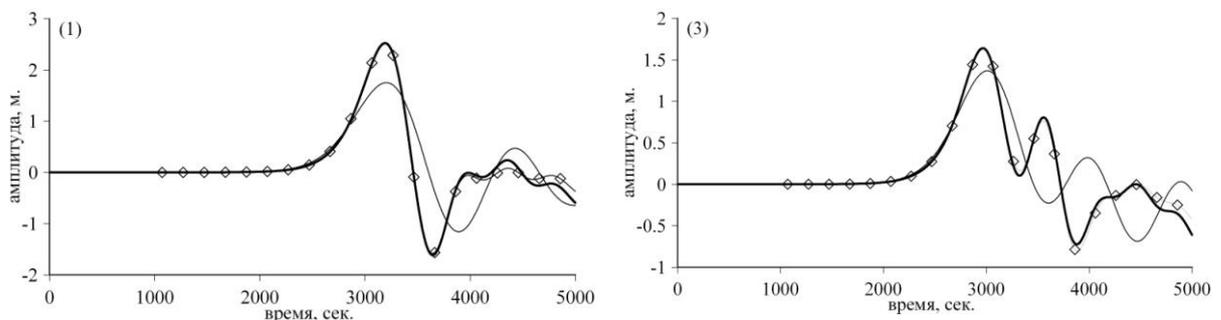


Рисунок 6. Мареограммы, рассчитанные в ходе решения первой модельной задачи. Кривые, соответствующие расчетам во всей области на всё время расчета, отрисованы тонкой линией (грубая сетка) и жирной линией (мелкая сетка), тонкой линией с маркерами отрисованы результаты расчета с «заморозкой». Слева вверху в поле графиков указаны номера соответствующих мареографов.

Постановка второй модельной задачи преследовала цель исследования зависимости результатов, получаемых с использованием метода «заморозки» и используемых впоследствии в качестве начальных данных для расчета на мелкой сетке, от времени фиксации результатов моделирования на грубой сетке, а также влияния положения и ориентации локализованного источника начального возмущения относительно защищаемых пунктов на точность получаемых результатов. При этом вычислительные эксперименты проводились в той же модельной квазиодномерной акватории, а в качестве начальных возвышений были использованы верхние половины эллипсоидов с различным начальным положением и ориентацией относительно береговой линии.

Высота таких возмущений была равна 1 м, а малая и большая оси – 40000 м и 100000 м, соответственно. «Заморозка» расчетных полей выполнялась в различные моменты времени. Схема задачи в случае, когда начальное возвышение было

расположено в центре области (*первый* вариант) и его большая ось была направлена параллельно береговой линии, изображена на рис. 7.

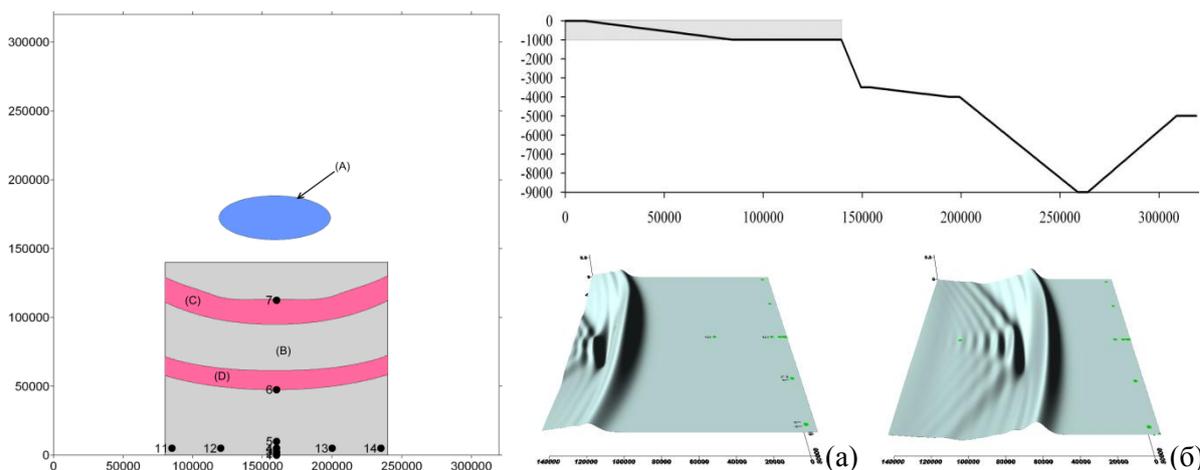


Рисунок 7. Схема 1-го варианта 2-й тестовой задачи, начальное возвышение (A), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» (C) – $t_z \approx 535$ сек., (D) – $t_z \approx 1070$ сек.; справа сверху – схематическое изображение рельефа дна с выделением области «заморозки», справа внизу – волновые поля в моменты заморозки $t_z \approx 535$ сек. (a) и $t_z \approx 1070$ сек. Все линейные размеры указаны в метрах.

Рассчитанные для этого варианта мареограммы представлены на рисунке 8. Заметим, что на последующих рисунках, если это не оговорено особо, кривые, соответствующие расчетам во всей области на всё время расчета, отрисованы жирной линией (грубая сетка) и тонкой линией (мелкая сетка), пунктиром – результаты расчета с ранней «заморозкой», тонкой линией с маркерами – результаты расчета с поздней «заморозкой». Слева сверху в поле графиков указаны номера соответствующих мареографов. Слева сверху в поле графиков указаны номера соответствующих мареографов.

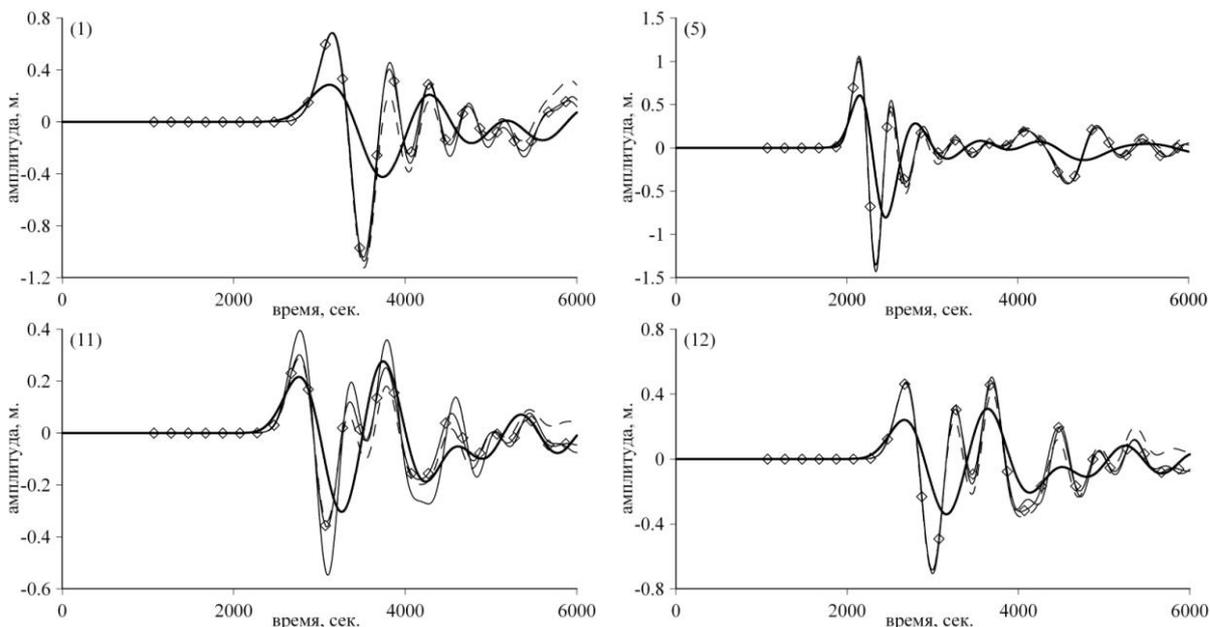


Рисунок 8. Мареограммы, рассчитанные в ходе решения 1-го варианта 2-й модельной задачи.

В первой и пятой мареографных точках (расположенных по центру области) кривые, соответствующие более поздней «заморозке» ($t_z \approx 1070$ сек), практически совпадают с «эталонной» мареограммой. Мареограммы, рассчитанные в условиях

ранней «заморозки» ($t_z \approx 535$ сек.), ведут себя в «хвостах» этих записей несколько хуже, что особенно заметно в точке 1. Это различие, по-видимому, происходит из-за того, что к моменту «заморозки» в малую область ω еще не вошла некоторая существенная часть возмущения.

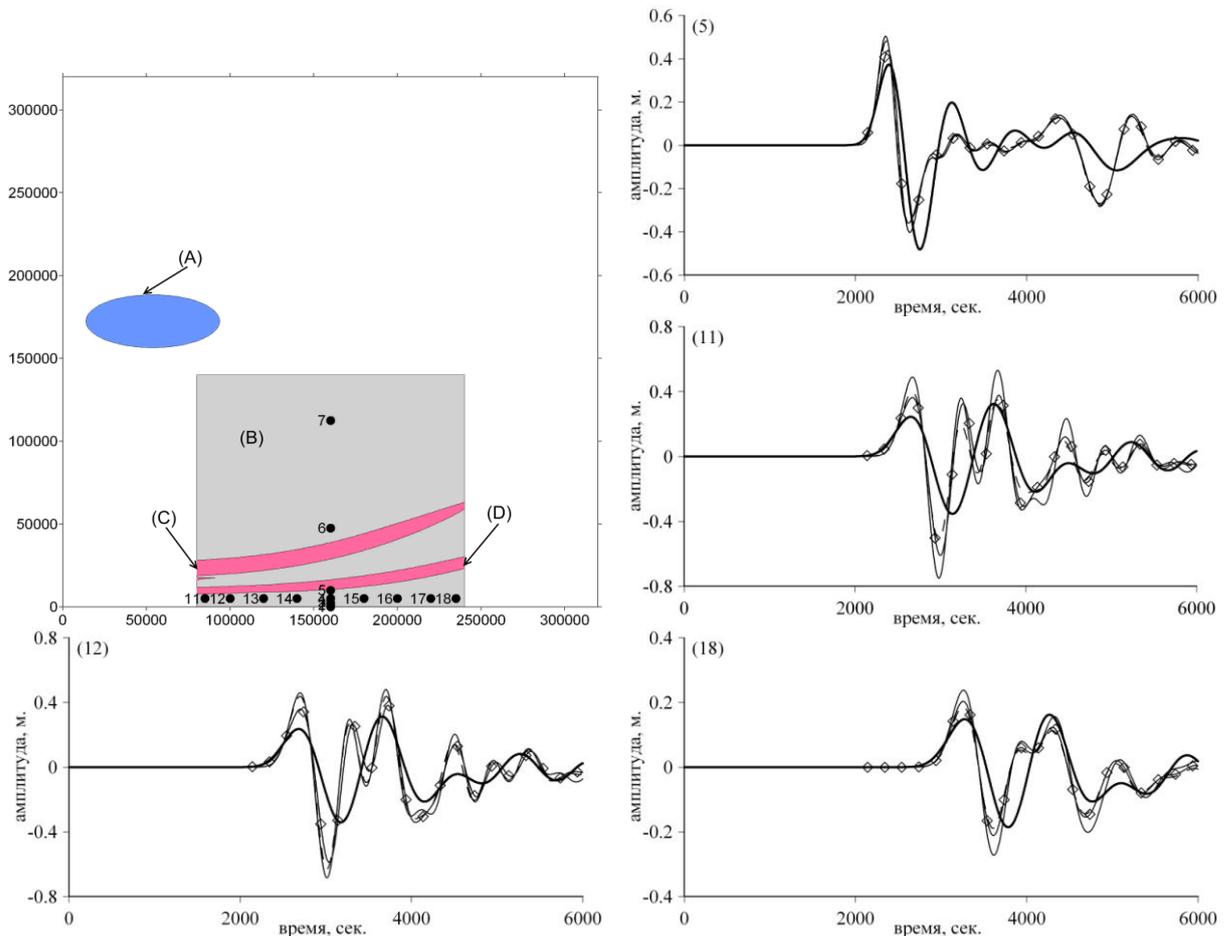


Рисунок 9. Схема 2-го варианта 2-й тестовой задачи (слева сверху), начальное возвышение (A), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» – верхний контур (C) соответствует моменту $t_z \approx 1600$ сек., нижний (D) – $t_z \approx 2140$ сек.

При рассмотрении мареограмм, рассчитанных в точках, находящихся ближе к краям малой области ω (12-ый и, особенно, 11-ый мареографы), можно заметить постепенное расхождение результатов, которое можно связать с тем, что при расчете во всей области Ω на волновую картину в приграничных точках влияют также волны из подобласти $\Omega \setminus \omega$, которые при расчете только в ω не учитываются. Отмеченный эффект, непосредственно связанный с конечностью размеров начального возмущения, приводит к выводу о нежелательности размещения границ малой области в непосредственной близости защищаемых пунктов.

Второй вариант обсуждаемой задачи отличался от первого только положением начального возмущения, отнесенного к боковой границе расчетной области (рис. 9). Здесь «заморозка» производилась в моменты $t_z \approx 1600$ и $t_z \approx 2140$ секунд. Сравнительный анализ рассчитанных мареограмм показывает, что и при смещенном источнике начального возмущения наилучшее совпадение с эталонным решением получено в центральных прибрежных точках (мареографы 1 – 5) с той лишь разницей, что в этом случае «поздняя заморозка» (линия с маркерами) оказалась менее точной, чем ранняя (пунктирная линия), что может быть связано с тем, что к моменту «заморозки» решение претерпевает существенные искажения при расчете на грубой сетке. На мареографах, расположенных ближе к боковым границам малой области ω

(ближние к источнику мареографы 11 – 14 и наиболее удаленные от него 15 – 18), также наблюдается постепенное расхождение «замороженных» и эталонных результатов.

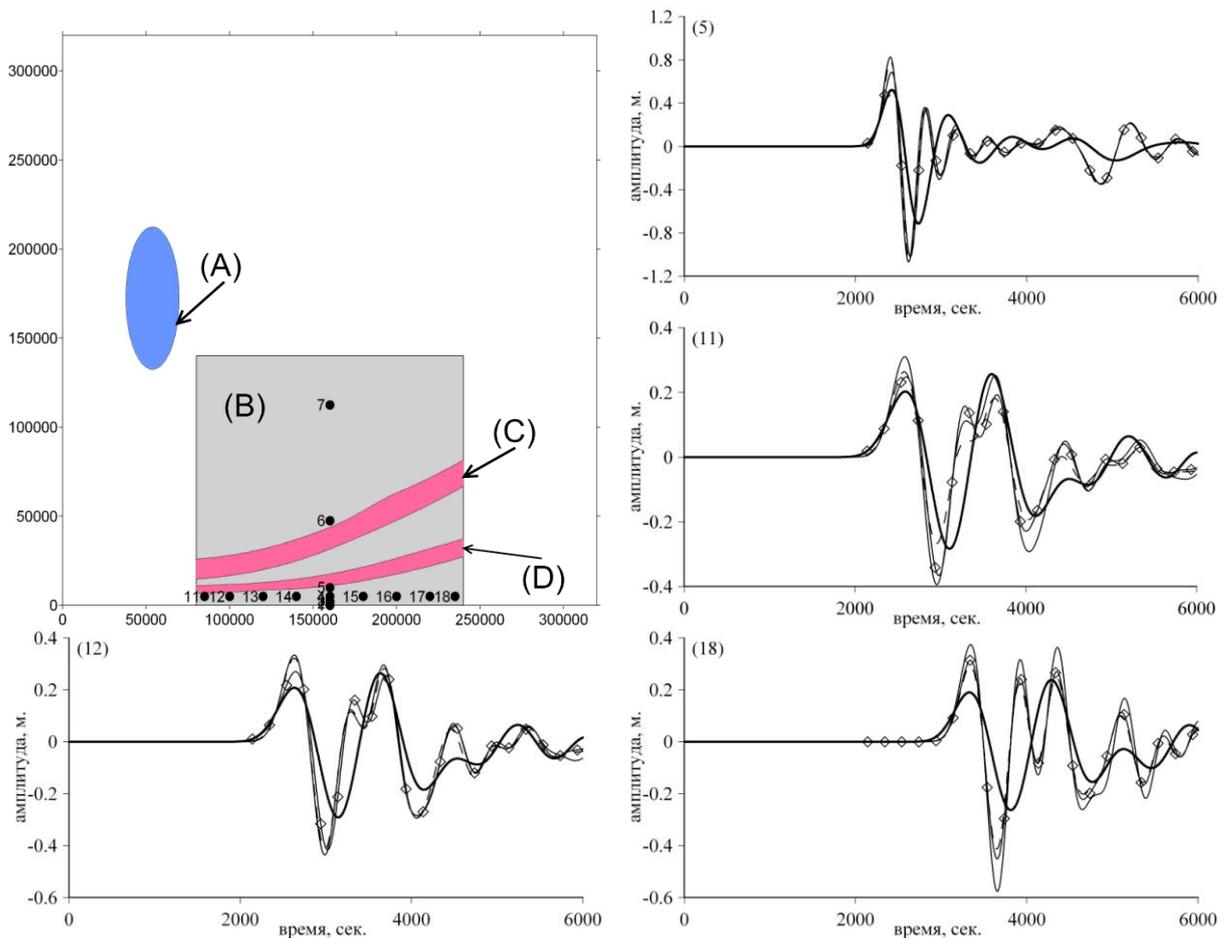


Рисунок 10. Схема 3-го варианта 2-й тестовой задачи (слева сверху), начальное возвышение (A), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» – верхний контур (C) соответствует моменту $t_z \approx 1600$ сек., нижний (D) – $t_z \approx 2140$ сек.

При развороте источника на 90 градусов (третий вариант) картина в целом сохраняется (рис. 10). Таким образом, выводы, сделанные при анализе результатов первого варианта второй модельной задачи, оказываются независимыми ни от положения, ни от ориентации простейшего локализованного источника. Они состоят в рекомендации выбирать границы малой области на достаточном удалении от защищаемых пунктов.

В *третьей* модельной задаче в качестве начального возмущения использовались результаты расчета смещений свободной поверхности, выполненные на основе уже упоминавшейся дислокационной модели. В *первом* варианте этой задачи источник был направлен своей отрицательной частью возмущения к берегу (рис. 11). Здесь, как и для второй задачи, в случае слишком поздней «заморозки» ($t_z \approx 2140$ секунд) 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.

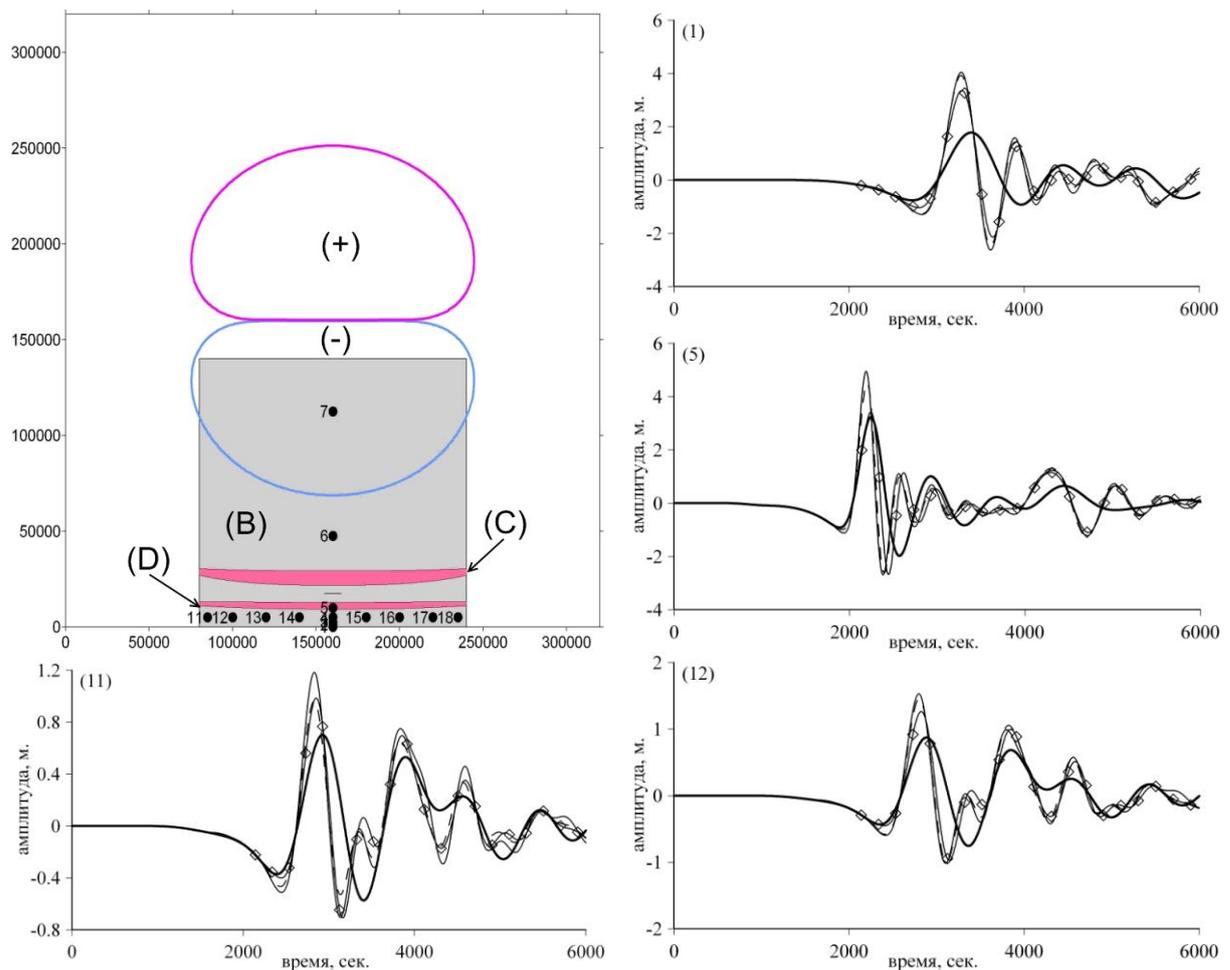


Рисунок 11. Схема 1-го варианта 3-ей тестовой задачи (слева сверху), отрицательная часть начального возмущения отмечена символом (-), положительная – (+), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» – верхний контур (C) соответствует моменту $t_z \approx 1600$ сек., нижний (D) – $t_z \approx 2140$ сек.

При решении *второго* варианта третьей модельной задачи источник начального возмущения сохранил все свои параметры за исключением Θ – угла, определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва, который был изменен на 90 градусов (рис. 12). 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. 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, 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.

В *третьем* варианте задачи были изменены не только значение угла Θ , определяющего ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва, которое было изменено на 30 градусов (рис. 13). Несколько изменен был и механизм сейсмического источника: значения угла δ , задающего угол падения плоскости разлома, и угла λ , 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.

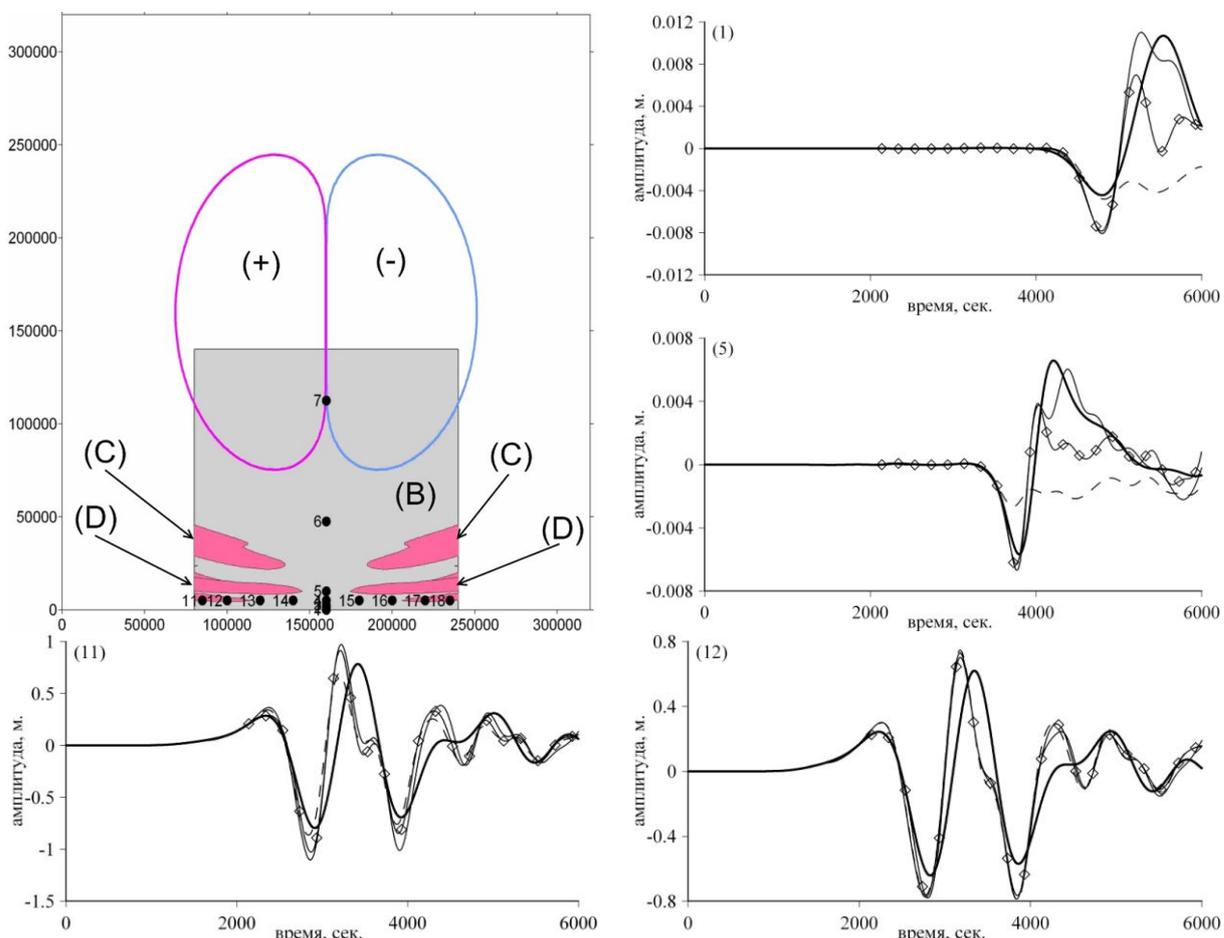


Рисунок 12. Схема 2-го варианта 3-ей тестовой задачи (слева сверху), отрицательная часть начального возвышения отмечена символом (-), положительная – (+), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» – верхний контур (C) соответствует моменту $t_z \approx 1600$ сек., нижний (D) – $t_z \approx 2140$ 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.

Малая область ω была выбрана здесь несколько меньшей (рис 14), а «заморозка» проводилась в момент времени $t_z \approx 1630$ секунд. 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 несколько лучших результатах у метода «заморозки», как на положительных, так и на отрицательных амплитудах.

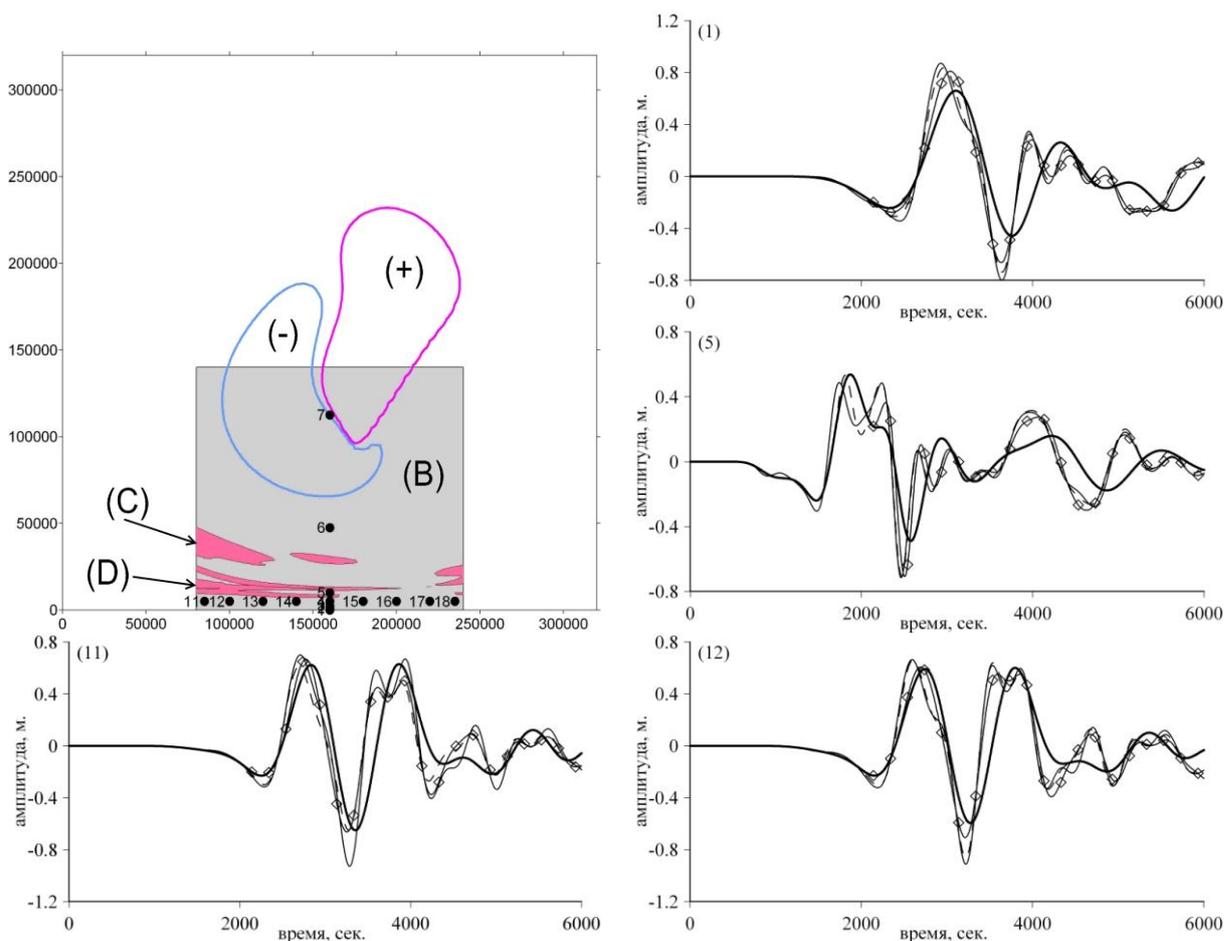


Рисунок 13. Схема 3-го варианта 3-ей тестовой задачи (слева сверху), отрицательная часть начального возвышения отмечена символом (-), положительная – (+), малая расчетная область (B) и положения волновых полей в различные моменты «заморозки» – верхний контур (C) соответствует моменту

$$t_z \approx 1600 \text{ сек.},$$

нижний (D) – $t_z \approx 2140 \text{ сек.}$

4. Модельные расчеты для реальных акваторий.

В этом разделе излагаются результаты применения метода «заморозки» при решении двух производственных задач, одна из которых связана с моделированием цунами в уже упоминавшемся Карагинском заливе, а вторая – с исследованием цунамиопасности Средиземноморского побережья Израиля.

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 Ω (без выделения ω) 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. Так, 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 уже упоминавшейся области «Карагинский залив». Начальное возмущение рассчитывалось с использованием модели «глубоководного» источника I.

Как было показано выше, точность расчета в прибрежных мареографах волн, порожденных этим источником, сильно зависит от детальности используемой сетки.

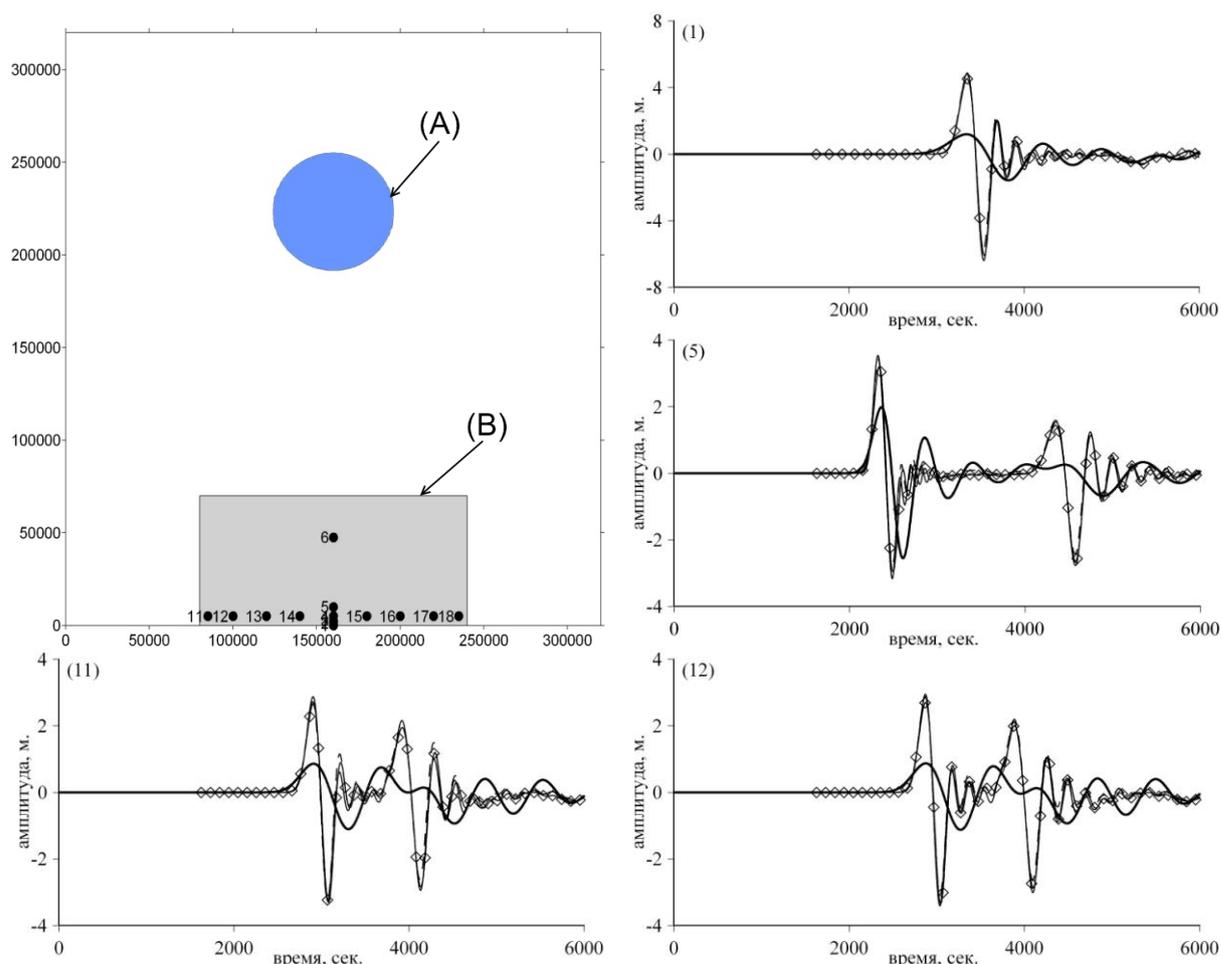


Рисунок 14. Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки» и «перехвата». Наверху слева изображена схема модельной задачи: контур начального возмущения (А), малая расчетная область (В), точки расположения мареографов (черные кружочки). Здесь пунктиром отрисованы результаты расчетов с использованием метода «перехвата», линией с маркерами – метода «заморозки».

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 (рис. 15).

Так как размеры содержательных фрагментов волновых полей оказались сравнимы с размерами расчетной области и экономия вычислительных ресурсов за счет ее уменьшения не представлялась возможной, авторами было принято решение в данном случае малую область ω не выделять, а продолжать расчет на мелкой 15-ти 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, приведенные на рисунке 16, результаты расчетов с «заморозкой» в обоих случаях очень близки к эталонным во всех мареографных точках. Так как эти различия оказались пренебрежимо малы, можно полагать, что метод достаточно устойчив к выбору момента «заморозки».

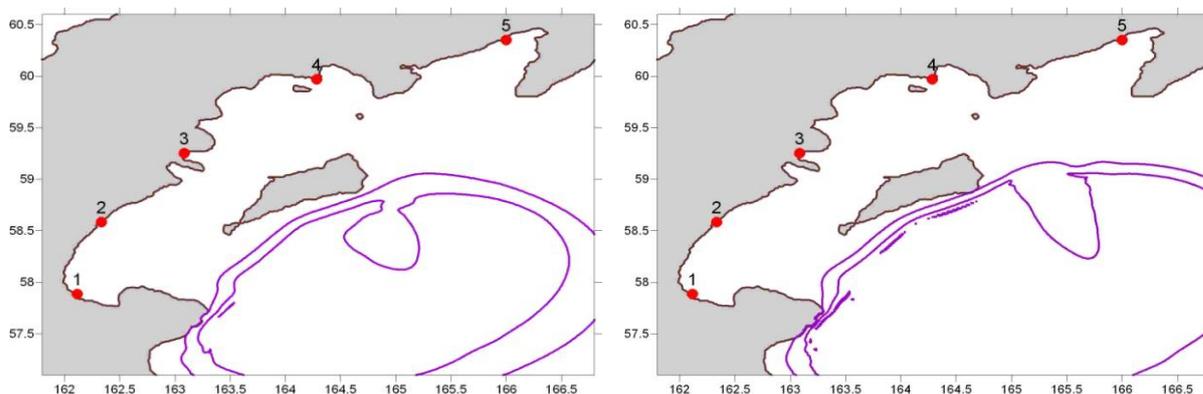


Рисунок 15. Иллюстрация применения метода «заморозки» на задаче о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Контуры волновых полей, рассчитанных на грубой одноминутной сетке: слева – «заморозка» в момент времени $t_z = 570$ сек., справа – на момент $t_z = 760$ секунд. Кружочками отмечены расположения прибрежных мареографов.

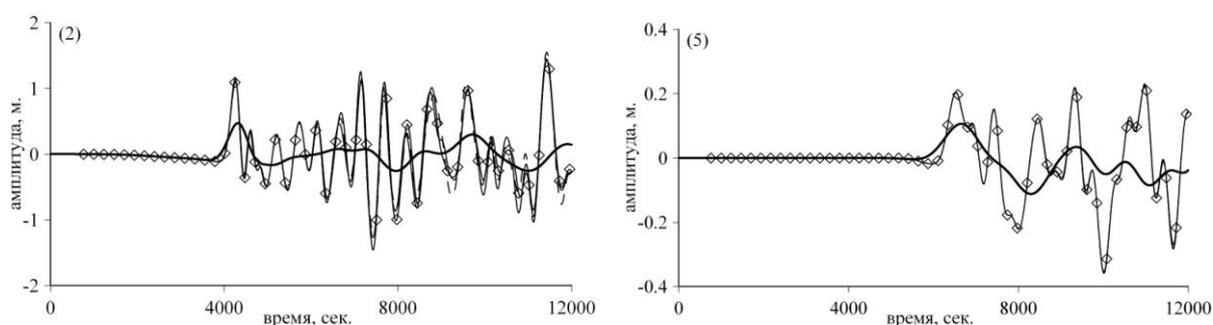


Рисунок 16. Задача о трансформации волн цунами в Карагинском заливе. Сравнение результатов, полученных с использованием методов «заморозки», с эталонным решением.

Заключительный пример, иллюстрирующий возможности метода «заморозки», связан с моделированием гипотетического цунами, вызванного землетрясением с магнитудой 8.0 в восточной части Средиземного моря. В соответствии с историческими данными о сейсмической обстановке в этой акватории источник был размещен юго-западнее о-ва Кипр. Начальное возвышение, было рассчитано с использованием дислокационной модели Подъяпольского-Гусякова-Окады. В отличие от моделирования трансформации цунами в Карагинском заливе здесь методика «заморозки» была применена в полном объеме с использованием «большой» и «малой» областей. Результаты расчетов фиксировались виртуальными мареографами, размещенными в окрестностях городов Хайфа и Яффо. Расчеты на грубой сетке проводились с шагом 1 минута, на мелкой – 15 секунд. «Заморозка» данных производилась в момент времени $t_z \approx 1200$ секунд. Схема задачи и записи мареографов представлены на рисунке 17.

5. Заключение.

Изложенные в статье результаты вычислительных экспериментов позволяют утверждать, что предложенные авторами специальные вычислительные методики, позволяют 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 ω . 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.

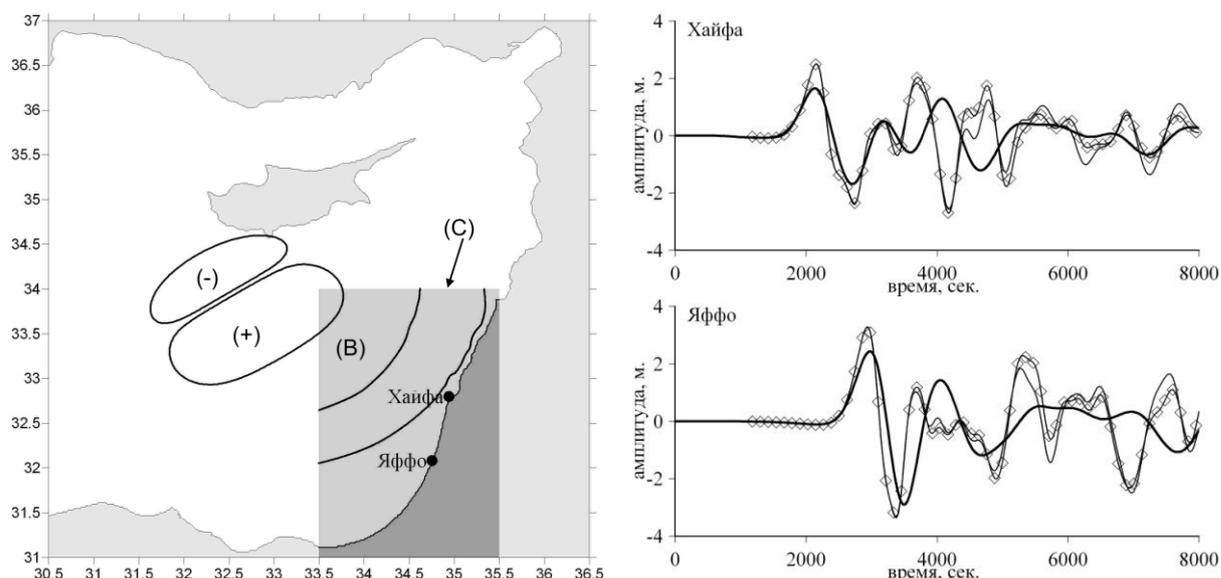


Рисунок 17. Слева – схема исходной и малой расчетных областей, контур начального возмущения, расположение мареографных точек. Справа – графики с мареограммами: жирная линия – расчет на грубой сетке, тонкая – на мелкой, тонкая с маркерами – расчет после «заморозки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Известия АН СССР. Сер. Физика земли. М.: 1987. № 11. С. 53-64.
2. Шокин Ю.И., Бейзель С. А., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Об использовании методов численного моделирования для решения прикладных задач проблемы цунами. Тр. Междунар. конф. “Вычисл. и инф. тех. в науке, технике и образовании”. Т. I. Павлодар: ТОО НПФ “ЭКО”. 2006. С. 36-51.
3. Подъяпольский Г.С. Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли, 1968, №1, С.7-24
4. Гусяков В.К. Взаимосвязь волн цунами с параметрами источника при подводных землетрясениях // Математические проблемы геофизики: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Вычисл. центр. 1974. Выпуск 5, Часть 1. С. 118 – 140.
5. Yamashita T., Sato R. Generation of tsunami by a fault model // J. Phys. Earth. 1974. V. 22, № 4. P. 415 – 440.
6. Ward S. Relationships of tsunami generation and an earthquake source // J. Phys. Earth. 1980. V. 28, № 5. P. 441 – 474.
7. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978, С.23-51
8. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space // Bull. Seis. Soc. Am. 1985. V. 75. P. 1135 – 1154.