

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю.И. Шокин

30 октября 2013 года

**«Предварительное математическое моделирование наката волн цунами
на береговую зону населенных пунктов
Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск.
Проект программы работ на период 2014-2015 гг.»**

ОТЧЕТ

по пятому этапу договора 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 2015 года»
(договор № 03н-11 от 01 октября 2011 г.)

Руководитель работ

г.н.с., д.ф.-м.н., профессор

_____ Л.Б. Чубаров

Новосибирск, 2013г.

Исполнители:

н.с., к.ф.-м.н.

С.А. Бейзель,

в.н.с., д.ф.-м.н.

В.К. Гусяков,

с.н.с., д.т.н.

А.Д. Рычков.

Содержание

Содержание.....	3
1. Аннотация.....	4
2. Введение	5
3. Оценка характеристик заплеска цунами для пп. Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск.	12
3.1 . Обзор исторических наблюдений цунами в пп. Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск	12
3.2 . Методика расчета наката.....	18
3.3 . Постановка задач расчета характеристик заплеска	23
3.3.1. Построение набора «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений	23
3.3.2. Расчетные области, параметры расчетов.....	31
3.4 . Результаты моделирования	39
3.4.1. Пос. Малокурильское	41
3.4.1.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области	42
3.4.1.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области	43
3.4.1.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области.....	44
3.4.1.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области	45
3.4.1.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области	46
3.4.2. Пос. Северо-Курильск.....	47
3.4.2.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области	48
3.4.2.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области	49
3.4.2.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области.....	50
3.4.2.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области	51
3.4.2.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области	52
3.4.3. Пос. Усть-Камчатск.....	53
3.4.3.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области	54
3.4.3.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области	54
3.4.3.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области.....	56
3.4.3.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области	57
3.4.3.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области	58
4. Пояснительная записка – проект программы работ на период 2014-2015 гг.	61
5. Заключение.....	64
6. Литература.....	66

1. Аннотация

Согласно Техническому заданию и уточненному Календарному плану на 2013 г., содержание работ 5-го этапа состояло из двух частей.

Первая часть предполагала определение характеристик затопления участков побережья вблизи населенных пунктов Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск волнами цунами, порожденными «значимыми» гипотетическими модельными очагами цунамигенных землетрясений ближней зоны с магнитудами 7.8, 8.1, 8.4 и 9.0, входящими в состав наборов, построенных в ходе работ 2006-2012 гг.

В совокупность упомянутых характеристик должны были быть включены границы зон затопления, распределения скоростей течений, максимальных глубин и длительностей затопления.

Соответствующие оценки должны были быть основаны на интерпретации результатов расчетов, выполненных с использованием методик численного моделирования, разработанных и верифицированных на предыдущем этапе.

Вторая часть работ была связана с подготовкой программы работ (их перечень, последовательность, ожидаемые результаты, необходимые ресурсы) на период 2014-2015 г.г, включающей:

1). Уточнение наборов очагов модельных цунамигенных землетрясений (ближней и дальней зон);

2). Проведение дополнительных расчетов проявления «дополнительных» модельных землетрясений у Дальневосточного побережья РФ (высоты волн вдоль побережья, характеристики затопления для определенных участков побережья).

Из соображений целостности изложения в настоящий текст включены фрагменты предыдущего отчета. Это касается разделов, связанных с историческими сведениями (*внесены некоторые уточнения*), общими характеристиками математических моделей, численных алгоритмов и вычислительных методик. За сведениями о верификации алгоритмов и валидации моделей следует обращаться к уже упомянутому Отчету о работах четвертого этапа.

Оригинальными материалами являются методика конструирования представительного набора «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений, постановки задач вычислительных экспериментов, результаты расчетов и их интерпретация, предложения в программу работ на 2014 – 2015 гг.

За отчетный период исполнителями выполнены следующие работы:

1. Для каждого из рассматриваемых регионов (Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск) построен набор «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудами 7.8, 8.1, 8.4, 9.0. Решение о включении соответствующего источника в этот набор принималось по результатам анализа рассчитанных ранее распределений максимальных высот волн («мокрых линий») в том случае, если эта характеристика (по абсолютной величине) превосходила порог в 0.5 м.

2. Выполнены необходимые модификации «глобальных» расчетных областей, обеспечившие возможность проведения расчетов для всех выбранных источников.
3. Для каждого из регионов и для каждого источника, включенного в соответствующий набор, определены с помощью серийных вычислительных экспериментов указанные выше характеристики заплесков.
4. Созданы визуальные образы результатов расчетов, облегчающие последующую интерпретацию результатов.
5. Сформулированы предложения в программу работ на 2014 – 2015 гг. в рамках Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года».

2. Введение

Задачей российской Службы предупреждения о цунами (СПЦ) является прогнозирование времен прихода и возможной высоты волны в конкретном населенном пункте после происшедшего подводного землетрясения. При этом в действующем регламенте не говорится о конкретной точке прогнозирования высоты волны, в частности, ее расположении относительно защищаемого пункта. Это является вполне оправданным, поскольку по тому ограниченному набору информации (координаты эпицентра, магнитуда), который доступен персоналу СПЦ в момент оперативной обработки события, невозможно прогнозировать высоту волн с точностью, допускающей отслеживание ее вариаций в районе расположения берегового пункта.

Однако при решении практических задач, возникающих перед местными властями и службами МЧС при выполнении действий, предписанных после получении сигнала тревоги цунами, более детальная информация об ожидаемой дальности и глубине заливания территории населенного пункта, возможных скоростях течений имеет первостепенное значение. Такая информация дает возможность для определения размеров зон эвакуации, назначения временных убежищ и выбора маршрутов движения к ним. Оценка этих параметров даже при известной высоте волны на урезе воды (либо на какой-то фиксированной глубине) представляет собой сложную задачу, требующую применения специальных методов расчета, отличных от используемых для моделирования распространения цунами на глубокой воде.

Хорошо известно, что при сложной и изрезанной береговой линии высоты и дальности наката на сухом берегу существенно зависят не только от высоты подходящей к мелководью волны цунами, но и от ее длины (периода), а также от направления подхода к конкретной бухте или заливу. Лучшим примером в этом отношении являются высоты наката на побережье Санрику, измеренные после разрушительного цунами Тохоку 11 марта 2011 года (Mori et al, 2012). На основании приборных записей, сделанных донными датчиками, установленными на промежуточных глубинах (Kawai et al., 2011), можно считать, что в области побережья, лежащей непосредственно против очага землетрясения, высота подходящей волны цунами составляла 5-7 метров и была примерно одинаковой на

протяжении почти 300 км по фронту, изменяясь не более чем на 30-40%. Это подтверждает также анализ высот наката, измеренных на выступающих в море мысах, которые на большом протяжении вдоль побережья были также примерно одинаковы и составляли 10-12 метров. Высоты же заплеска, измеренные в заливах и в вершинах бухт, изменялись в существенно более широком интервале (от 10 до 40 метров), т.е. диапазон их вариаций составляет более 400%. Столь же значительны были вариации по глубине заливания территории, прилегающей к заливам и бухтам. Отсюда видна важность оценки эффектов наката волн на сухой берег для конкретных участков побережья и изучения вариаций наката в заливах и бухтах при различных параметрах и положениях источника.

Основной целью предыдущего (пилотного) этапа работ по оценке характеристик заплеска цунами в конкретных пунктах Курило-Камчатского побережья была отработка методики сочленения программы расчета распространения цунами на глубокой воде с программой расчета наката на сухой берег. На отчетном заключительном этапе работ созданная методика применялась для определения характеристик заплеска волн цунами, порожденных «значимыми» цунамигенными землетрясениями характерных магнитуд 7.8, 8.1, 8.4, 9.0 вблизи трех населенных пунктов – Малокурильское, Северо-Курильск и Усть-Камчатск.

Выбор этих пунктов был продиктован следующими обстоятельствами:

1) расположение в разных частях (южной, центральной и северной) Курило-Камчатской сейсмогенной зоны;

2) различная ориентация подводящей акватории по отношению к направлению подхода прямой волны (северо-запад, северо-восток, юго-восток) – при доминирующем юго-восточном направлении подхода прямой (распространяющейся от очага) волны цунами;

3) различная конфигурация прибрежной акватории, вблизи которой расположен защищаемый пункт. Для пос. Малокурильское – это круглая бухта с узким входом, для Северо-Курильска – широкий полукруглый залив, для Усть-Камчатска – эстуарий и дельта крупной реки (р. Камчатка), устье которой закрыто песчаной косой (Дембиевская коса) от прямого воздействия подходящей волны цунами, при этом сам поселок отделен от океана достаточно широкой протокой, соединяющей устьевую часть реки с озером Нерпичье. .

Эффективное использование методики расчета наката для этих трех достаточно различных пунктов Курило-Камчатского побережья позволяет надеяться, что предлагаемая методика будет хорошо работать в большинстве других береговых ситуаций, возможных на весьма протяженном Дальневосточном побережье РФ, с характерным для него большим разнообразием морфологических особенностей береговой зоны.

Следует отметить также, что в настоящее время Тихоокеанский центр предупреждения о цунами в Гонолулу (ТЦПЦ) готовит изменения регламента работы – переход от текстовых оповещений об угрозе цунами, содержащих лишь ожидаемые времена подхода волн к тем или иным участкам побережья, к прогнозированию ожидаемых высот цунами. Это будет первое большое

изменение регламента ТЦПЦ с 2001 года, когда был осуществлен переход на магнитуду M_w .

Прогнозирование высот будет осуществляться на основе моделирования возбуждения и распространения цунами с использованием программного комплекса RIFT (Rapid Inundation Forecasting of Tsunamis), который является собственной разработкой ТЦПЦ. Этот комплекс использует результаты оперативного определения механизма очага (ориентации и угла наклона плоскости разрыва) по методике WCMT (W-phase Central Moment Tensor), результаты которого должны быть доступны в течение 25-30 мин после начала регистрации землетрясения ближайшими сейсмическими станциями. Напомним, что сейчас ТЦПЦ получает и обрабатывает сейсмические данные в режиме реального времени примерно с 400 сейсмостанций, расположенных как в бассейне Тихого океана, так и за его пределами.

Расчет возбуждения цунами в рамках комплекса RIFT осуществляется по стандартной методике вычисления остаточных деформаций дна в очаговой области, которые затем вводятся в уравнение неразрывности системы линейных уравнений мелкой воды, которая решается численно. На выходе получается набор ожидаемых высот цунами на последовательности береговых точек («на стенке»), которые затем пересчитываются (по формуле Грина) в высоты цунами на берегу. Область моделирования и расчетная сетка при этом строится автоматически на основе положения и параметров очага, либо выбирается из 20 заранее подготовленных областей, покрывающих бассейн Тихого океана и прилегающих окраинных морей.

На 8-процессорном комплексе ТЦПЦ, работающем под управлением операционной системы Linux, региональный расчет распространения цунами на трехминутной сетке на три часа физического времени занимает 7 секунд. 24-часовой расчет для всего Тихого океана выполняется за время менее 7 мин. Такое быстродействие комплекса RIFT позволяет использовать его для расчетов в режиме реального времени для оценки ожидаемых высот цунами от реальных очагов в любом районе Тихоокеанского бассейна.

Новый продукт включает в себя графические материалы четырех типов:

1. рассчитанные карты свечения, показывающие распределение энергии цунами по региону;
2. рассчитанные высоты цунами в береговых точках, которые показываются цветом в некоторой ступенчатой цветовой шкале (ступени цвета выбираются адаптивно, в зависимости от ожидаемого диапазона высот);
3. карты ожидаемых высот по полигонам – участкам территории тихоокеанского бассейна, границы которых проводятся экспертами ТЦПЦ с учетом как сеймотектонических особенностей территории, так и политико-административного деления. Каждый полигон закрашивается одним цветом, соответствующим одной из четырех градаций по уровню угрозы цунами. Соответственно, градация определяется на основе максимальной ожидаемой высоте волны в пределах площади полигона;

4. kmz-файлы с рассчитанными амплитудами волн в конкретных береговых точках для визуализации на оболочке GoogleEarth, допускающей глубокое зуммирование на отдельных береговых участках. Примеры этих продуктов показаны ниже (Рис. 1 – Рис. 4).

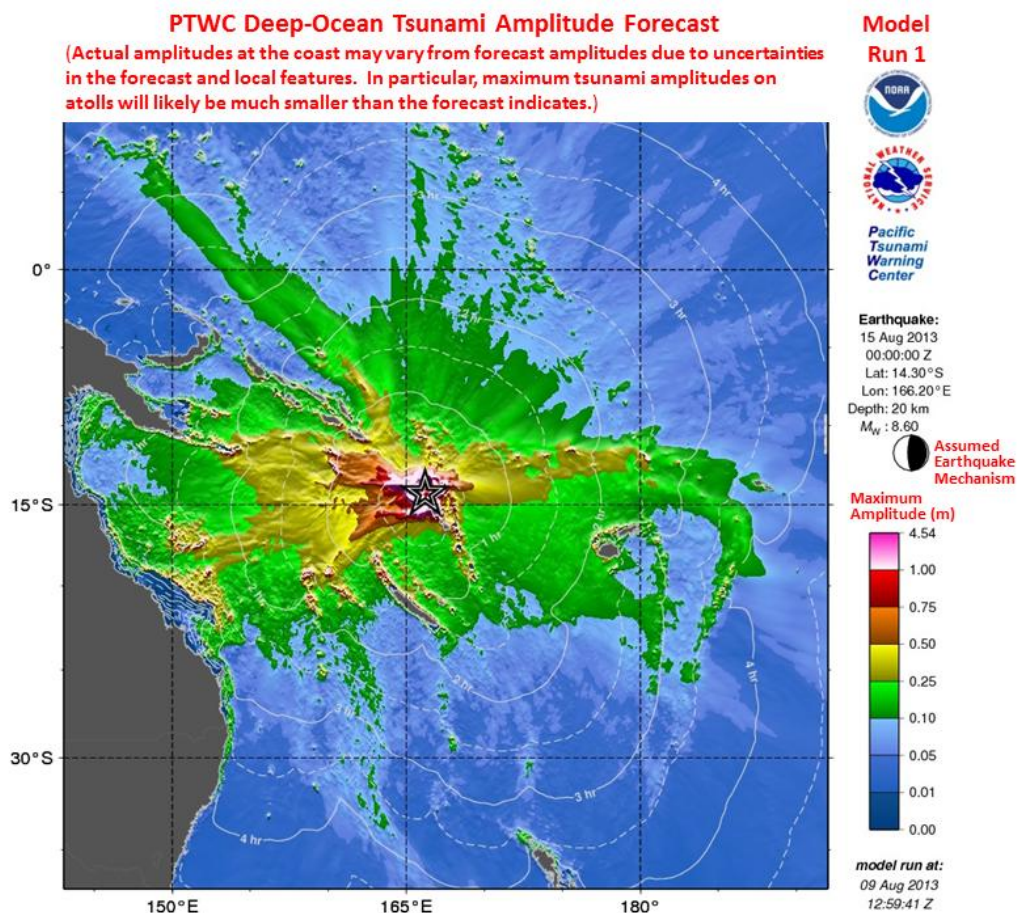


Рис. 1. Карта распределения максимальных амплитуд цунами, рассчитанная по программе RIFT для гипотетического землетрясения с магнитудой Mw8.6 в районе о-вов Вануату.

Графический продукт в виде цветных полигонов предназначен главным образом для быстрого определения категории (статуса) тревоги для различных стран/территорий тихоокеанского бассейна. Ввиду значительных размеров полигонов (например, все северные Курилы и Камчатка попадают в пределы одного полигона) для прогнозирования высот в конкретных береговых пунктах этот продукт не предназначен. Для этих целей должны использоваться файлы kmz, которые содержат точные координаты расчетных точек и ожидаемых высот в них. При наложении на карты GoogleEarth они позволяют видеть пространственное распределение ожидаемых высот цунами на берегу. Стоит обратить внимание, что каждый тип продукта сопровождается предупреждением о том, что фактические амплитуды волн цунами вблизи береговых пунктов могут отличаться от указанных в сообщении вследствие неопределенностей в параметрах очага и локальных береговых особенностей.

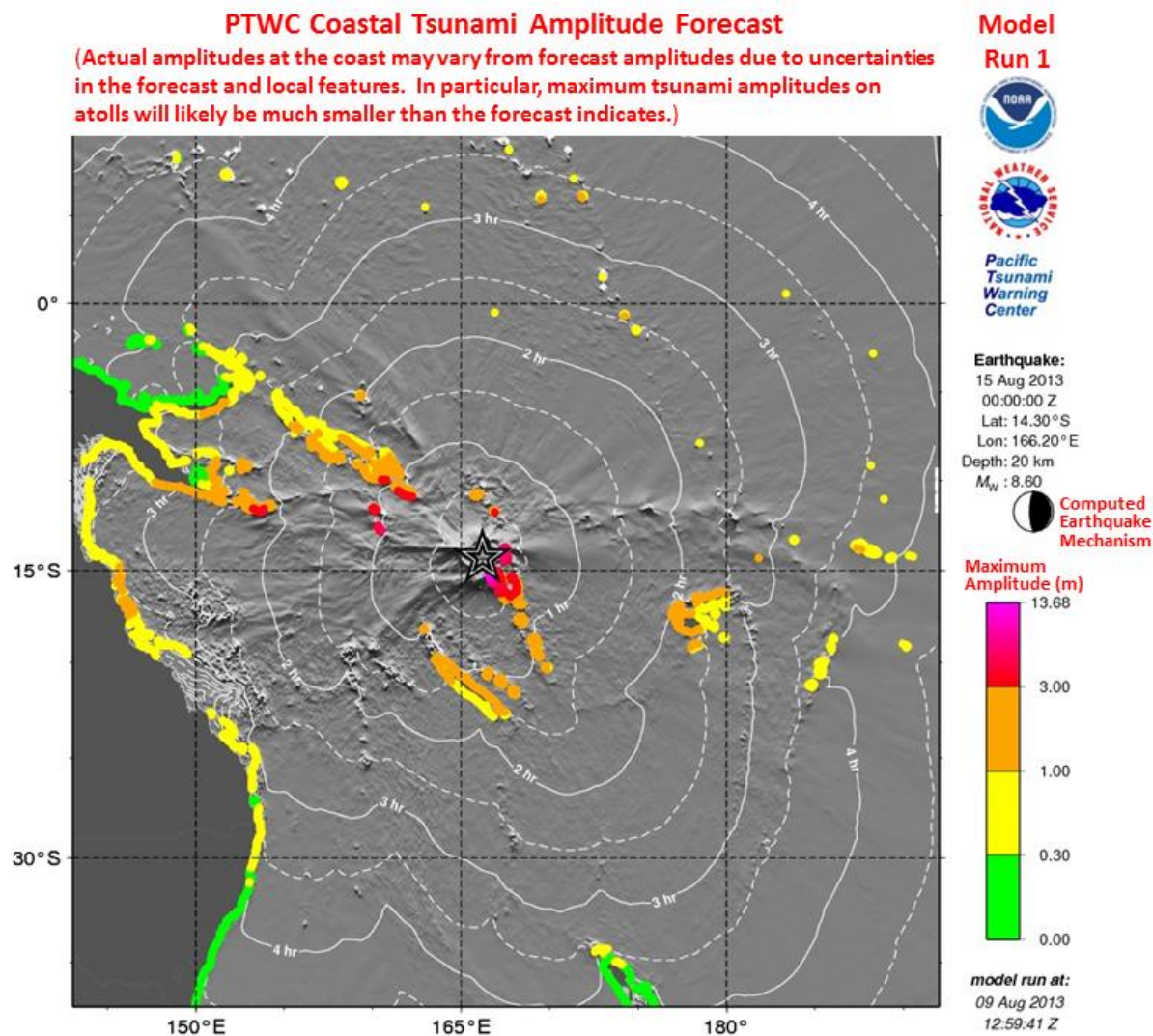


Рис. 2. Карта рассчитанных максимальных амплитуд цунами в береговых точках, рассчитанная по программе RIFT для гипотетического землетрясения с магнитудой $M_w 8.6$ в районе о-вов Вануату.

Другим важным моментом международной системы предупреждения о цунами на Тихом океане является то, что центр в Гонолулу НЕ ОБЪЯВЛЯЕТ тревоги цунами, он лишь ИНФОРМИРУЕТ национальные и региональные центры и уполномоченные агентства о существовании угрозы цунами, оставляя принятие решения о необходимости защитных действий целиком в их компетенции. Они должны это сделать по каждому отдельному береговому пункту, принимая во внимание как величину объявленной угрозы цунами, так и весь комплекс местных условий, включая исторические сведения и статистику прошлых тревог.

Полномасштабное внедрение новых продуктов в практику работы ТЦПЦ запланировано на вторую половину 2014 года, с целью завершить такой переход к 01.10.2014. Во избежание неправильной интерпретации информации о параметрах ожидаемых цунами, новые графические продукты будут направляться ТЦПЦ только на официальные адреса национальных служб предупреждения о цунами и другие официальные пункты распространения информации. Параллельно, ТЦПЦ будет продолжать выпускать традиционные текстовые сообщения с прогнозами цунами, которые будет размещаться на WEB-сайтах с публичным доступом.

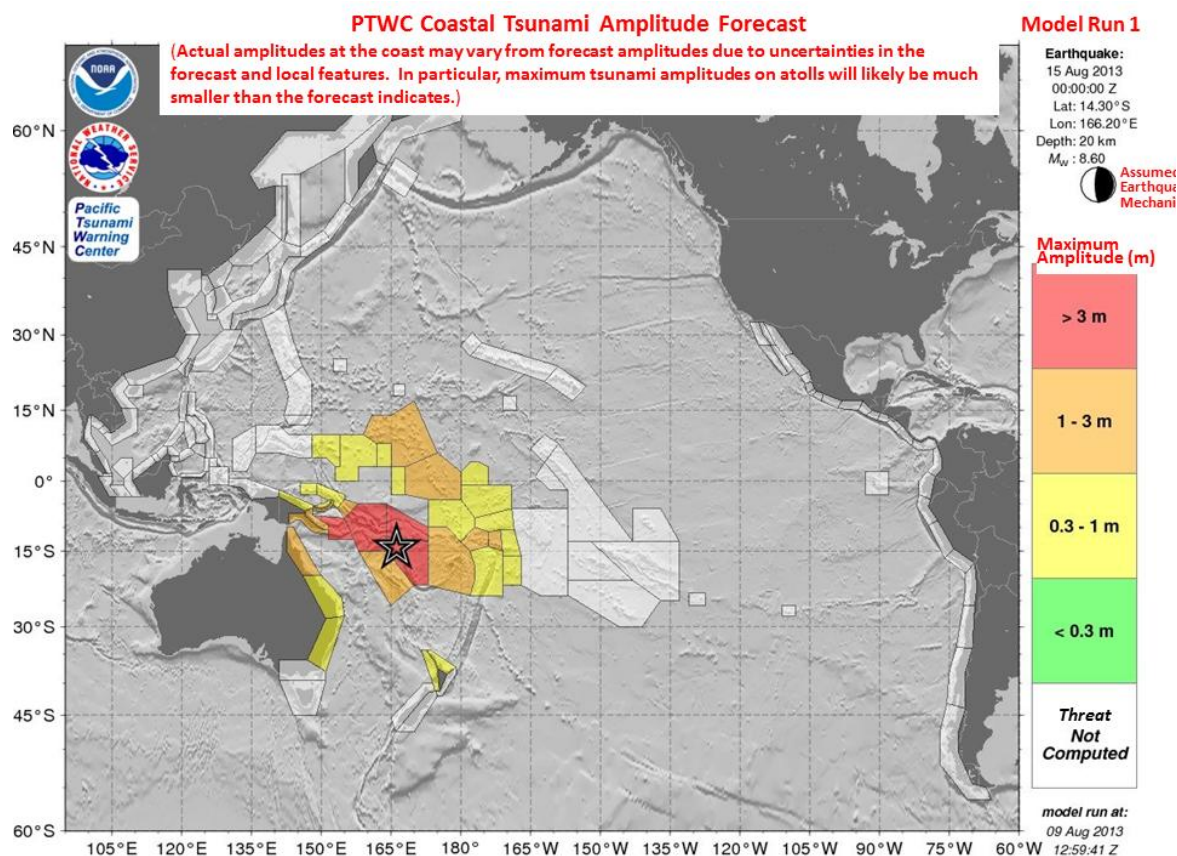


Рис. 3. Прогноз ожидаемых максимальных амплитуд цунами по полигонам. Каждый полигон закрашивается цветом, соответствующим одному из четырех уровней ожидаемой угрозы цунами в соответствии с цветовой шкалой, показанной справа. Источник цунами - гипотетическое землетрясение с магнитудой $M_w 8.6$ в районе о-вов Вануату.

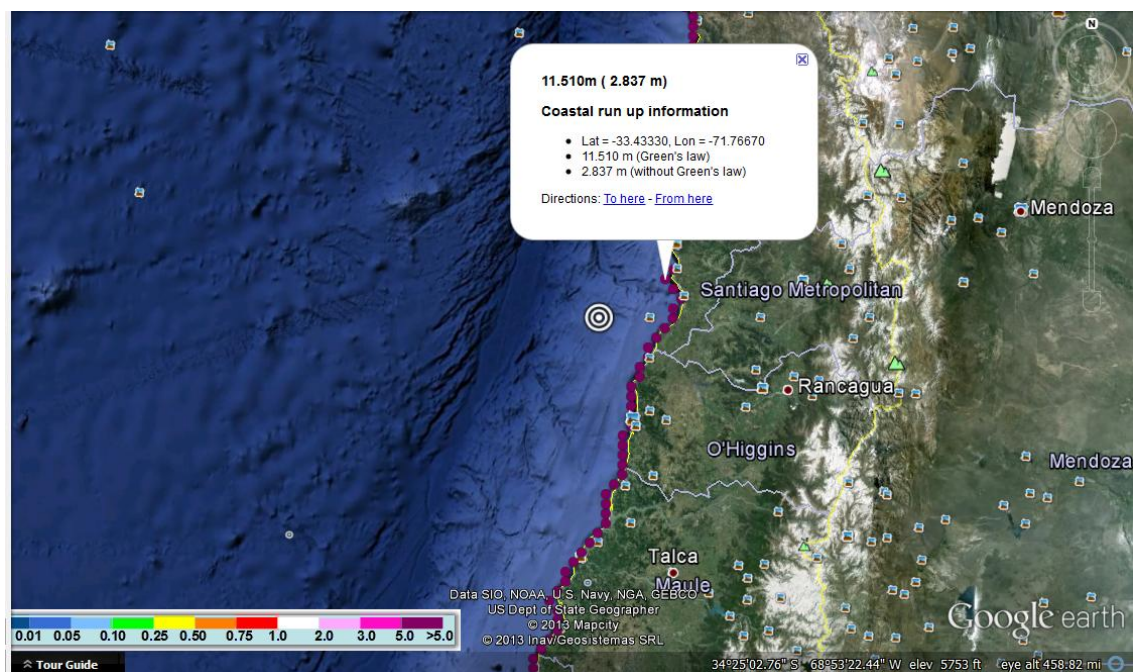


Рис. 4. Визуализация в графической оболочке GoogleEarth расчетных высот цунами вдоль побережья Чили, полученных с помощью программного комплекса RIFT. Источник цунами - гипотетическое землетрясение с магнитудой $M_w 8.9$ вблизи чилийского побережья (в точке с координатами $33.7^\circ S, 72.3^\circ W$, глубина гипоцентра 20 км). Всплывающее окно показывает расчетную амплитуду цунами в конкретной точке на «стенке», а также оценку высоты в ближайшей береговой точке.

Оценивая в целом планируемые инновации ТЦПЦ в области использования результатов опережающего моделирования, следует сказать, что они безусловно представляют собой шаг в правильном направлении, т.к. будут способствовать более точной локализации прогнозов. В течение многих лет определение размеров зон для срочного оповещения и категоризация уровней угрозы цунами основывались исключительно на величине магнитуды землетрясения и ожидаемых временах добегания цунами. Учет динамических особенностей распространения цунами на конкретных участках акватории океана позволит несомненно с большей точностью проводить такую классификацию и оценивать уровень угрозы для конкретных береговых территорий. В то же время не следует ожидать, что новые процедуры существенно снизят процент ложных тревог, поскольку магнитудные пороги сохраняются на прежнем, достаточно консервативном уровне.

Самое важное, что внедрение новых продуктов практически никак не скажется на работе национальных служб предупреждения в тех регионах, где очаги цунамигенных землетрясений находятся в непосредственной близости от защищаемого побережья. Это связано в первую очередь с временными ограничениями. При минимальном времени распространения головной волны в 15-20 мин на накопление широкополосных сейсмических данных, необходимых для определения механизма очага по методике W-CMT, и выполнение опережающего моделирования цунами просто не остается времени. Кроме того, необходимо принимать во внимание разницу в техническом и информационном обеспечении и уровнях квалификации персонала ТЦПЦ и региональных центров, в частности, в Российской Федерации, где в составе смены дежурных операторов может не быть работников, имеющих специальное образование и навыки, необходимые для уверенного выполнения сложных операций по обработке сейсмических и уровенных данных и правильной интерпретации полученных результатов.

Это однако не означает невозможности внедрения результатов численного моделирования в практику работы российской службы предупреждения о цунами. Такое использование должно основываться на предвычислении ожидаемых высот для большой серии модельных очагов цунами, покрывающих большинство реальных прогнозных ситуаций. Более того, в 2013 году был сделан важный принципиальный шаг в сторону большей реалистичности численных прогнозов – осуществлен переход от расчетов ожидаемой амплитуды волны «на стенке», установленной в ближайшем к защищаемому пункту морском узле расчетной сетки, к расчетам карт дальности и глубины заливания волной цунами территории берегового пункта. Этот переход сделан на основе использования разработанной в ИВТ СО РАН эффективной численной методологии расчета наката цунами методом крупных частиц, которая была состыкована с используемой ранее методологией расчета распространения цунами в рамках нелинейной теории мелкой воды.

Настоящий отчет содержит результаты расчетов наката цунами для трех выбранных береговых пунктов – Малокурильское, Северо-Курильск и Усть-Камчатск, отражающих три основных ситуации взаимодействия подходящей волны цунами и берегом.

Следует еще раз отметить, что авторы методики, алгоритмов и программ системы RIFT отчетливо осознают ограниченность созданного ими инструментария и невозможность, да и нецелесообразность использования получаемых результатов в попытках прогнозирования реальных сценариев развития цунами. Этот тезис объясняется прежде всего недостаточной разрешающей способностью расчетной сетки (3 угловых минуты), в то время как (и это было показано исполнителями настоящего проекта) для получения достоверных оценок необходимо использовать сетку с шагом не более 10 – 15 угловых секунд. Представляемые в настоящем отчете результаты были получены на односекундной сетке.

Нельзя не упомянуть об отказе от учета нелинейных эффектов, значение которых возрастает в прибрежных акваториях при уменьшении глубин.

Еще одной слабостью методики RIFT является использование для оценки заплеска волны на берег результатов, полученных с помощью формулы Грина. При этом реальный рельеф прибрежной акватории, в значительной мере определяющий характеристики заплеска волны, заменяется линейным склоном и, что также чрезвычайно важно, принимается предположение о фронтальном подходе волны к берегу, что делает невозможным применение методики для оценки воздействия волн цунами в бухтах, гаванях и других наиболее важных акваториях и участках прилегающих к ним побережий. Наконец, следует упомянуть невозможность при таком «одномерном» подходе учесть пространственные эффекты трансформации волны в силу эффектов дифракции, формирования краевых волн и т.п.

Предупреждая возникновение недоразумений при неадекватном использовании результатов системы RIFT, ее авторы в сопроводительных документах тщательно предупреждают об ограничениях своей системы и указывают разумные способы интерпретации ее результатов.

3. Оценка характеристик заплеска цунами для пп. Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск.

3.1. Обзор исторических наблюдений цунами в пп. Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск

В последующем обзоре даты цунамигенных событий даны в соответствии с датой, приведенной в каталогах для порождающего их подводного землетрясения (т.е. соответствующей времени в очаге по Гринвичу), при этом местная дата проявления цунами на Дальневосточном побережье может отличаться на один-два дня.

Пос. Малокурильское (о.Шикотан)

Хотя Малокурильское находится в непосредственной близости от одного из самых активных участков Курило-Камчатской сейсмической зоны, где за последние полвека (с 1958 года) произошло 5 землетрясений с магнитудами более 8.0, разрушительных цунами в поселке зарегистрировано не было. Исходя из физико-географических условий Малокурильского (расположение на обратной по

отношению к очаговой зоне стороне острова, наличие бухты с узким входом) можно предполагать, что уровень цунамиопасности для него является существенно более низким, чем для многих других населенных пунктов на Курильских островах. Анализ исторических данных, в общем, подтверждает это предположение. **Достоверные** данные наблюдений здесь имеются только для советского периода (после 1945 года). Для предшествующего периода в исторических каталогах и базах данных можно обнаружить два сообщения о высотах в 2.5 м (в 1893 году) и 3.0 м (в 1894 году), однако, неизвестно, к какому именно пункту на острове Шикотан они относятся.

О проявлениях сильнейшего **Камчатского цунами 1952 года** на о-ве Шикотан также нет данных в доступной нам литературе. Каталоги (Соловьев, Ферчев, 1961; Соловьев, 1978; Заякин, 1996) не содержат никаких сведений на этот счет, так же как и наиболее полная, из опубликованных в открытой печати, сводка данных о цунами 1952 года (Саваренский и др., 1958). Соответственно, нет данных о высотах Камчатского цунами на Шикотане и в базах данных NGDC/NOAA (NGDC/NOAA Tsunami Database, 2012) и TL/ICMMG (HTDB/WLD, 2013). В Корсакове, находящемся на примерно равном удалении от очага землетрясения, размах колебаний, продолжавшихся в течение многих часов, достигал 1.2 м (Саваренский и др., 1958). Исходя из этого, можно предполагать, что колебания уровня моря в Малокурильской бухте наверняка наблюдались и могли достигать размаха 1.0-1.5 м.

Первым сильным цунами, зарегистрированным непосредственно на острове Шикотан, было **Итурупское цунами**, возникшее после сильного (магнитуда 8.3) землетрясения, происшедшего к востоку от острова Итуруп **6 (7) ноября 1958 года**. Высота заплеска на восточном берегу острова была 5 метров, в бухте Малокурильской размах колебаний достигал 3.5 м, в соседней Крабозаводской бухте отмечалась высота 4-5 м (Соловьев, 1978). При этом на самом Итурупе максимальная высота заплеска также была порядка 5 м (Соловьев, 1978). Эпицентр этого землетрясения находился на континентальном склоне примерно против середины острова Итуруп, на расстоянии 160 км от Малокурильского. После этого землетрясения впервые была объявлена тревога цунами по Дальневосточному региону СССР (Шевченко и др., 2012).

Следующее значительное подтопление Малокурильского было вызвано **Чилийским цунами 22 мая 1960 года**. Значительные колебания уровня начались здесь утром 24 мая с быстрого отлива, при котором дно бухты осушилось на 80-90 метров от линии уреза. Максимальное повышение уровня (до 3.5 - 4 м) было создано второй или третьей волной (Шевченко и др., 2012), были затоплены пирсы, суда срывало с якорей (что свидетельствует о сильных течениях, возникших внутри бухты). Волной сорвало и унесло на 200 метров вверх по реке деревянный мост. Человеческих жертв не было, но материальный ущерб оказался значительным.

Пара цунамигенных землетрясений, возникших у восточного побережья **острова Уруп 13 и 20 октября 1963 года**, не вызвала значительных колебаний уровня в Малокурильской бухте. При первом из них высота подъема уровня воды в бухте составила 1.5 м, при понижении уровня осушались причалы, были смыты пиломатериалы (Соловьев, 1978). При втором землетрясении максимальное

повышение было всего 0.8 м. Интересно отметить, что соотношение максимальных высот этих двух цунами на ближайшем к очагу побережье Урупа было обратным - 4-5 м при землетрясении 13 октября ($M=8.1$) и 10-15 м при землетрясении 20 октября ($M=7.2$).

Транстихоокеанское цунами, вызванное **Аляскинским землетрясением 27 марта 1964 года** с магнитудой $M=9.0$, не вызвало сколь-нибудь заметных колебаний уровня в Малокурильской бухте, по крайней мере каталоги (Соловьев, 1978, Заякин, 1996) не отмечают никаких аномальных колебаний уровня и материального ущерба.

11 августа 1969 года сильное ($M=8.2$) подводное землетрясение произошло непосредственно у острова Шикотан, его эпицентр располагался на континентальном склоне в 80 км к юго-востоку от пос. Малокурильское. На восточном берегу острова (бухта Церковная) заплеск достиг 5 м, в самой же бухте наблюдались сильные течения, но максимальное повышение уровня было в пределах 1 м (Соловьев, 1978).

Через 25 лет, **10 октября 1994 года** практически в том же районе произошло следующее сильное подводное землетрясение с магнитудой 8.1, вызвавшее на острове многочисленные оползни и трещины в грунте, а также существенные повреждения зданий в поселках Малокурильское и Крабозаводское. Максимальная высота заплеска в бухте Димитрова на восточном побережье достигла 10.4 м, в Малокурильской бухте максимальная измеренная высота составила 3.4 м. В низменной части бухты ширина зоны затопления составила около 70 м, вдоль долины речки вода проникла значительно дальше (Кайстренко и др., 1997). Примерно такие же высоты наблюдались в соседней Крабовой бухте.

Сильное землетрясение с магнитудой 8.1, происшедшее в центральной части Курил в районе острова Симушир **15 ноября 2006 года**, вызвало колебания в Малокурильской бухте с размахом до 1.5 м, причем эти колебания наблюдались спустя почти 4 часа после прихода первой небольшой волны (Шевченко и др., 2012). Ввиду ненаселенности ближайших островов (Симушир и Матуа), это цунами не вызвало материального ущерба, хотя последующим экспедиционным обследованием было выявлено, что высота волн на ближайшем побережье достигала 20-22 м (Лобковский и др., 2008).

Чилийское цунами 27 февраля 2010 года, порожденное сильным землетрясением с магнитудой $M_w=8.8$, было записано автономным регистратором цунами установленным ИМГиГ ДВО РАН в бухте Церковная. Интенсивные колебания с размахом около полутора метров наблюдались в течение 10 часов, а на обычный фоновый уровень колебания вышли только спустя сутки. Максимальная размах уровня в бухте Малокурильская достиг 91 см и наблюдался почти два часа спустя после начала аномальных колебаний (Шевченко и др., 2012).

Последнее по времени разрушительное цунами на Тихом океане, возникшее после сильнейшего (магнитуда 9) землетрясения в районе Тохоку (Япония) **11 марта 2011 года**, достаточно сильно проявилось на Южных Курилах. В Малокурильском высота подъема уровня достигал 2.3 метра, в Крабозаводском –

3.5 м (Кайстренко и др., 2011). Наиболее опасные проявления были связаны с взломом ледяного покрова в бухтах и заливах и выбросом тяжелого льда на берег.

Северо-Курильск (о.Парамушир)

Город Северо-Курильск расположен на северо-восточной оконечности острова Парамушир, на берегу Второго Курильского пролива. Он является административным центром Северо-Курильского района Сахалинской области, его население по данным на 2010 год составляет около 2400 человек. Весь этот район является крайне уязвимым в смысле цунамиопасности при сильнейших подводных землетрясениях, здесь дважды на протяжении последних 270 лет происходили мега-землетрясения магнитуды 9, сопровождавшиеся разрушительными цунами (в 1737 и 1952 гг.).

Первый исследователь Камчатки Степан Крашенинников оставил красочное и по-научному точное описание проявления разрушительного цунами **17 октября 1737 года** на восточной Камчатке и северных Курилах, данное в главе «Об огнедышащих горах и происходящих от них опасностях» его знаменитой книги «Описание Земли Камчатки» (Крашенинников, 1755). В ней он приводит (со слов местных камчадалов) впечатляющую цифру 63 м (30 саженой) для высоты заплеска на побережье в районе мыса Лопатка и острова Шумшу. Достоверность этой цифры и точное положение места, к которому она относится, сейчас, по-видимому, установить уже невозможно, однако все приводимое им описание землетрясения и последовавшего за ним катастрофического цунами не дает оснований сомневаться в правдивости такой оценки. Из описаний Крашенинникова и работ по изучению геологических следов этого землетрясения и цунами, а также одновременной активизации практически всех камчатских вулканов следует, что это было разрушительное землетрясение класса М9 и возбужденное им цунами вызвало полное опустошение на ближайших к очагу участках восточного побережья Камчатки и северных Курил. Очевидно также, что оно не обошлось без жертв среди тогдашнего населения этих мест, хотя даже примерное их число установить сейчас не представляется возможным.

Землетрясение такой же силы произошло в том же районе Курило-Камчатской зоны спустя всего 215 лет, **4 ноября 1952 года**, и этот временной промежуток является самым коротким из достоверно известных интервалов повторяемости между двумя землетрясениями класса М9, происходивших в одном субдукционном сегменте Тихоокеанского сейсмического пояса. Восстановленные по геологическим данным периоды повторяемости таких землетрясений варьируются от 300 до 1200 лет (Atwater et al., 1995).

С этого события начинается современная история воздействия цунами на северные Курилы. Землетрясение произошло рано утром (в 3:58 по местному времени), сильные толчки, разбудившие всех жителей Северо-Курильска, продолжались в течение нескольких минут. Минут через 30-40 подошла волна цунами, высотой около 10 м. Наиболее разрушительной оказалась вторая волна, затопившая город практически целиком. Высота заплеска, измеренная на склонах окружающих город сопков, достигала 18-20 м (Соловьев, 1978). Возможно, в каких-то местах она была и выше, никаких специальных обследований всего побережья острова после этого события не проводилось, все силы и ресурсы были

сконцентрированы на спасении людей и восстановлении объектов жизнеобеспечения Северо-Курильска. Относительно общего числа жертв, вызванных цунами 1952 года, до сих пор нет полной ясности. В литературе приводится цифра 2336 человек (Шевченко и др., 2012), но она, по всей видимости, отражает только жертвы среди гражданского населения. В музее Северо-Курильска для этой же категории населения указывается цифра 7802 человека (Смышляев, 2003). Однако основную часть населения Северо-Курильска в те годы составляли военные (моряки, пограничники, армейские части). Данные о потерях личного состава воинских частей, несомненно, были собраны, но никогда не были обнародованы. В книге камчатского журналиста и краеведа А.Смышляева "Ночь океана" (Смышляев, 2003) на основании анализа всей совокупности доступных данных приводится экспертная оценка общего числа погибших на северных Курилах при Камчатском цунами 1952 года в 15-17 тыс. человек. Подавляющее число погибших стали жертвам именно цунами, достигшего наибольшей высоты на островах Парамушир и Шумшу.

Следующим по времени проявлением цунами на Парамушире было 3-метровое цунами, возникшее после землетрясения **17 марта 1953 года**, происшедшего вблизи восточного побережья Парамушира (Соловьев, 1978). Точное местоположение на побережье острова для этого наблюдения, однако, не приводится. В каталогах это землетрясение имеет магнитуду всего в 6.2 балла. При такой магнитуде маловероятно, что именно сейсмический толчок вызвал волну высотой 3 метра, вполне возможно, что землетрясение спровоцировало подводный оползень или обвал, вызвавший локальный заплеск на ограниченном участке побережья.

Трансокеанское Чилийское цунами **22 мая 1960 года** наблюдалось в Северо-Курильске в виде серии волн с наибольшим заплеском, достигавшим 4.7 м (Соловьев, 1978). В городе были затоплены многие дома, стоявшие вблизи берега, с причалов и складов были смыты запасы соли и угля, большое количество бочкотары (Заякин, 1996).

Следующее трансокеанское цунами, вызванное Аляскинским землетрясением **28 марта 1964 года**, проявилось в Северо-Курильске с гораздо меньшей силой, высоты волн были в пределах одного метра (Соловьев, 1978), ощутимого материального ущерба практически не было. Причина этого, очевидно, заключается в различной направленности излучения энергии очагами этих двух цунами, по-разному ориентированными относительно северных Курильских островов,

В течение последующих почти 50 лет значительных волн цунами в Северо-Курильске зафиксировано не было. Наблюдавшиеся в Северо-Курильске волны от сильнейших подводных землетрясений Курило-Камчатской зоны 1963, 1969, 1994, 1997, 2006 гг. были много ниже размаха приливных колебаний, достигающих там 2.5 м, и не сопровождались каким-либо ущербом. Единственным исключением стало цунами Тохоку 11 марта 2011 года, волны которого вызвали заметные колебания уровня во Втором Курильском проливе с размахом 1.5 и максимальными высотами заплеска, измеренными на склонах его берегов, до 2.5 м (Кайстренко и др., 2011).

Усть-Камчатск

Усть-Камчатск – поселок городского типа с населением порядка 4200 человек (по данным на 2007г.), административный центр Усть-Камчатского района Камчатского края. Расположен на левом берегу реки Камчатка недалеко от ее устья. Является одним из первых русских поселений на Камчатке, основанным в 1731 году. В посёлке действуют морской порт и рыбокомбинат, а также предприятия деревообрабатывающей промышленности. Устье реки отделено от океана песчаной косой (Дембиевская коса), шириной в 300-500 м и максимальными высотами 5-6 м, на которой сейчас расположены огороды и легкие хозяйственные постройки жителей поселка. Основная часть поселка расположена вдоль достаточно широкой протоки, соединяющей Камчатский залив с озером Нерпичье. В 1980-х годах было принято правительственное решение о переносе жилых и административных зданий поселка с берега протоки на мыс Погодный, расположенный примерно в 5 км к северо-востоку, на берегу озера Нерпичье. Этот перенос мотивировался, главным образом, высокой цунамиопасностью исторического местоположения Усть-Камчатска. Уже после начала строительства нового микрорайона выяснилось, что выбранное место имеет сейсмическую опасность на 1-2 балла выше, чем прежнее, кроме того, метеоусловия (главным образом, по ветрам) там значительно жестче. Поэтому полный перенос поселка на новое место так и не был осуществлен. Значительная часть его жителей и все производственные предприятия продолжают находиться в зоне, цунамиопасность которой усугубляется расположением портовой территории, заваленной непосредственно перед поселком круглым лесом, на пути возможного распространения волны цунами.

Наиболее разрушительным в истории Усть-Камчатска было цунами, вызванное землетрясением **13 апреля 1923 года**, имевшим, впрочем, весьма умеренную магнитуду, которая в современных каталогах оценивается величиной 7.2. Максимальная высота волн при этом цунами достигала 20 м (а по некоторым данным, даже 30 м) (Соловьев, 1978), правобережная приустьевая равнина реки Камчатки была залита на глубину до 4 километров. Как показано в работе (Minoura et al., 1993), одним из факторов, способствовавших такому глубокому проникновению цунами, было наличие на равнине снегового покрова, покрытого в это время года плотной коркой наста и льда. За два месяца до этого (**3 февраля 1923 года**), чуть южнее этого района произошло землетрясение с магнитудой 8.3, которое, однако, не сопровождалось разрушительным цунами. Максимальная высота волны для этого землетрясения по данным каталога (Соловьев, 1978) составила только 6-8 м. Имеются основания полагать, что землетрясение **13 апреля 1923 года** относится к классу так называемых цунами-землетрясений (Kanamori, 1972), которые в силу особенностей очагового механизма и расположения очага могут вызывать аномально большие волны цунами при умеренной магнитуде.

Землетрясение с большой силой ощущалось жителями Усть-Камчатска, в панике покидавших свои дома, в которых рушились печи и лопались оконные стекла (Заякин, 1996). Первая волна достигла Дембиевской косы, но не вызвала большого ущерба. Через 15 минут с юго-запада надвинулась вторая волна, имевшая высоту до 11 метров, которая разрушила большинство построек на косе

и в примыкающей к реке части Усть-Камчатска, прошла по реке в протоку Озерную и загромодила ее обломками строений и льдом. Лед на реке Камчатке был взломан вверх по течению на протяжении 7 километров. Точное число жертв при этом цунами документально не установлено. В каталоге Ю.А.Заякина (Заякин, 1996), например, приведена цифра в 36 человек. Возможно, однако, что их было гораздо больше, учитывая время возникновения цунами (1:30 ночи), наличие глубокого снежного покрова, высоту волны и температуру морской воды, заливавшей берег.

После этого события других крупных цунами от местных (Курило-Камчатских) землетрясений в Усть-Камчатске зарегистрировано не было. Приведенное в каталоге (Соловьев, 1978) сообщение о 13 метровых волнах, наблюдавшихся на Дембиевской косе **14 ноября 1936 года**, и приведенная в статье (Соловьев, 1968) фотография волны цунами, скорее всего, относятся к сильному штормовому нагону, достаточно типичному для этого времени года. Ассоциированное с этими волнами землетрясение **13.11.1936** в 12:31 по Гринвичу имело магнитуду 7.2 и вряд ли могло возбудить столь сильное цунами.

О проявлениях Камчатского цунами 1952 года для района Усть-Камчатска фактически нет надежных данных, в каталоге (Соловьев, 1978) содержится лишь указание на возможный диапазон высот (0-5 м) для большого участка побережья от Кроноцкого полуострова до Камчатского мыса. Для самого Усть-Камчатска приведено значение 0.1 м.

Среди транстихоокеанских цунами, в Усть-Камчатске наибольшую высоту имело **Чилийское цунами 1960 года**, когда волны достигали высоты 3-4 метров. Они вызвали вынос глыб льда вверх по реке на расстояние до 500 м, затопление и повреждение некоторых портовых сооружений, но благодаря предварительному оповещению, жертв среди населения не было.

3.2. Методика расчета наката

Характеристики заплеска волн цунами на отдельные участки побережья определялись с помощью реализованной исполнителями методики, предполагающей в общем случае расчет на блочных (вложенных) сетках. При этом в «океанической» (глобальной) области, включающей побережье и зону генерации цунами, в которой рассчитывается начальное смещение водной поверхности, моделирование распространения волн ведется на более грубой (но, тем не менее, достаточной для адекватности результатов) сетке, а в «береговой» (малой) подобласти, содержащей участок «защищаемого» побережья с некоторой окрестностью, используется сетка с меньшим пространственным шагом, необходимым для детального расчета характеристик наката волн.

В «океанической» области расчет наката не производится, а вдоль всей береговой линии на заданной глубине ставится условие отражения («вертикальная стенка»). Расчет наката в «береговой» подобласти осуществляется с помощью метода крупных частиц.

Технология расчета на вложенных сетках используется стандартная, когда возмущение в малую подобласть передается из вмещающей ее глобальной области через начальные данные и граничные условия в узлах грубой сетки вдоль всех внешних морских границ малой подобласти. Для пересчета граничных

значений с грубой сетки на мелкую используется линейная интерполяция, как по пространству, так и по времени (в случаях, когда текущий временной шаг мелкой сетки оказывается меньше соответствующего шага сетки грубой).

Момент начала расчета наката может не совпадать с моментом начала расчета распространения. Это используется для экономии расчетного времени в случаях, когда начальное смещение водной поверхности находится достаточно далеко от «защищаемого» участка побережья и в течение некоторого времени волновой процесс внутри малой подобласти не происходит. Момент подхода волны к малой подобласти и, соответственно, момент начала расчета наката волн, определяется в ходе предварительных расчетов распространения волн от выбранного модельного источника в глобальной области на грубой сетке.

Созданный инструментарий реализован в виде отдельного модуля (Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., 2013), встроенного в зарегистрированный ранее исполнителями программный комплекс MGC (Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А., 2011). Этот модуль позволяет рассчитывать следующие характеристики процесса взаимодействия волн цунами с «защищаемым» побережьем в малой подобласти:

- * промежуточные свободные поверхности в выбранные пользователем моменты времени (с равным интервалом);
- * промежуточные поля каждой из компонент скорости в те же моменты времени;
- * картины «свечений» – массивы максимальных и минимальных значений свободной поверхности в каждом узле мелкой сетки за все время расчета наката;
- * массивы максимальных значений модуля скорости волн в каждом узле мелкой сетки за все время расчета наката;
- * маски зоны затопления побережья;
- * длительности затопления побережья, рассчитываемые как суммарное время, которое изначально «сухие» узлы сетки на побережье были затопленными в ходе наката волн.

Для моделирования процесса наката волн цунами на побережье со сложным рельефом береговой кромки в рамках теории мелкой воды был разработан комплекс программ, реализующий явную схему Мак-Кормака и метод крупных частиц (Белоцерковский, Давыдов, 1982) на вложенных блочных разностных сетках, относящихся к дальней и ближней зонам. Под дальней зоной понимается прямоугольная область, охватывающая часть побережья и океаническую зону, в которой зарождается и распространяется к берегу волна цунами. Ближней зоной является подобласть дальней зоны, включающая в себя часть суши и часть океана, через границы которой проходит волна цунами при ее движении к побережью. Структура этих зон и построенных в них разностных сеток показана на Рис. 5.

Алгоритм решения состоял из двух основных этапов. На первом из них на основной (грубой) сетке на каждом новом $n+1$ – ом шаге по времени в дальней зоне получалось численное решение данной задачи. Это решение на границах ближней зоны интерполировалось на мелкую сетку и принималось в качестве граничных условий для ближней зоны. Затем методом крупных частиц в этой зоне рассчитывались все параметры движения волны, которые затем интерполировались на грубую сетку, «подправляя» значения параметров на ней.

Нелинейные уравнения мелкой воды с учетом силы трения, осредненной по глубине, и силы Кориолиса записывались в сферической системе координат, в которой координатная плоскость $r = R_E$ является поверхностью «спокойной» воды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{R_E \cos(\phi)} \left[\frac{\partial(Hu_\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(H \cos(\phi)u_\phi)}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{1}{2 \cos(\phi)} \frac{\partial(u_\lambda^2)}{\partial \lambda} + u_\phi \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} + \frac{g}{\cos(\phi)} \frac{\partial(H-h)}{\partial \lambda} \right] &= f_\lambda, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{u_\lambda}{\cos(\phi)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u_\phi^2)}{\partial \phi} + g \frac{\partial(H-h)}{\partial \phi} \right] &= f_\phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где: $H(\lambda, \phi, t)$, $h(\lambda, \phi)$ – полная глубина воды и отсчитываемый от поверхности «спокойной» воды профиль дна соответственно, $u_\lambda(\lambda, \phi, t)$, $u_\phi(\lambda, \phi, t)$ – компоненты вектора скорости по направлениям λ и ϕ соответственно, R_E – средний радиус Земли, $f_\lambda = \alpha u_\phi - gk_f^2 \frac{u_\lambda \sqrt{u_\lambda^2 + u_\phi^2}}{H^{4/3}}$, $f_\phi = -\alpha u_\lambda - gk_f^2 \frac{u_\phi \sqrt{u_\lambda^2 + u_\phi^2}}{H^{4/3}}$, $\alpha = 2\omega_E \sin(\phi)$, ω_E – угловая скорость вращения Земли, k_f – коэффициент шероховатости (коэффициент Шези). Средний радиус Земли $R_E = 6371$ км, $\omega_E = 7.292115 \cdot 10^{-5} 1/c$.

В системе (1) во избежание деления на нуль возможная область изменения координаты ϕ определяется следующим образом: $-\frac{17\pi}{36} \leq \phi \leq \frac{17\pi}{36}$. Так как движение жидкости в рамках планетарного масштаба ограничено на южном полюсе Антарктидой, а на северном – полярными льдами, то указанное ограничение на изменение координаты ϕ является вполне разумным и не ограничивает применение системы уравнений для описания распространения волн на поверхности Земли.

Математические модели, алгоритмы и методики моделирования генерации и распространения волны цунами вплоть до начального положения линии уреза, на которой ставится условие «непротекания» (вертикальная стенка), применяются в глобальной области всюду за исключением малых областей, в которых осуществляется моделирование наката волны цунами. Подробное изложение этих моделей, алгоритмов и методик приведено в Руководящем документе, подготовленном при участии авторов настоящего отчета на одном из предыдущих этапов работы (Порядок расчета максимальных высот волн цунами..., 2011).

Для моделирования наката волны цунами на побережье в рамках модели (1) выделяется малая расчетная область, в которой задаются цифровые массивы батиметрии и рельефа суши с детальностью, достаточной для получения результатов с приемлемой точностью. Такая область представляет собой прямоугольник (см. Рис. 5), на боковых границах которого задаются параметры

течения, полученные путем интерполяции по времени и по пространству вдоль этих границ результатов расчета в глобальной области.

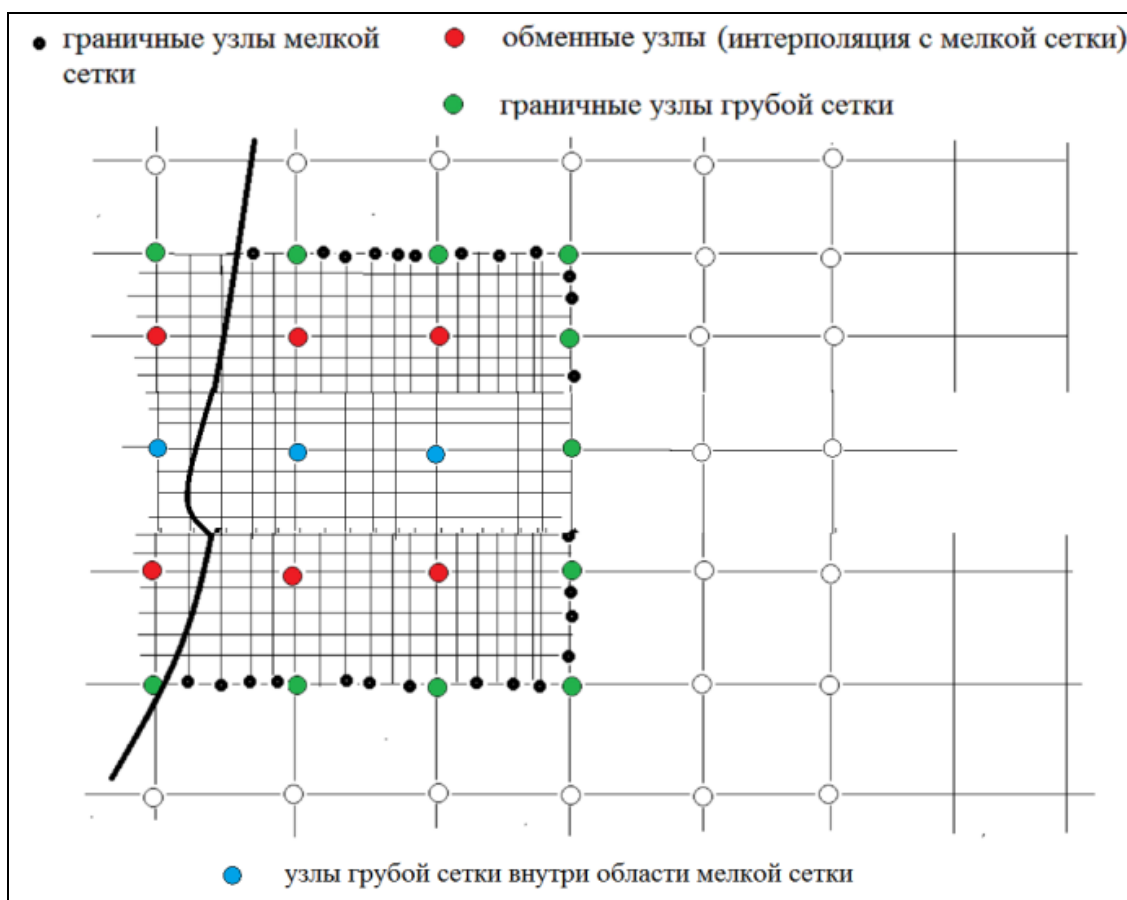


Рис. 5. Структура вложенных сеток, жирная черная линия соответствует начальному положению линии уреза.

Для численного решения системы (1) применяется метод крупных частиц (Белоцерковский, Давыдов, 1982). Использование «классического» метода частиц в ячейках оказывается невозможным в силу статистического характера получаемого с его помощью решения, которое, в частности, не удовлетворяет условию гидростатического равновесия в покоящейся воде и значительно искажает процесс распространения волн. Метод крупных частиц лишен этого недостатка и позволяет получить сбалансированную разностную схему. При его реализации используется равномерная прямоугольная разностная сетка, что обусловлено следующими причинами:

- побережье является достаточно сильно изрезанным, и поэтому весьма проблематично построить криволинейную разностную сетку, пригодную для решения системы (1);
- в процессе наката волны происходит затекание воды во впадины, наличие которых обусловлено рельефом суши (устье рек, каньоны и т.п.), а также обтекание различного рода возвышенностей, поэтому использовать адаптивную сетку, «привязанную» к линии уреза, не представляется возможным.

Реализация метода крупных частиц проводится в два этапа. На первом (эйлеровом) этапе в системе (1) отбрасываются все конвективные члены и система записывается в виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{g}{R_E \cos(\phi)} \frac{\partial(H-h)}{\partial \lambda} &= -u_\lambda C_R + \alpha u_\phi, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{g}{R_E} \frac{\partial(H-h)}{\partial \phi} &= -u_\phi C_R - \alpha u_\lambda,\end{aligned}\tag{2}$$

где: $C_R = gk_f^2 \frac{\sqrt{u_\lambda^2 + u_\phi^2}}{H^{4/3}}.$

На втором (лагранжевом) этапе решаются уравнения переноса

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{R_E \cos(\phi)} \left[\frac{\partial(Hu_\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(H \cos(\phi)u_\phi)}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{1}{2 \cos(\phi)} \frac{\partial(u_\lambda^2)}{\partial \lambda} + u_\phi \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{u_\lambda}{\cos(\phi)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u_\phi^2)}{\partial \phi} \right] &= 0.\end{aligned}\tag{3}$$

Для решения уравнений (2) – (3) строится явная разностная схема первого порядка точности. Заметим, что в силу изрезанности берегового рельефа суши для получения численного решения с достаточным разрешением картины заплеска волны цунами на побережье, как уже отмечалось выше, необходимо использовать достаточно детальную разностную сетку. Поэтому применение схемы первого порядка точности, обладающей к тому же монотонными свойствами, вполне оправдано. При ее построении использовалась разностная сетка с разнесенными узлами, структура которой и шаблон соответствующей разностной схемы приведены на следующем рисунке (Рис. 6). В узлах сетки определены сеточные функции $H_{i,j}$ и $h_{i,j}$ (кружочки), расположение компонент скорости u_λ , u_ϕ обозначены квадратами и треугольниками соответственно.

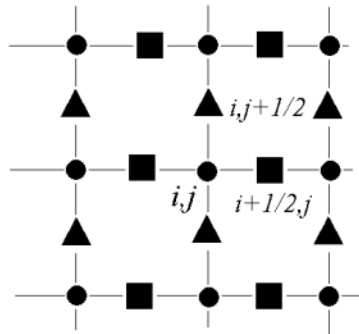


Рис. 6. Структура шаблона разностной схемы.

Разностная схема первого этапа записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \tilde{H}_{i,j} &= H_{i,j}^n, \\
 \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} &= \\
 &= (u_{\lambda,i+1/2,j}^n - g \Delta t ((H-h)_{i+1,j}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \cos(\phi_j) \Delta \lambda) + \Delta t \alpha u_{\phi}) / (1 + \Delta t C_R), \\
 \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} &= \\
 &= (u_{\phi,i,j+1/2}^n - g \Delta t ((H-h)_{i,j+1}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \Delta \phi) - \Delta t \alpha u_{\lambda}) / (1 + \Delta t C_R).
 \end{aligned} \tag{4}$$

На втором этапе для уравнений переноса (3) используется противопотоковая разностная схема:

$$\begin{aligned}
 H_{i,j}^{n+1} &= \tilde{H}_{i,j} - \Delta t ((\tilde{q}_{i+1/2,j} - \tilde{q}_{i-1/2,j}) / \Delta x + (\tilde{q}_{i,j+1/2} - \tilde{q}_{i,j-1/2}) / \Delta y), \\
 \tilde{q}_{i+1/2,j} &= \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} > 0, \\ \tilde{H}_{i+1,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} < 0, \end{cases} \quad \tilde{q}_{i,j+1/2} = \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} > 0, \\ \tilde{H}_{i,j+1} u_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} < 0. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Аналогичным образом записываются выражения для вычисления значений $(u_{\lambda})_{i+1/2,j}^{n+1}$ и $(u_{\phi})_{i,j+1/2}^{n+1}$. Условием устойчивости разностной схемы является

выполнение неравенства $\Delta t \leq \alpha \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u_{\lambda}| + \sqrt{gH}}, \frac{\Delta y}{|u_{\phi}| + \sqrt{gH}} \right\}$ во всех узлах разностной сетки, где $0 < \alpha < 1$ – эмпирический коэффициент запаса устойчивости.

При расчетах параметров течения в узлах сетки, попадающих в область суши, все параметры течения, в том числе и величина отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня $\eta = H - h$ полагались равными нулю. В узлах сетки на границе воды и суши система уравнений мелкой воды записывалась в недивергентном виде, и на лагранжевом этапе для решения уравнений переноса использовались односторонние противопотоковые разности. Для определения положения линии уреза использовался метод ее улавливания в узел разностной сетки.

3.3. Постановка задач расчета характеристик заплеска

3.3.1. Построение набора «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений

При формировании наборов «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений исполнителями использовались совокупности модельных источников цунамигенных землетрясений ближней зоны (Рис. 7 – Рис. 10), созданные в ходе выполнения контрактных работ в 2007 – 2012 гг.

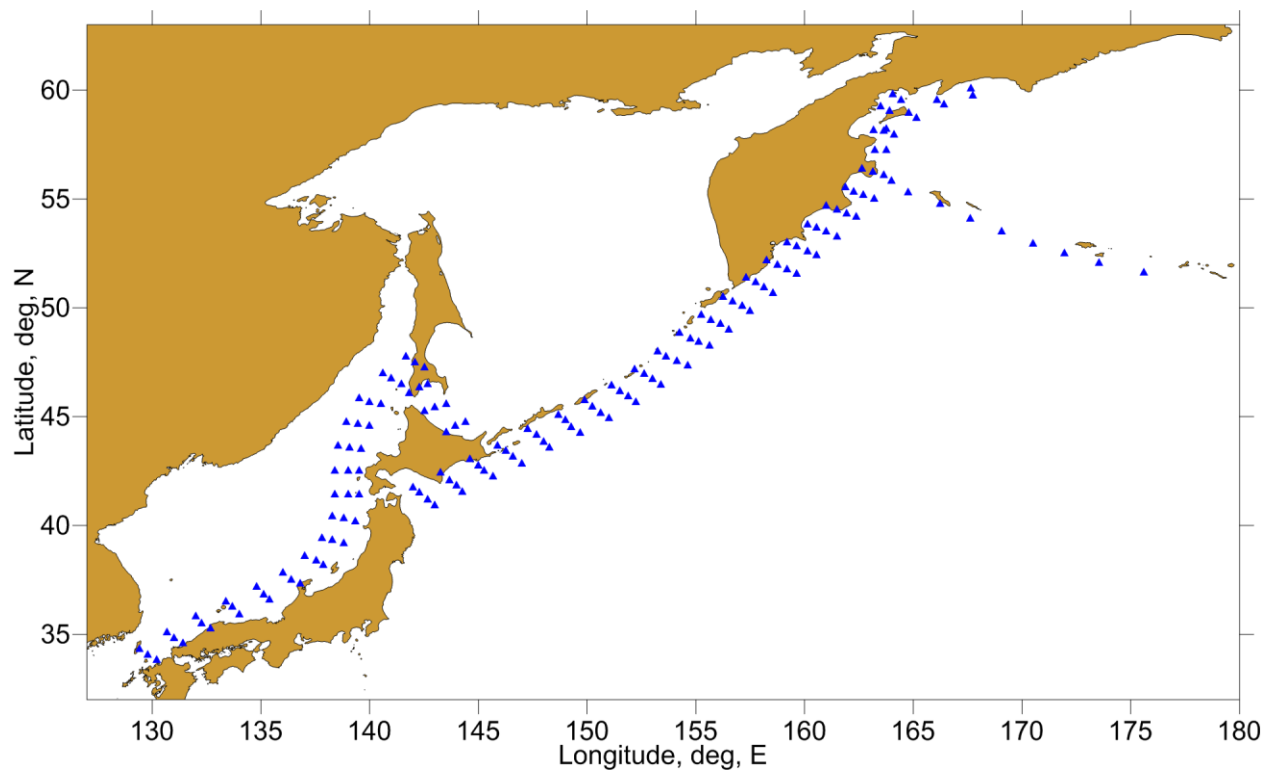


Рис. 7. Схема размещения эпицентров гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудой 7.8 (синие маркеры).

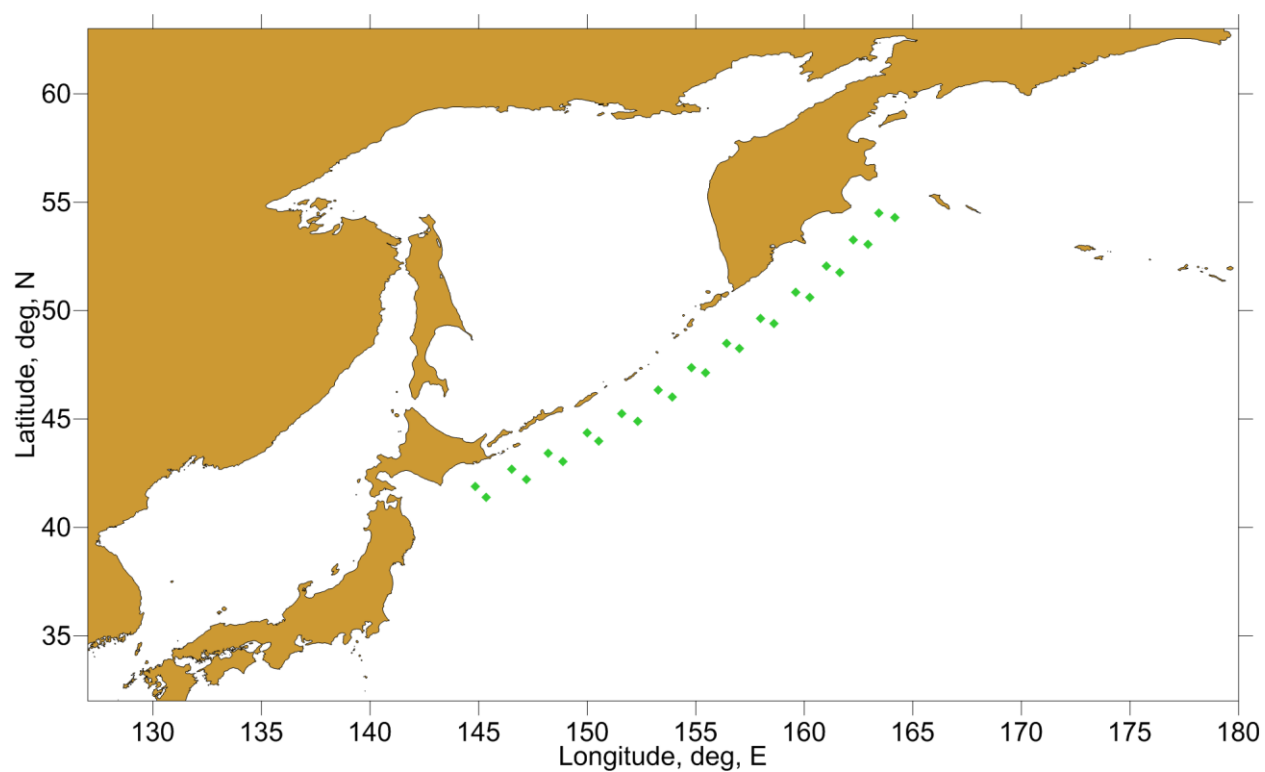


Рис. 8. Схема размещения эпицентров гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.1 (зеленые маркеры).

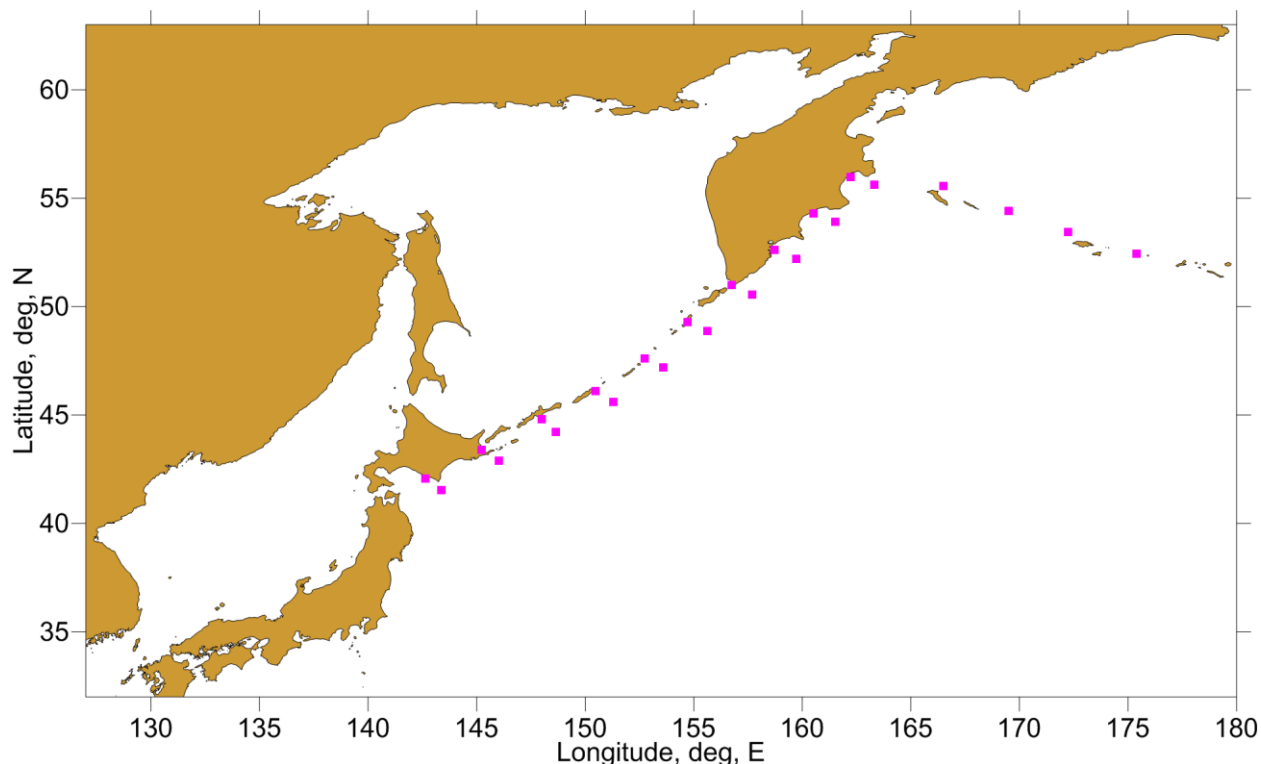


Рис. 9. Схема размещения эпицентров гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудой 8.4 (лиловые маркеры).

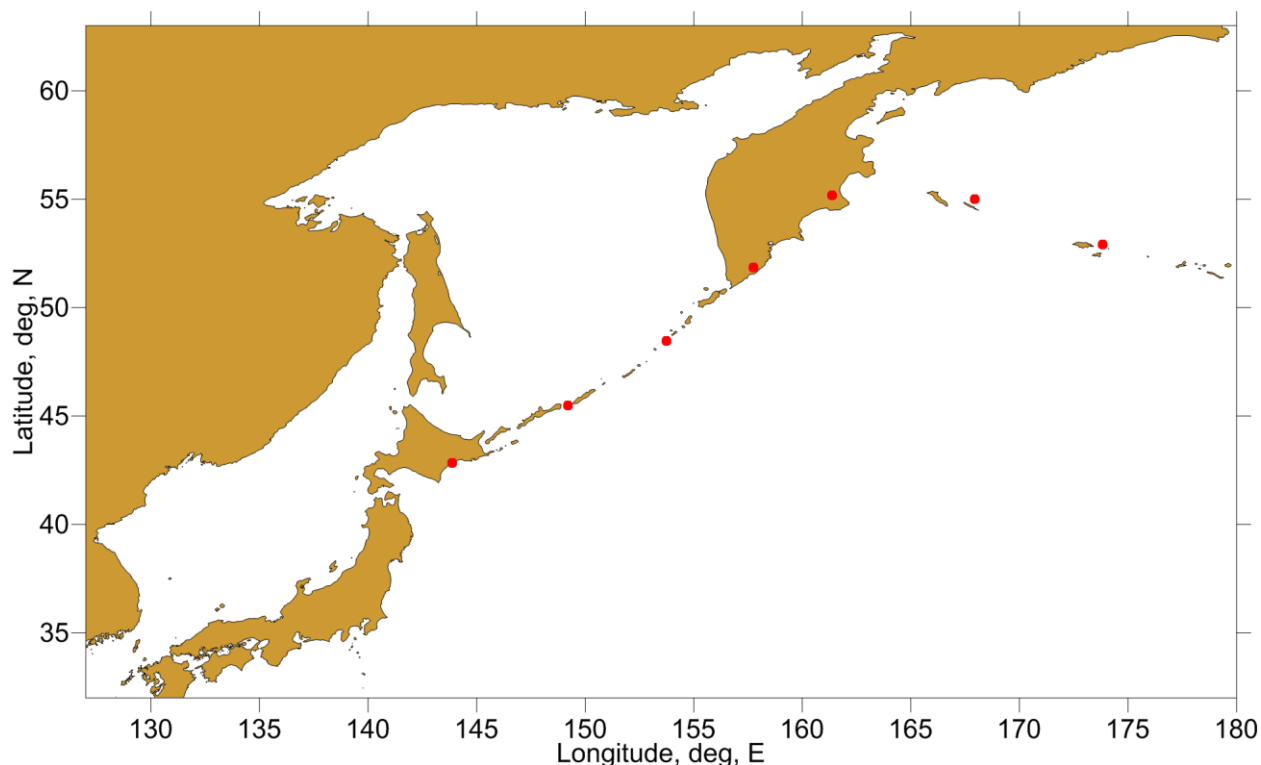


Рис. 10. Схема размещения эпицентров гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудой 9.0 (красные маркеры).

«Значимость» очага определялась по результатам анализа распределений максимальных и минимальных высот волн («мокрых» линий), рассчитанных в указанный период, так, что «значимым» считался очаг, если порожденные им максимальные (минимальные) высоты волн цунами вблизи рассматриваемого пункта побережья по абсолютной величине превышали пороговое значение 0.5 м.

Соответствующие значения рассчитывались «на стенке», установленной в точках невозмущенного уреза водной поверхности. Соответствующие вычислительные эксперименты проводились на одномоментной расчетной сетке, что позволяет получить качественную сравнительную оценку проявления волн цунами.

Таким образом, по результатам анализа соответствующей гистограммы (Рис. 11) для п. **Малокурильское** «значимыми» стали очаги

7.8 5b 5c

8.1 3e 3f 4e 4f

8.4 3a 3b 4b

9.0 87a

Расчеты для источников 86a, 88a, 89a, существенно уступающие источнику 87a по своему проявлению в окрестности п. Малокурильское, требуют значительного расширения расчетной области и в силу этих причин перенесены на следующий этап работы.

При рассмотрении региона, прилегающего к п. **Северо-Курильск**, исполнителями было принято решение учесть результаты (Рис. 12), рассчитанные не только в узле сетки, соответствующем этому пункту, но и в соседних (справа и слева) узлах. В этом случае в набор «значимых» вошли следующие источники:

7.8 11c 11d 12b 12c 12d 13a 13b 13c 13d 14b 14c 14d 15d

8.1 7e 7f 8e 8f 9e 9f 10e 10f

8.4 5a 5b 6a 6b 7a 7b 8a 8b

9.0 88a 89a

При этом расчеты для источников, индексы которых размещены в ячейках с синей заливкой, проводились в области «SK-I», с зеленой – «SK-II». Параметры этих расчетных областей приведены в следующем разделе.

Для определения характеристик заплесков на побережье, прилегающее к п. **Усть-Камчатск**, в перечень «значимых» по результатам анализа гистограмм (Рис. 13) были включены следующие источники:

7.8 19a 19c 19d 20a 20b 20c 20d

8.1 13e 13f

8.4 9a 9b 10a 10b

Как и в случае п. Малокурильское, расчеты для источника 90a требуют значительного расширения расчетной области и в силу этих причин перенесены на следующий этап работы.

Параметры механизмов для указанных выше модельных цунамигенных землетрясений приведены в следующей таблице (Таблица 1).

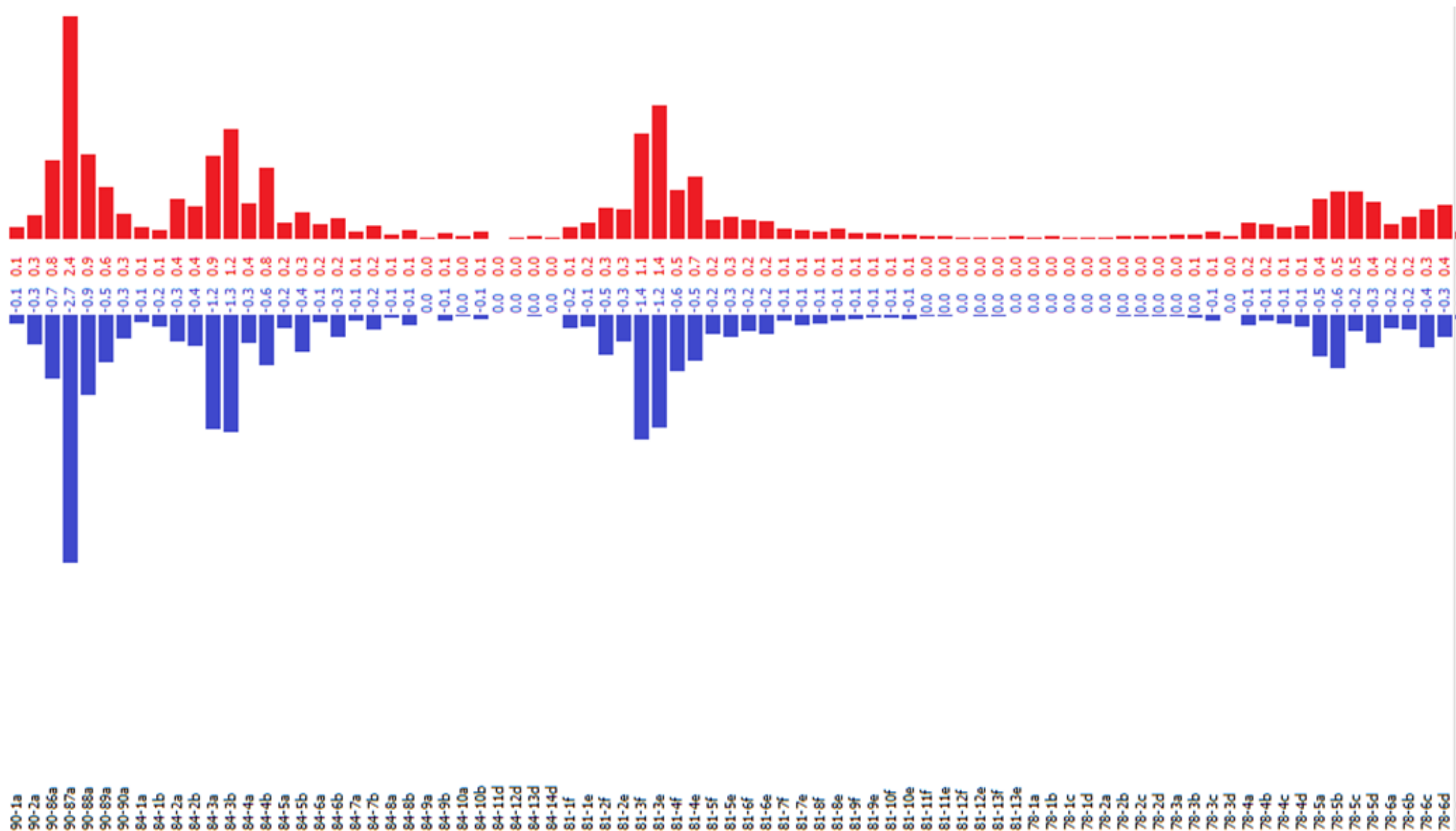
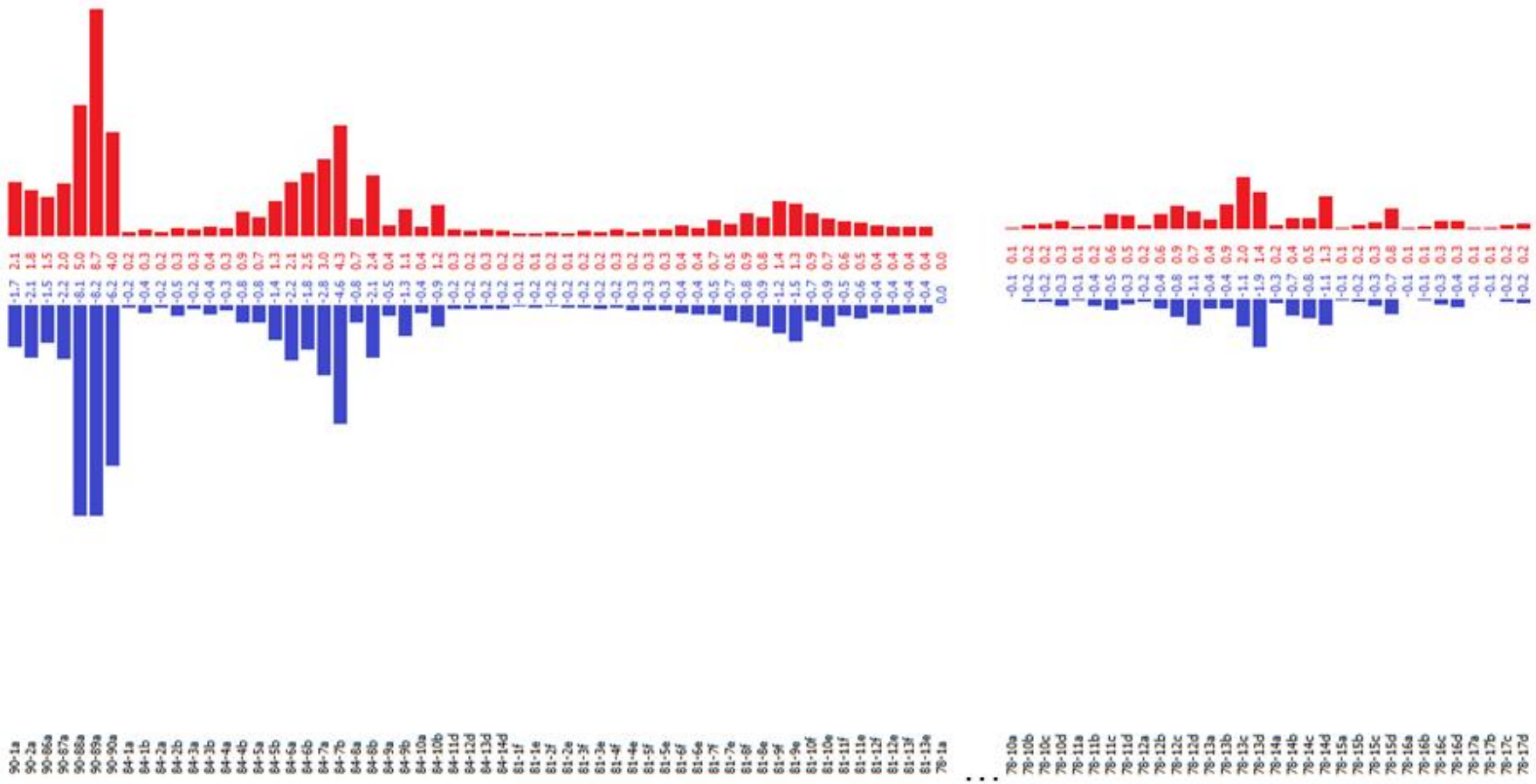
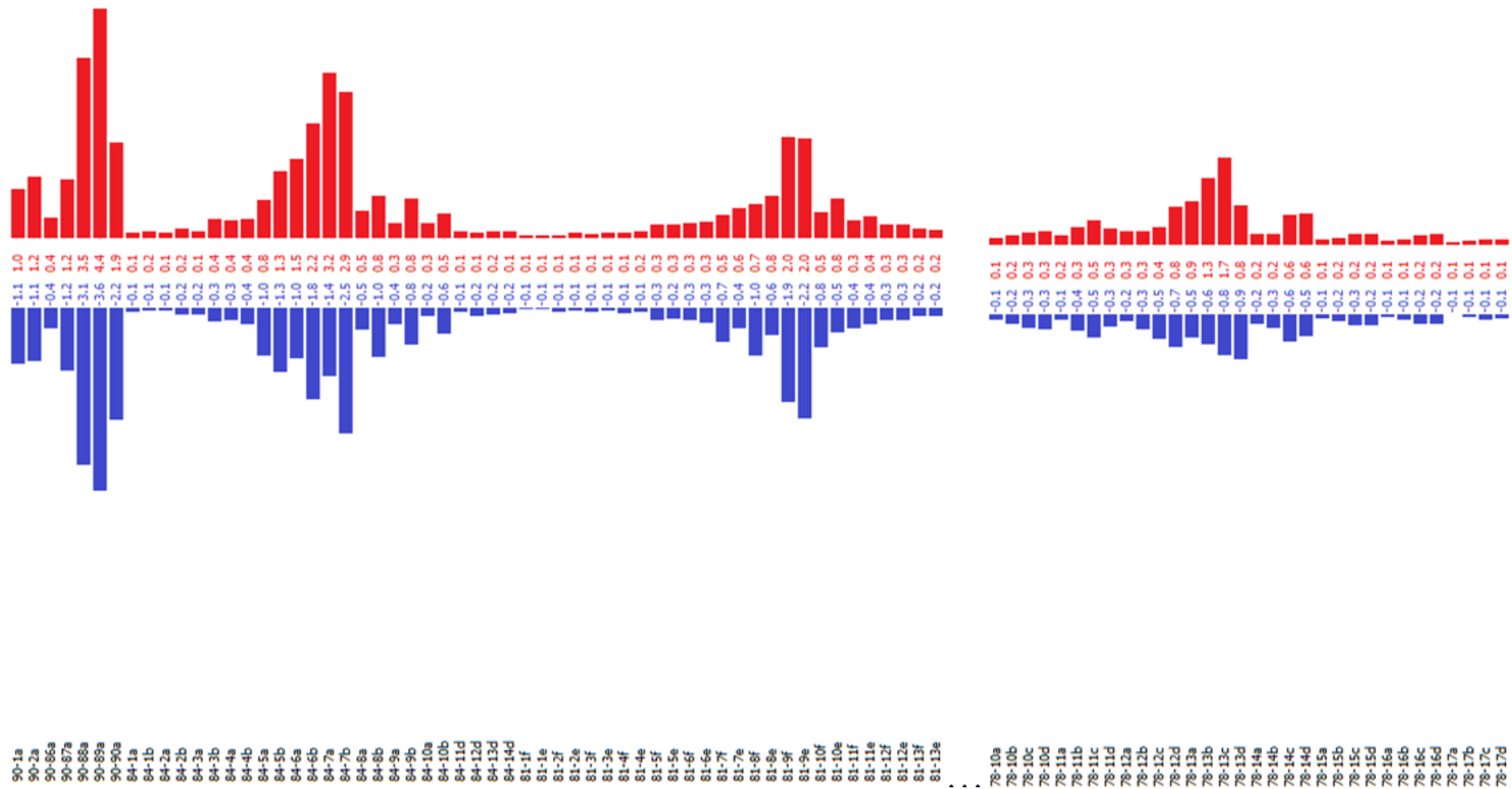


Рис. 11. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемого пункта Малокурильское, рассчитанных на одноминутной расчетной сетке для исходного набора гипотетических цунамигенных землетрясений.



(a)



(b)

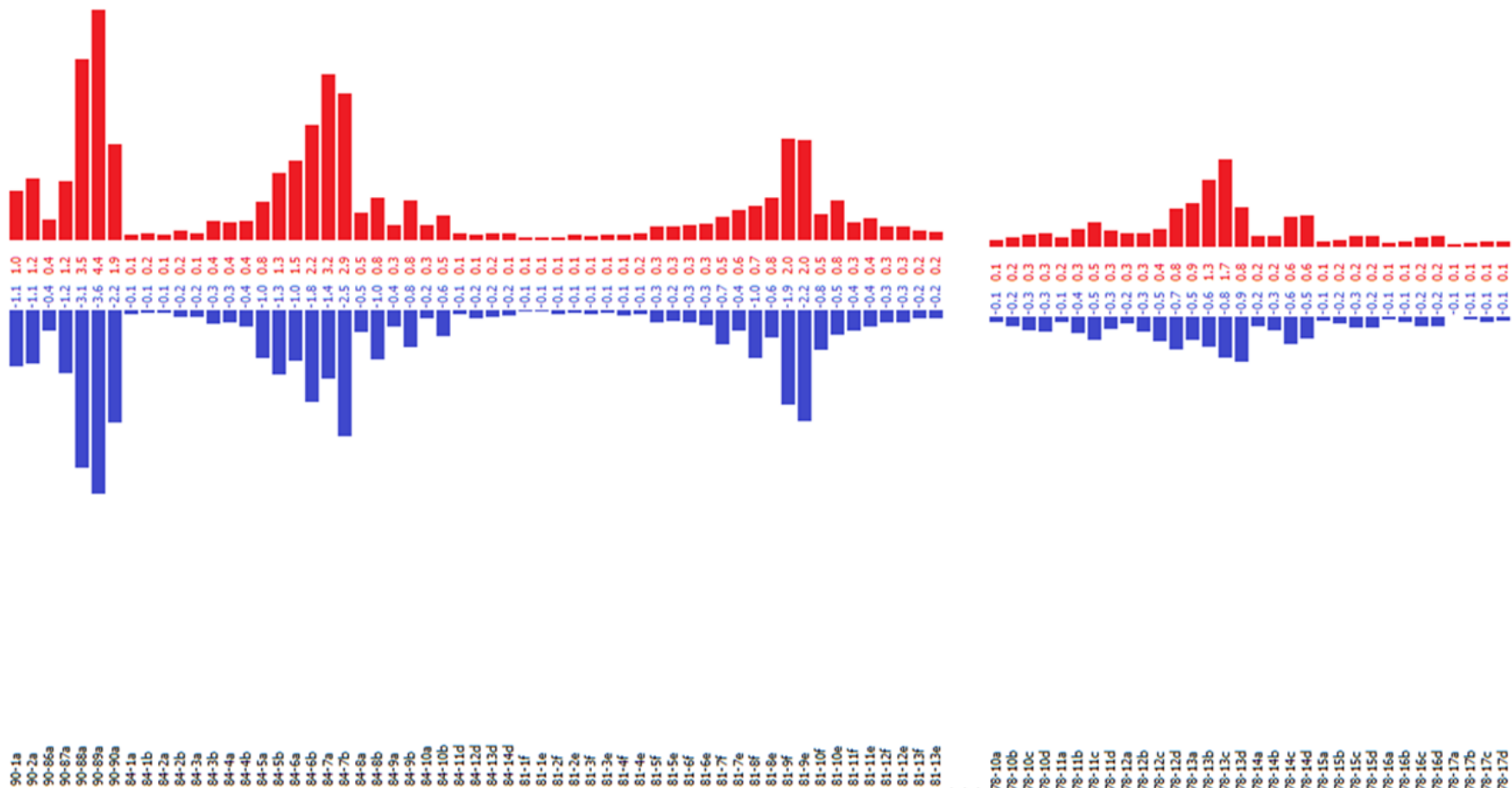
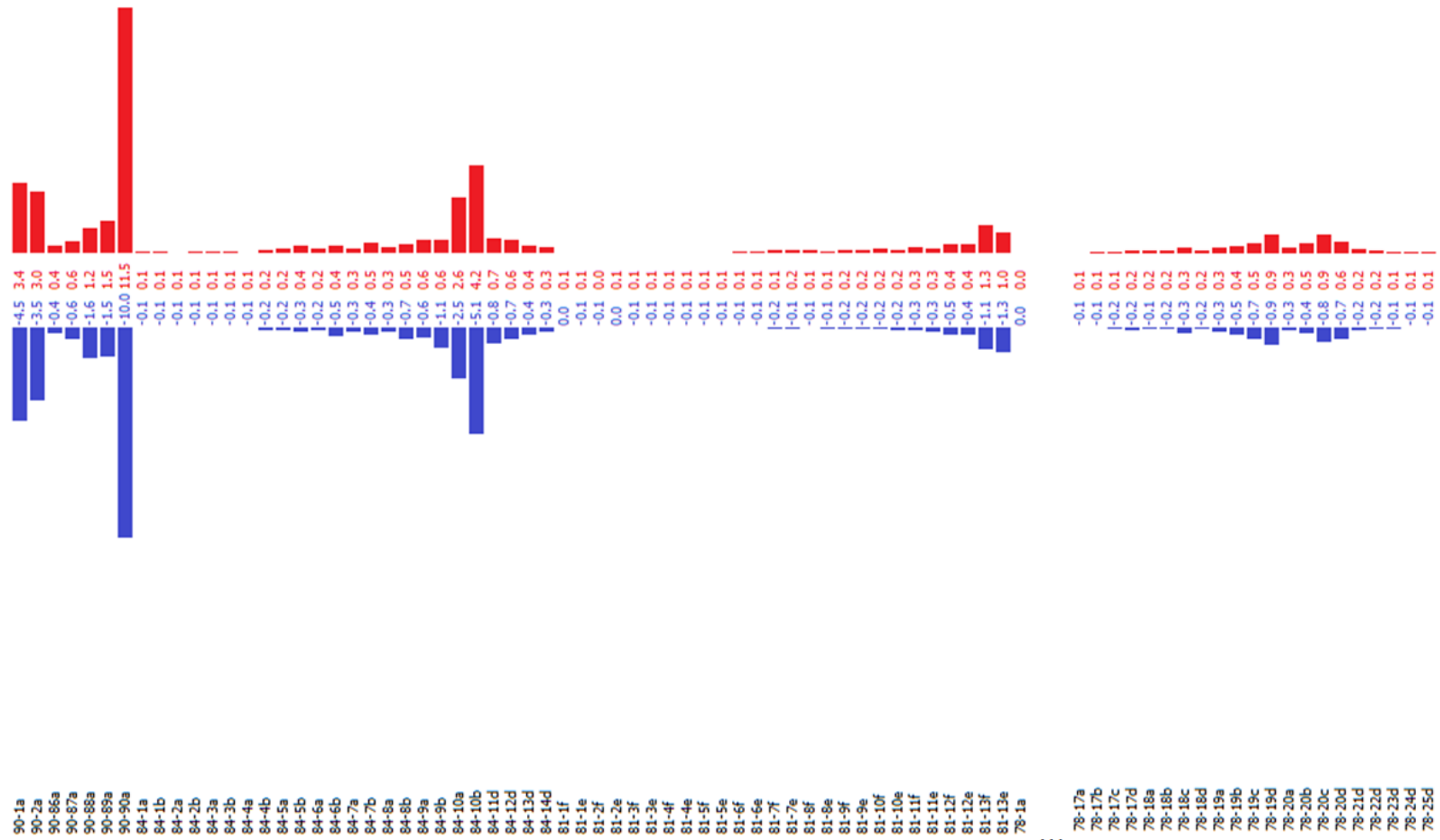
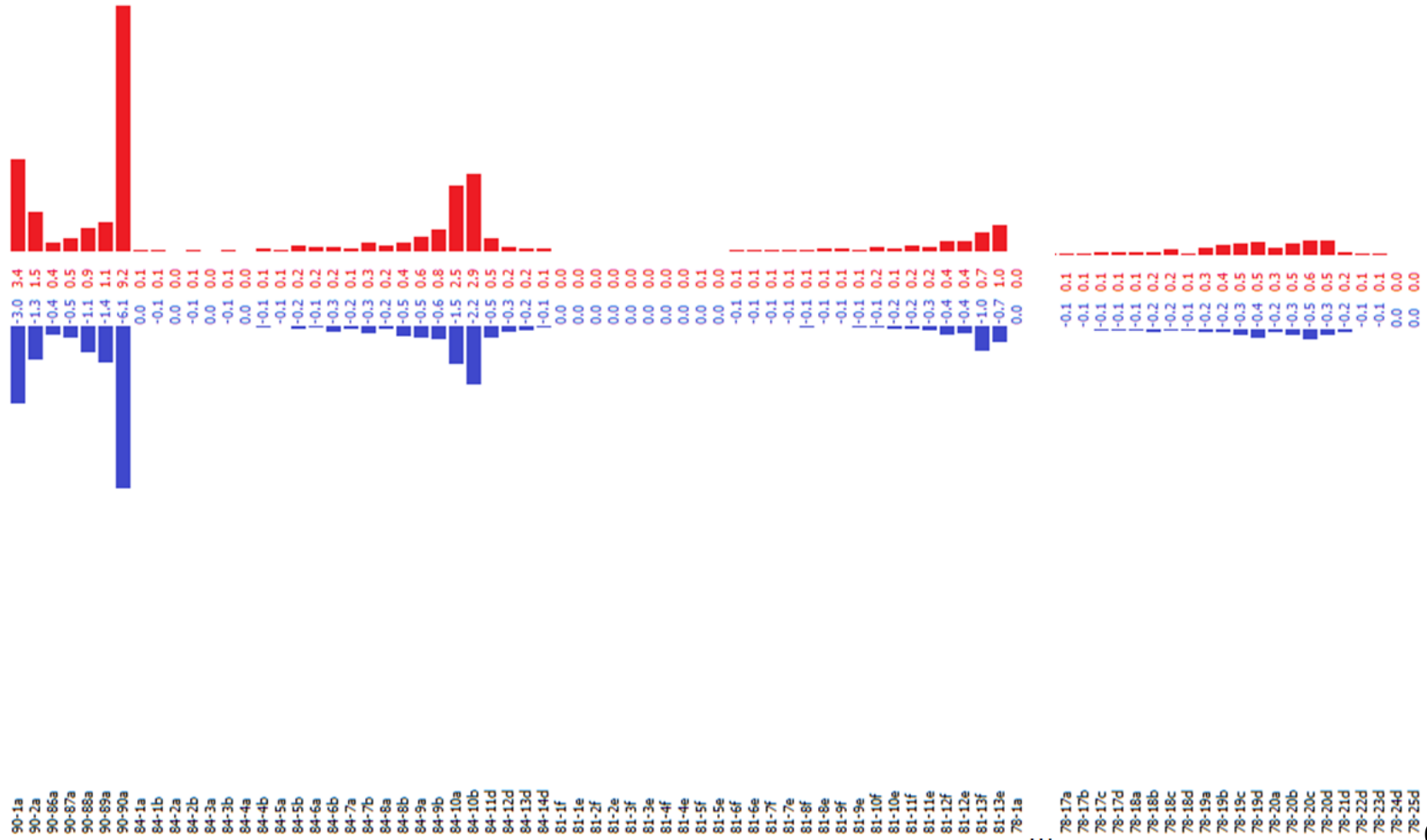


Рис. 12. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемого пункта Северо-Курильск (a), и его ближайших соседей слева (b) и справа (c), рассчитанных на одноминутной расчетной сетке для исходного набора гипотетических цунамигенных землетрясений.



(a)



(b)

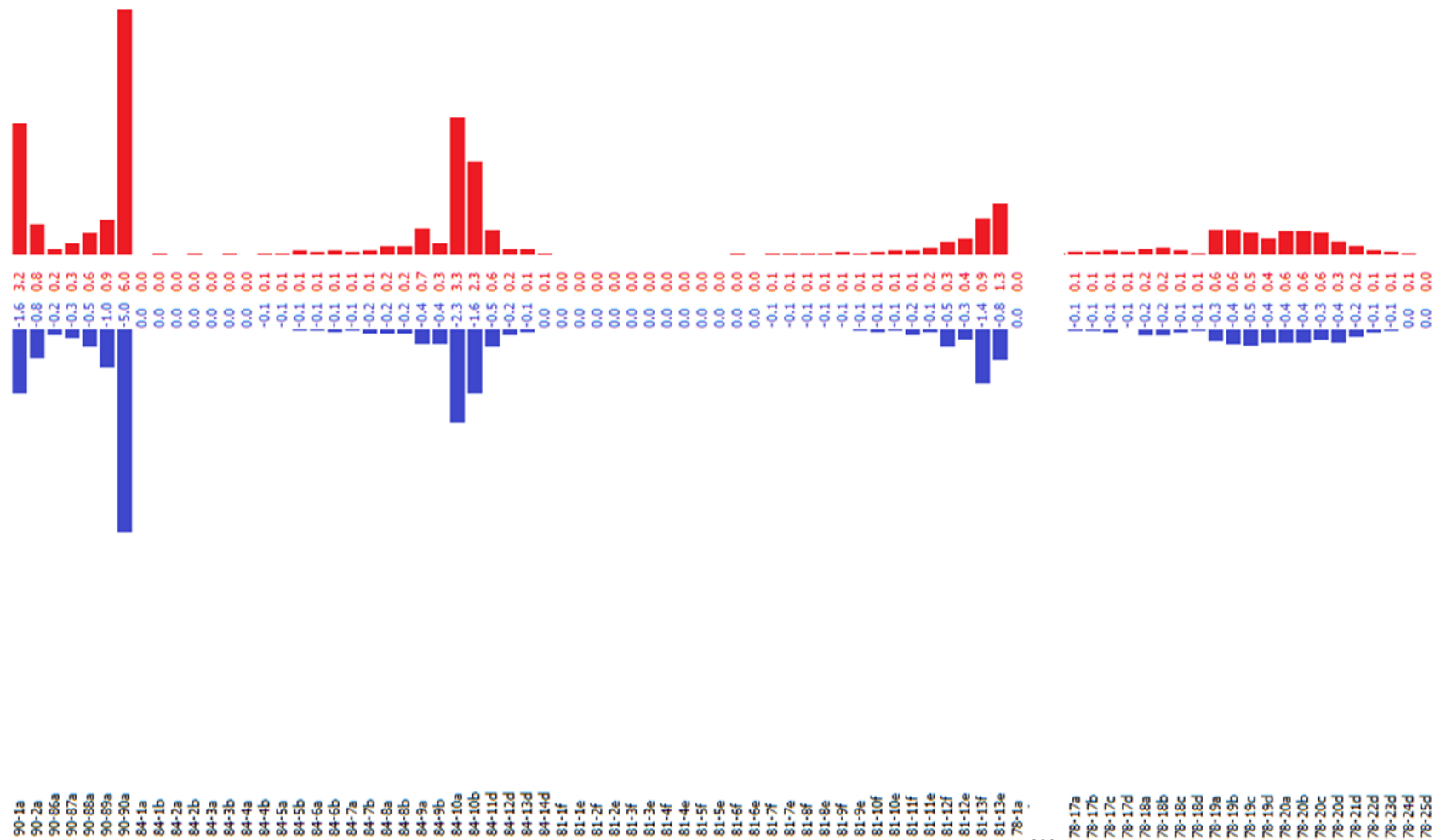


Рис. 13. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемого пункта Усть-Камчатск (а), и его ближайших соседей слева (b) и справа (с), рассчитанных на одноминутной расчетной сетке для исходного набора гипотетических цунамигенных землетрясений.

Таблица 1. Список параметров модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами M_w 7.8, 8.1, 8.4 и 9.0, использовавшихся для расчетов наката на «защищаемые» участки побережья

ID	Широта эпицентра (N)	Долгота эпицентра (E)	L, км.	W, км.	DE, град.	LA, град.	TE, град.	D0, м.	H_top, км.
78-5b	43.83	148.00	108	38	15	90	56	2.74	15
78-5c	44.17	147.67	108	38	15	90	56	2.74	25
78-11c	48.58	154.75	108	38	15	90	40	2.74	25
78-11d	48.83	154.25	108	38	15	90	40	2.74	35
78-12b	49.25	156.13	108	38	15	90	40	2.74	15
78-12c	49.42	155.69	108	38	15	90	40	2.74	25
78-12d	49.67	155.25	108	38	15	90	40	2.74	35
78-13a	49.83	157.50	108	38	15	90	38	3.42	5
78-13b	50.08	157.13	108	38	15	90	38	2.74	15
78-13c	50.29	156.69	108	38	15	90	38	2.74	25
78-13d	50.50	156.25	108	38	15	90	38	2.74	35
78-14b	50.92	158.13	108	38	15	90	38	2.74	15
78-14c	51.17	157.75	108	38	15	90	38	2.74	25
78-14d	51.38	157.31	108	38	15	90	38	2.74	35
78-15d	52.17	158.25	108	38	15	90	35	2.74	35
78-19a	55.00	163.19	108	38	15	90	33	3.42	5
78-19c	55.33	162.25	108	38	15	90	33	2.74	25
78-19d	55.54	161.88	108	38	15	90	33	2.74	35
78-20a	55.83	164.00	108	38	15	90	33	3.42	5
78-20b	56.08	163.63	108	38	15	90	33	2.74	15
78-20c	56.25	163.13	108	38	15	90	33	2.74	25
78-20d	56.38	162.63	108	38	15	90	33	2.74	35
81-3e	43.43	148.20	150	52	45	90	56	5.1	5
81-3f	43.04	148.87	150	52	135	90	56	5.1	5
81-4e	44.35	150.00	150	52	45	90	52	5.1	5
81-4f	43.98	150.53	150	52	135	90	52	5.1	5
81-7e	47.38	154.8	150	52	45	90	42	5.1	5
81-7f	47.13	155.45	150	52	135	90	42	5.1	5
81-8e	48.5	156.43	150	52	45	90	40	5.1	5
81-8f	48.25	157	150	52	135	90	40	5.1	5
81-9e	49.65	158	150	52	45	90	38	5.1	5
81-9f	49.4	158.6	150	52	135	90	38	5.1	5
81-10e	50.85	159.6	150	52	45	90	36	5.1	5
81-10f	50.6	160.25	150	52	135	90	36	5.1	5
81-13e	54.5	163.45	150	52	45	90	33	5.1	5
81-13f	54.3	164.18	150	52	135	90	33	5.1	5
84-3a	44.21	148.64	215	75	15	90	54	6.1	5
84-3b	44.8	148.01	215	75	15	90	54	5.5	25
84-4b	46.11	150.48	215	75	15	90	51	5.5	25
84-5a	47.18	153.61	215	75	15	90	43	6.1	5
84-5b	47.61	152.75	215	75	15	90	43	5.5	25
84-6a	48.88	155.64	215	75	15	90	40	6.1	5
84-6b	49.28	154.72	215	75	15	90	40	5.5	25
84-7a	50.56	157.7	215	75	15	90	38	6.1	5
84-7b	50.98	156.75	215	75	15	90	38	5.5	25
84-8a	52.2	159.71	215	75	15	90	35	6.1	5
84-8b	52.61	158.73	215	75	15	90	35	5.5	25
84-9a	53.9	161.51	215	75	15	90	34	6.1	5

84-9b	54.28	160.52	215	75	15	90	34	5.5	25
84-10a	55.63	163.33	215	75	15	90	33	6.1	5
84-10b	55.97	162.23	215	75	15	90	33	5.5	25
90-87a	45.48	149.22	430	150	15	90	52	11.6	15
90-88a	48.47	153.73	430	150	15	90	41	11.6	15
90-89a	51.86	157.75	430	150	15	90	36	11.6	15

3.3.2. Расчетные области, параметры расчетов

В отчетный период, согласно Техническому заданию, исполнителями были выполнены расчеты наката волн цунами на побережья, прилегающие к трем защищаемым пунктам: Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск. Эти расчеты проводились на 6 часов физического времени.

На предыдущем этапе работ для определения характеристик заплеска волн цунами в районах, прилегающих к рассмотренным защищаемым пунктам, были построены детальные цифровые массивы топографии и батиметрии в соответствующих малых областях. Источником информации для такого построения послужили для суши (топография) – массив SRTM-3sec (SRTM version 2.1, http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/), для акваторий (батиметрия) – оцифрованные исполнителями изображения, полученные из набора батиметрических карт C-MAP ООО «Компания «Век Камчатка Плюс» M-AN-C013.12 Kamchatka peninsula and Kuril islands, а также изображения, предоставленные Заказчиком. Имеющиеся значения высот рельефа были пересчитаны с использованием метода билинейной интерполяции на регулярную сетку с шагом 1 угловая секунда (около 30 метров). В качестве рельефа в глобальных областях использовался цифровой массив GEBCO-30sec, так же переинтерполированный на сетку с шагом 10 угловых секунд.

Для пунктов «Малокурильское» и «Усть-Камчатск» рассматривалось по одной глобальной области (кодовые названия – «МК» и «УК» соответственно), а для пункта «Северо-Курильск» – две глобальные области, одна из которых («SK-I») кроме защищаемого пункта захватывала прилегающие акватории к югу от малой области, а вторая («SK-II») – к северу. Границы соответствующих глобальных и малых областей приведены ниже в таблице (Таблица 2), а их взаимное расположение совместно с защищаемыми пунктами и эпицентрами рассмотренных модельных сейсмических очагов – на рисунках (Рис. 14 – Рис. 18).

Рельефы топографии и батиметрии малых областей, в которых выполнялось моделирование наката волн цунами, представлены на рисунках (Рис. 19 – Рис. 21).

Таблица 2. Координаты границ расчетных областей для моделирования распространения волн цунами и их наката на побережье

Защищаемый пункт	б. Малокурильская	г. Северо-Курильск		п. Усть-Камчатск
ID	МК	SK-I	SK-II	УК
Границы глобальной области, град.	145.0–153.0° E, 41.0–48.0° N	151.0–158.0° E, 45.0–52.0° N	154.3–161.8° E, 47.5–55.0° N	159.0–167.0° E, 52.0–57.5° N
Границы малой подобласти, град.	146.7778–146.8417° E, 43.8417–43.9167° N	156.1–156.3° E, 50.6–50.725° N	156.1–156.3° E, 50.6–50.725° N	1662.45–162.65° E, 56.15–56.25° N

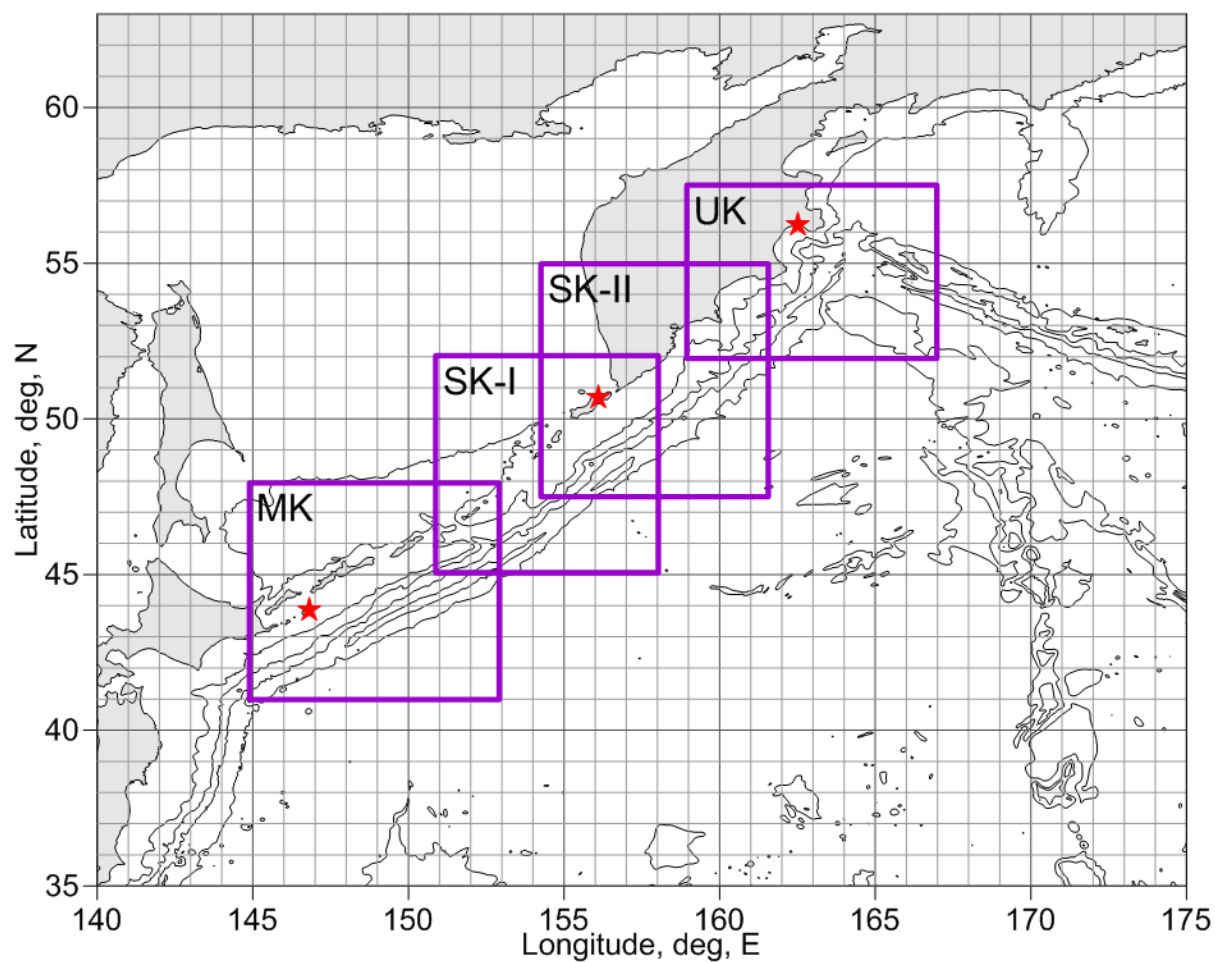


Рис. 14. Схема размещения защищаемых пунктов (★) и глобальных расчетных областей (сиреневые прямоугольники). Кодовые названия областей указаны в верхних левых углах прямоугольников.

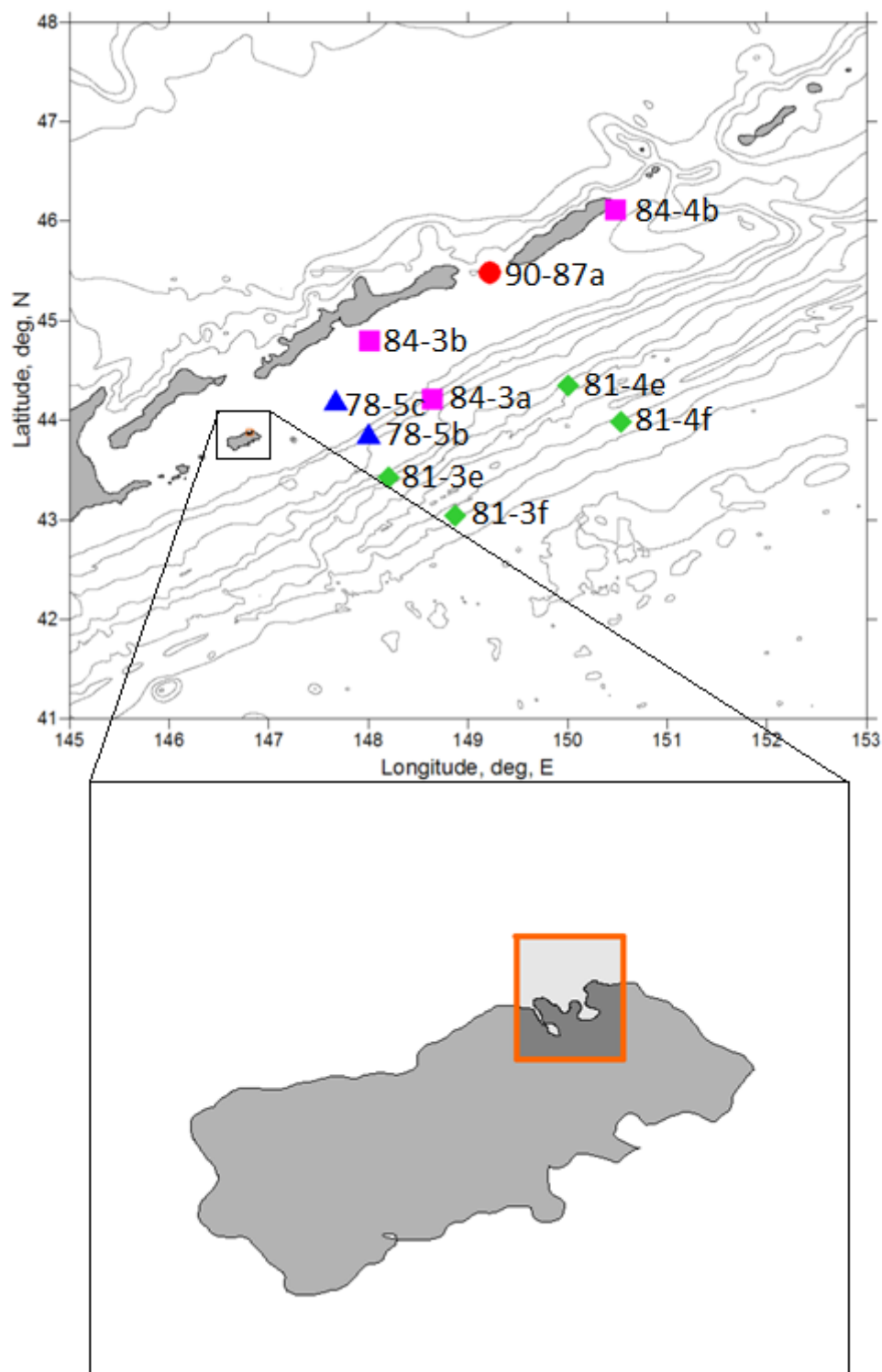


Рис. 15. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье бухты Малокурильская волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено ▲), 8.1 (◆), 8.4 (■), 9.0 (●): верхняя часть рисунка – расчетная область «МК» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

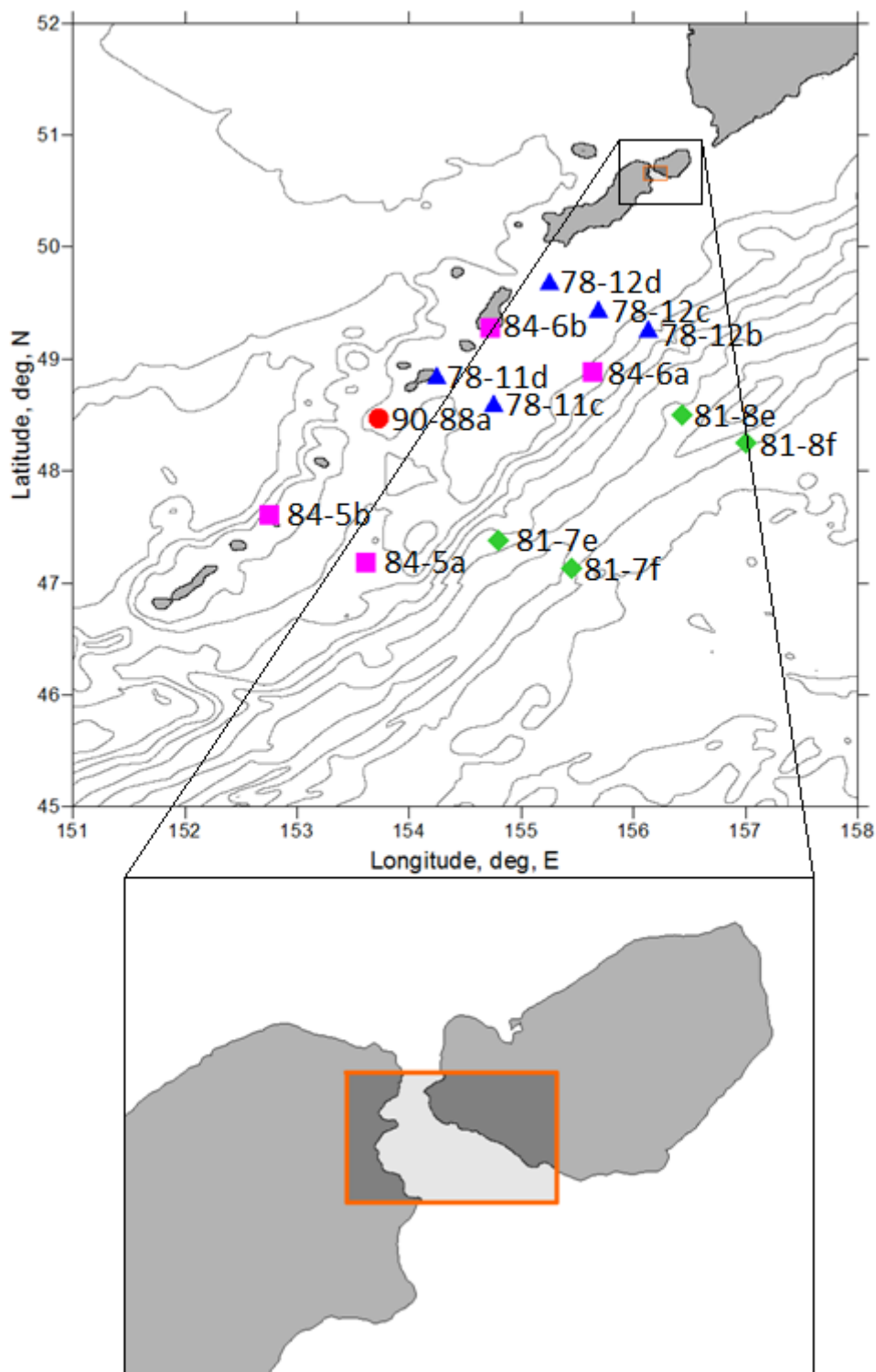


Рис. 16. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к г. Северо-Курильску, волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено ▲), 8.1 (◆), 8.4 (■), 9.0 (●): верхняя часть рисунка – расчетная область «SK-I» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

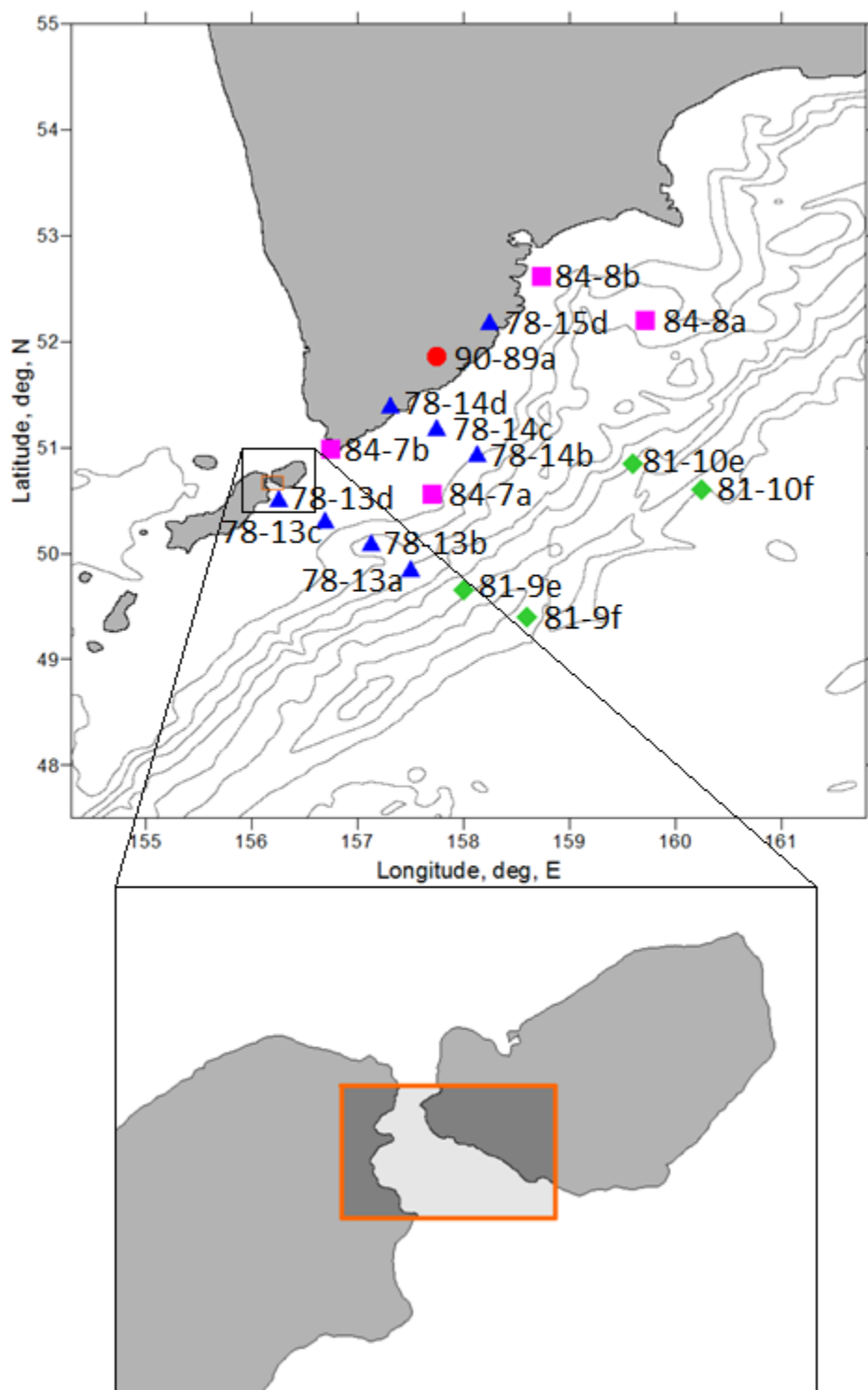


Рис. 17. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к г. Северо-Курильску, волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено ▲), 8.1 (◆), 8.4 (■), 9.0 (●): верхняя часть рисунка – расчетная область «SK-II» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

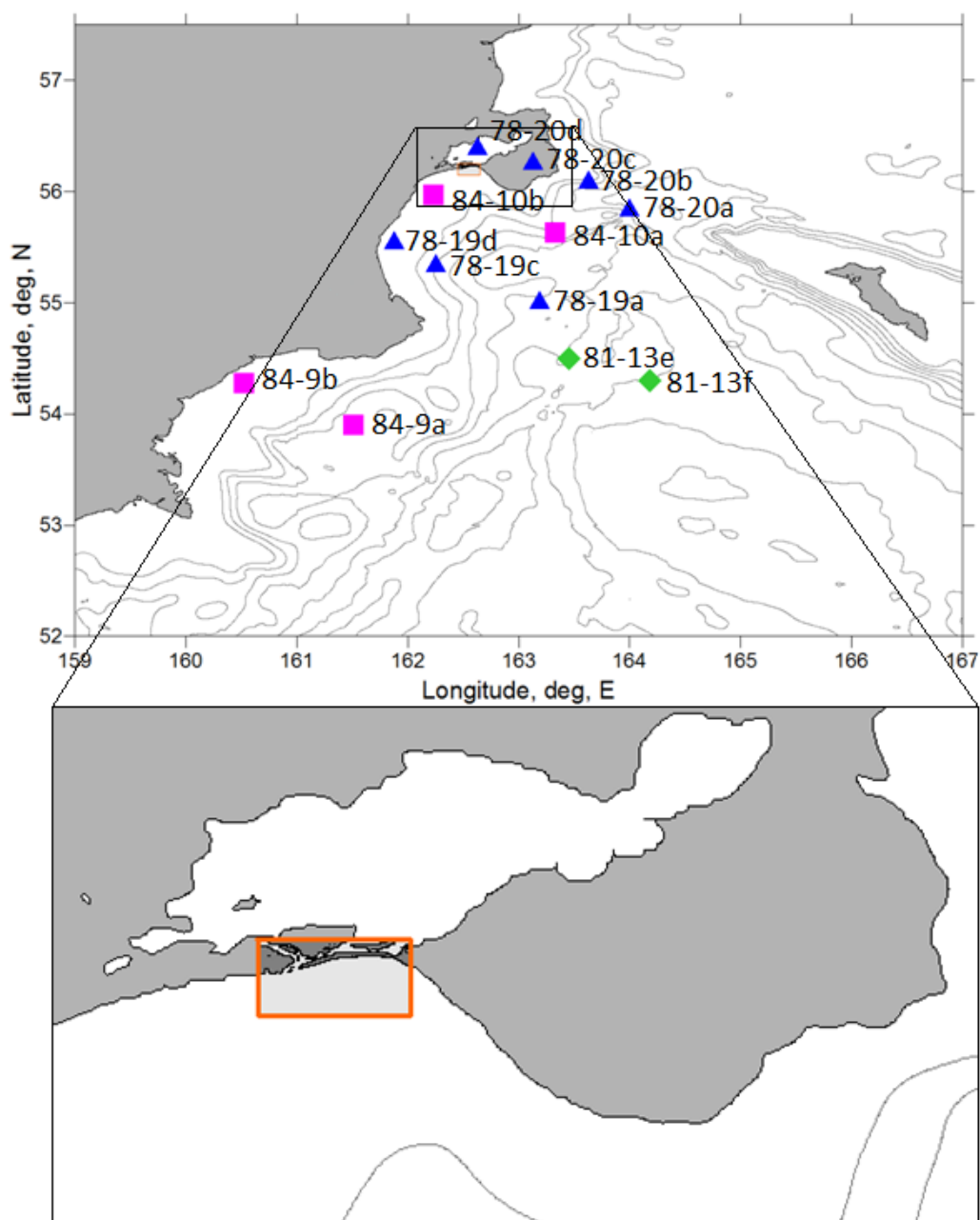


Рис. 18. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к п. Усть-Камчатск, волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено $\blacktriangle$), 8.1 ($\blacklozenge$), 8.4 ($\blacksquare$): верхняя часть рисунка – расчетная область «УК» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

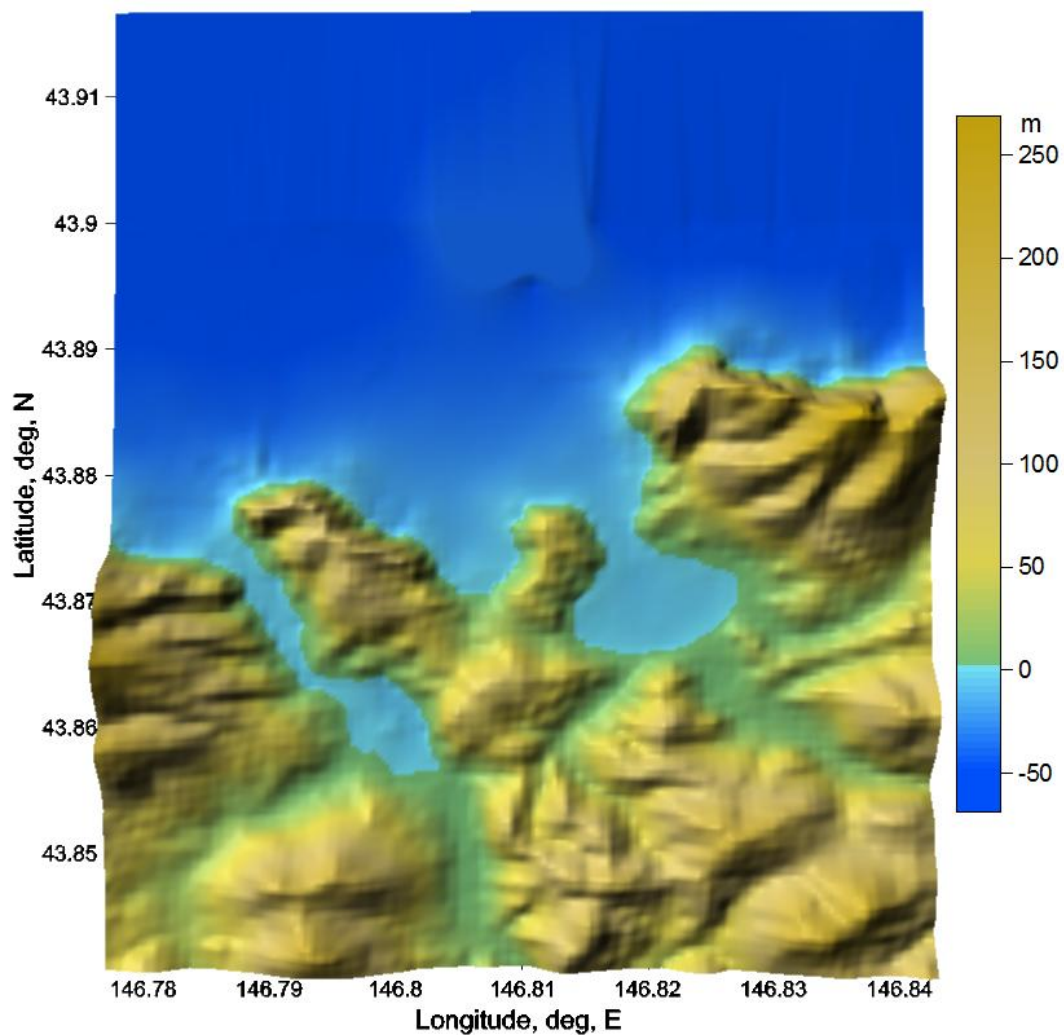


Рис. 19. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье бухты Малокурильская волны цунами.

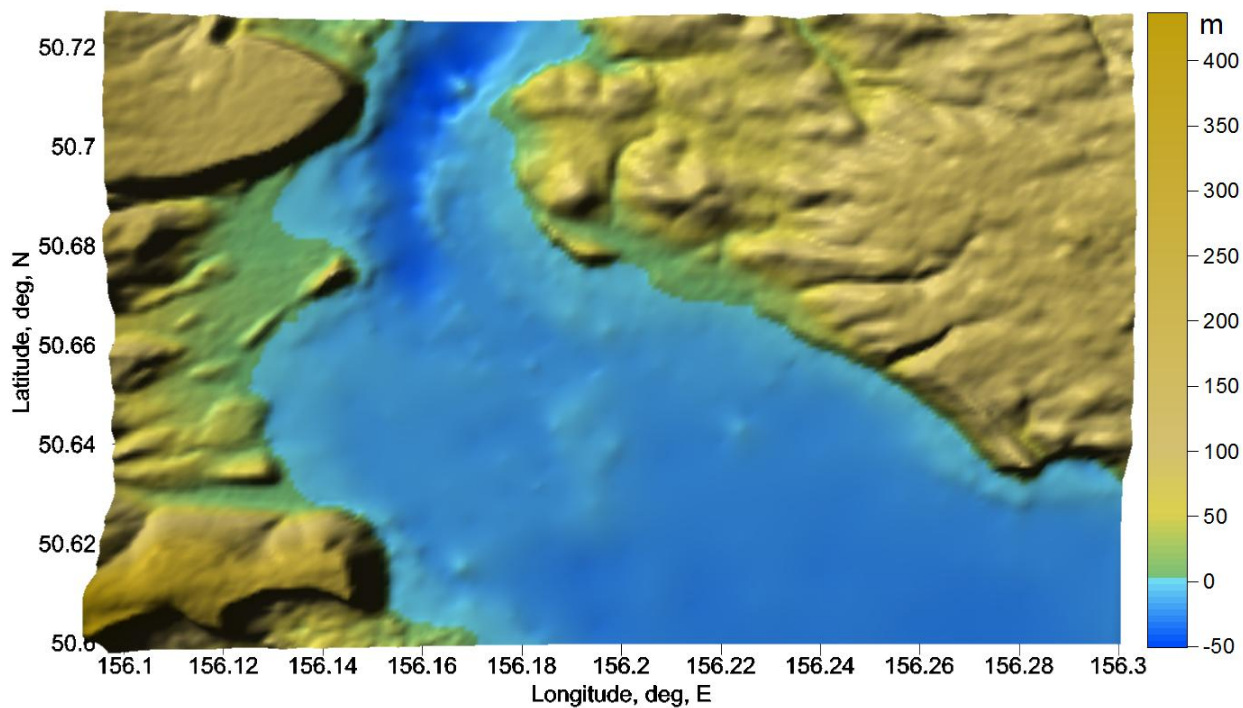


Рис. 20. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи г. Северо-Курильска

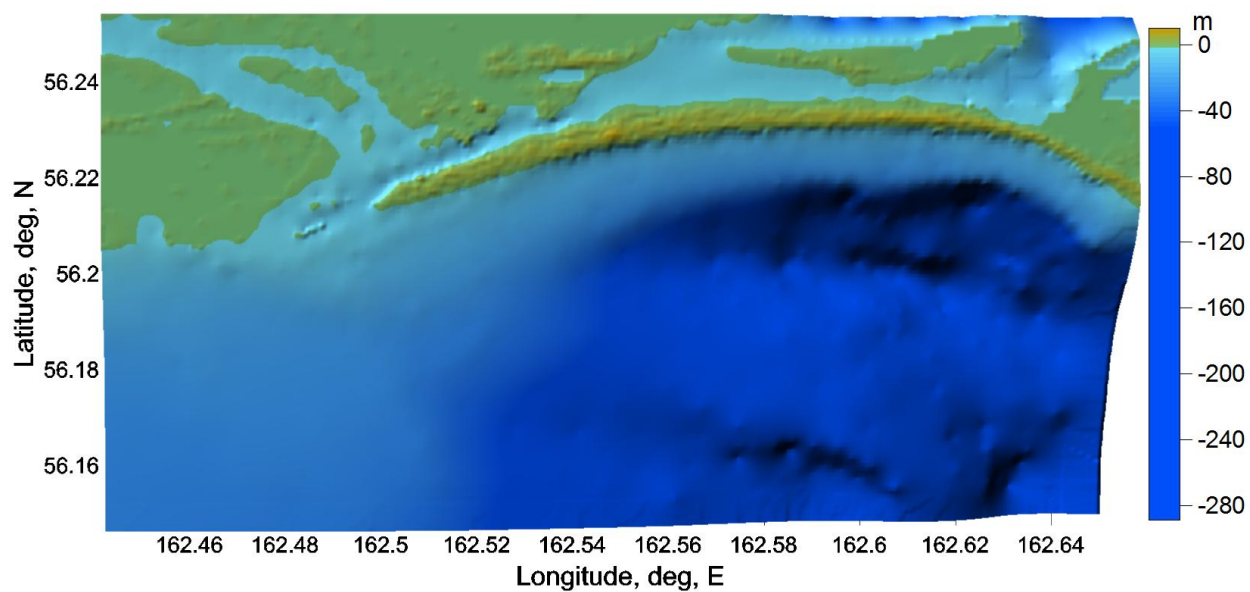


Рис. 21. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи п. Усть-Камчатск

3.4. Результаты моделирования

Результаты расчетов передаются Заказчику в виде системы папок с файлами. Структура этих папок и краткая характеристика их содержимого таковы:

0-Bathymetry (папка с массивами цифровых представлений рельефов (м) суши, прилегающих к защищаемым пунктам, и соответствующей батиметрии):

MK_bottom.grd

SK_bottom.grd

UK_bottom.grd

1-Zones (папка с целочисленными масками расчетной области, где:

значение «0» соответствует узлам сетки, изначально «сухим» и оставшимся «сухими» (не залитыми водой в ходе наката);

значение «1» – узлам сетки, изначально сухим, но залитым водой в ходе наката;

значение «2» – узлам сетки, изначально «мокрым» (покрытым водой), но обнажавшимся в ходе осушения;

значение «3» – узлам сетки, изначально «мокрым» и оставшимся «мокрыми» (не обнажавшимся в ходе осушения):

{MK_<ID>_zona.grd}

{SK_<ID>_zona.grd}

{UK_<ID>_zona.grd}

2-EtaMaxMin (папка с массивами максимальных и минимальных значений (м) уровней свободной поверхности в расчетных областях, соответствующих защищаемым пунктам):

{MK_<ID>_zapl_max.grd}

{MK_<ID>_zapl_min.grd}

{SK_<ID>_zapl_max.grd}

{SK_<ID>_zapl_min.grd}

{UK_<ID>_zapl_max.grd}

{UK_<ID>_zapl_min.grd}

3-DepthMax (папка с массивами максимальных значений (м) глубин водных слоев, покрывающих участки суши, прилегающие к защищаемым пунктам):

{MK_<ID>_depth.grd}

{SK_<ID>_depth.grd}

{UK_<ID>_depth.grd}

4-UMax (папка с массивами максимальных значений (м/сек) модуля скорости течений в расчетной области, соответствующей защищаемым пунктам):

{MK_<ID>_uv_max.grd}

{SK_<ID>_uv_max.grd}

{UK_<ID>_uv_max.grd}

5-Duration (папка с массивами длительностей (сек) заливания суши (слоем воды с толщиной более 10 см) в расчетной области, соответствующей защищаемым пунктам):

{MK_<ID>_time_zatop.grd}

```
{SK_<ID>_time_zatop.grd}  
{UK_<ID>_time_zatop.grd}
```

Индекс <МК> соответствует файлам, связанным с расчетной областью «Малокурильское», <СК> – с расчетной областью «Северо-Курильск», <УК> – с расчетной областью «Усть-Камчатск». Индекс <ID> соответствует конкретному модельному источнику цунамигенного землетрясения и принимает значения, указанные в первом столбце приведенной выше таблицы (Таблица 1).

Все файлы содержат информацию, представленную в стандартном формате grd фирмы Golden Software (вариант ASCII), легко обрабатываются одним из ее продуктов – графическим пакетом Surfer (Surface Mapping System) и могут быть при необходимости конвертированы в любой другой формат.

Ниже, в настоящем разделе приведены увеличенные фрагменты изображений характеристик заплеска волн цунами на участки побережья, прилегающие к защищаемым пунктам, от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных землетрясений различных магнитуд. Полный набор изображений упомянутых характеристик для всех модельных землетрясений приведен в Приложении к настоящему отчету.

3.4.1. Пос. Малокурильское

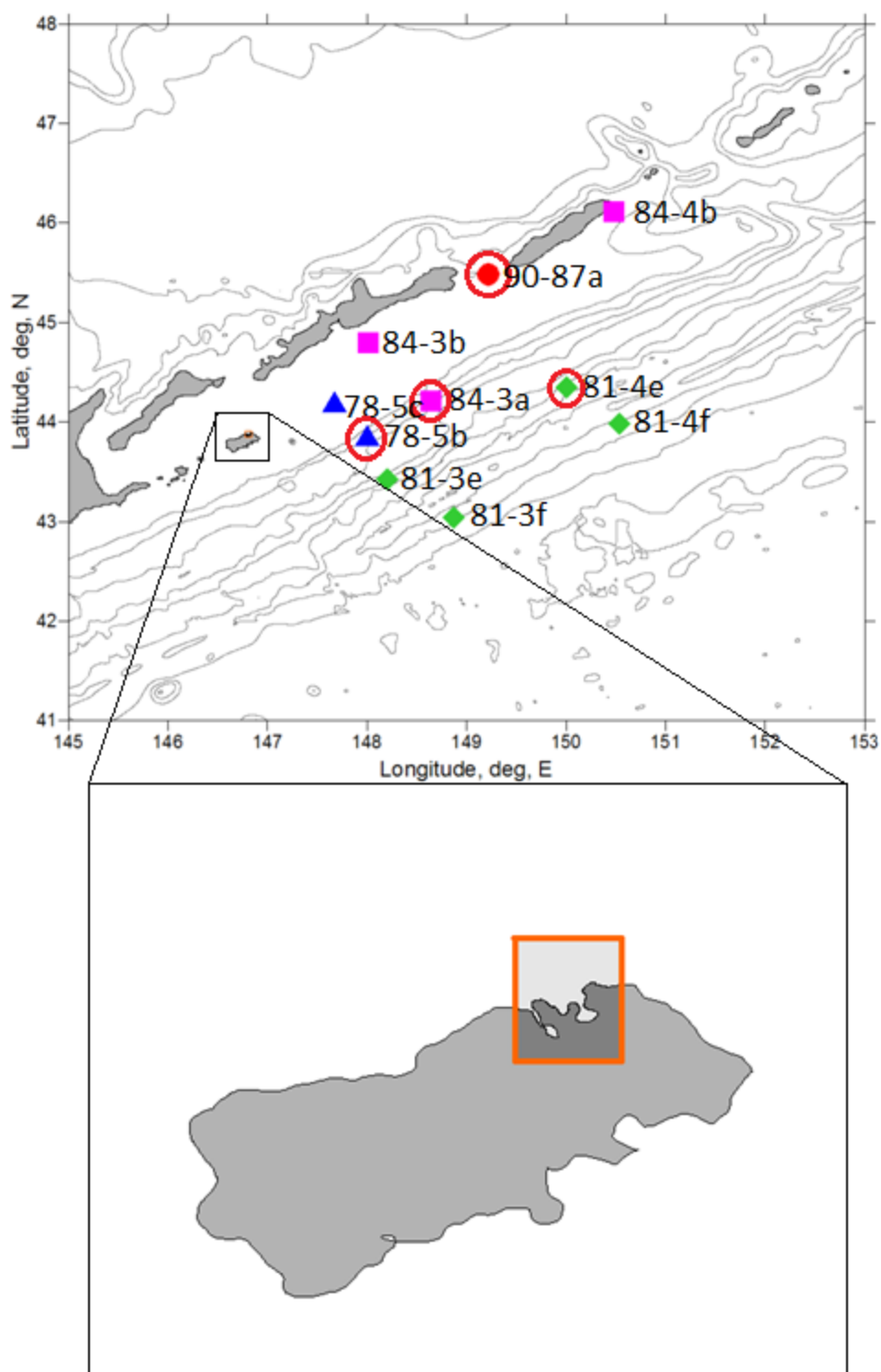
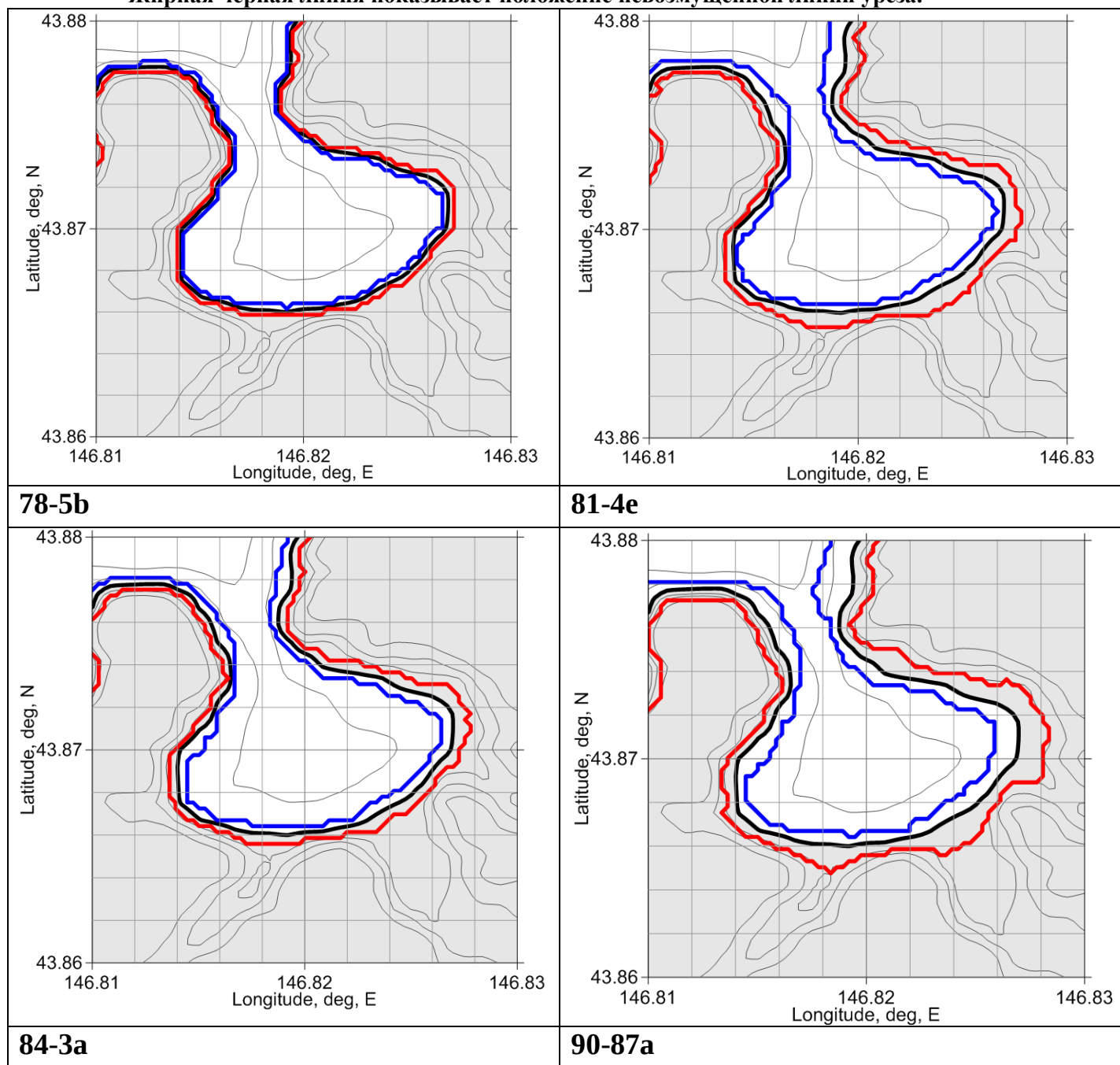


Рис. 22. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье бухты Малокурильская волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено ▲), 8.1 (◆), 8.4 (■), 9.0 (●): верхняя часть рисунка – расчетная область «МК» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами. Выделены (красными кружками ●) эпицентры модельных цунамигенных землетрясений, использованные для получения результатов, представленных в таблицах (Таблица 3 – Таблица 7).

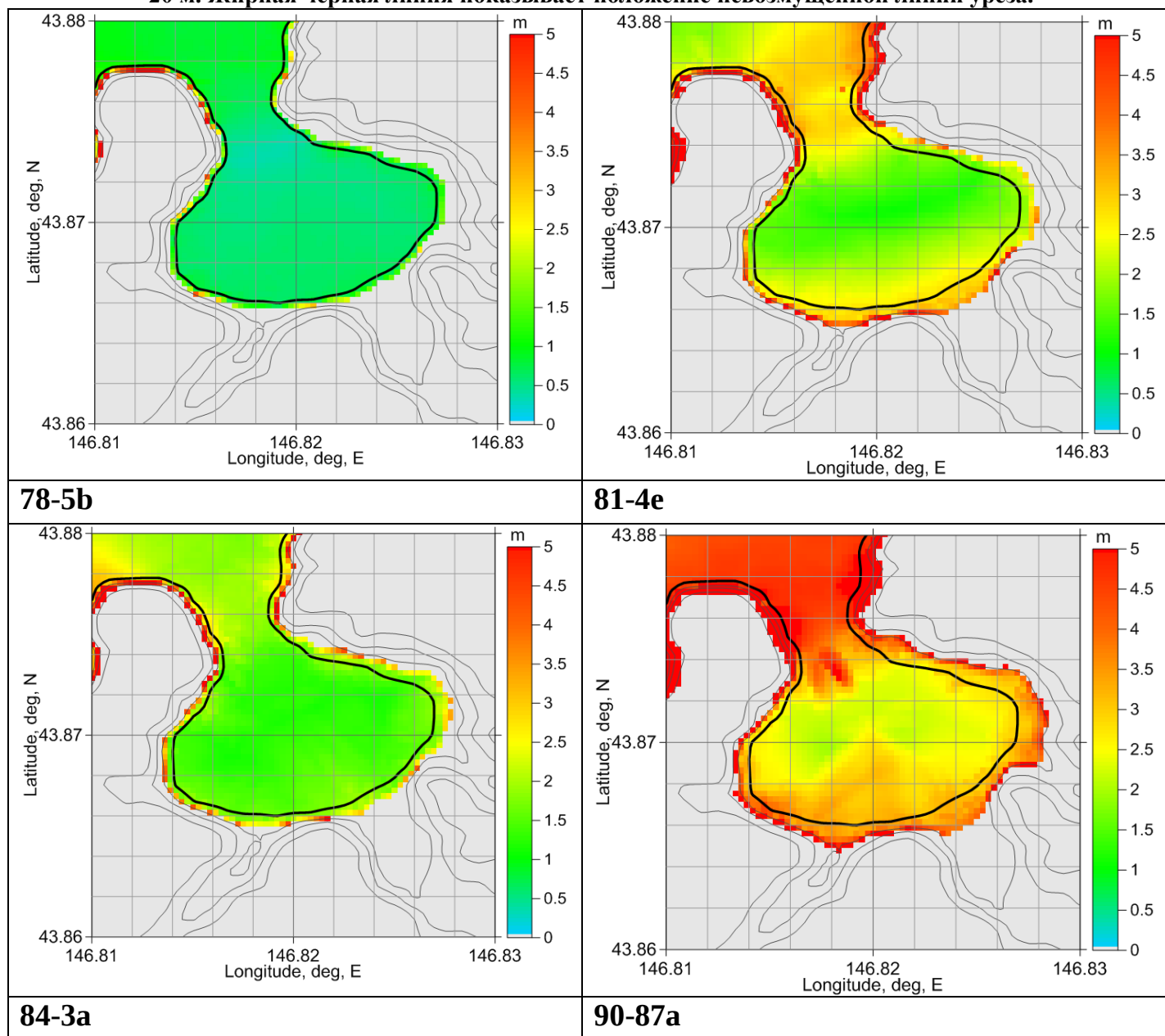
3.4.1.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области

Таблица 3. Границы зон максимального затопления (красная линия) и осушения (синяя линия) волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 22) для защищаемого пункта «Малокурильское». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



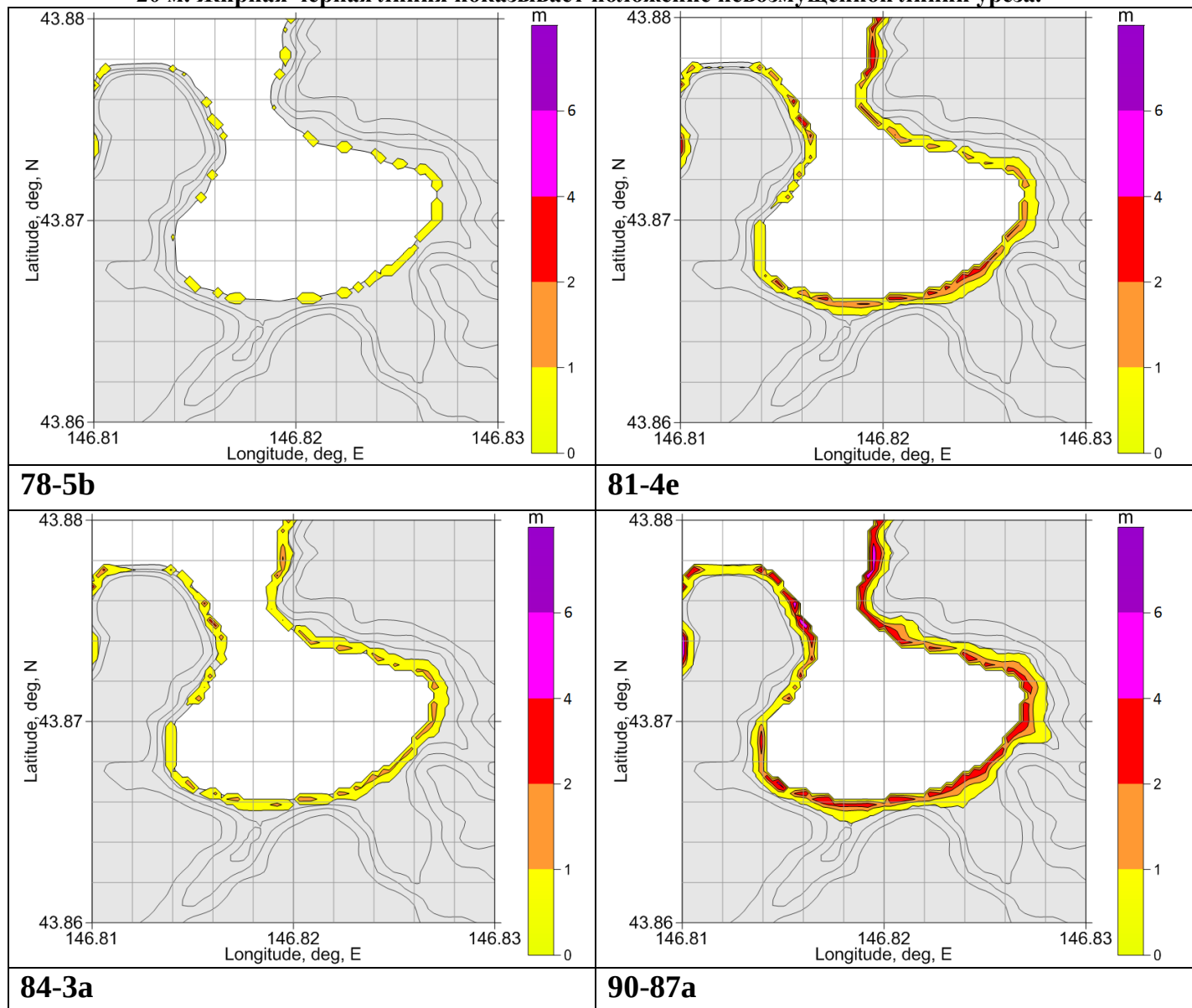
3.4.1.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области

Таблица 4. Распределение максимальных возвышений свободной поверхности при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 22) для защищаемого пункта «Малокурильское». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные возвышения свободной поверхности показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



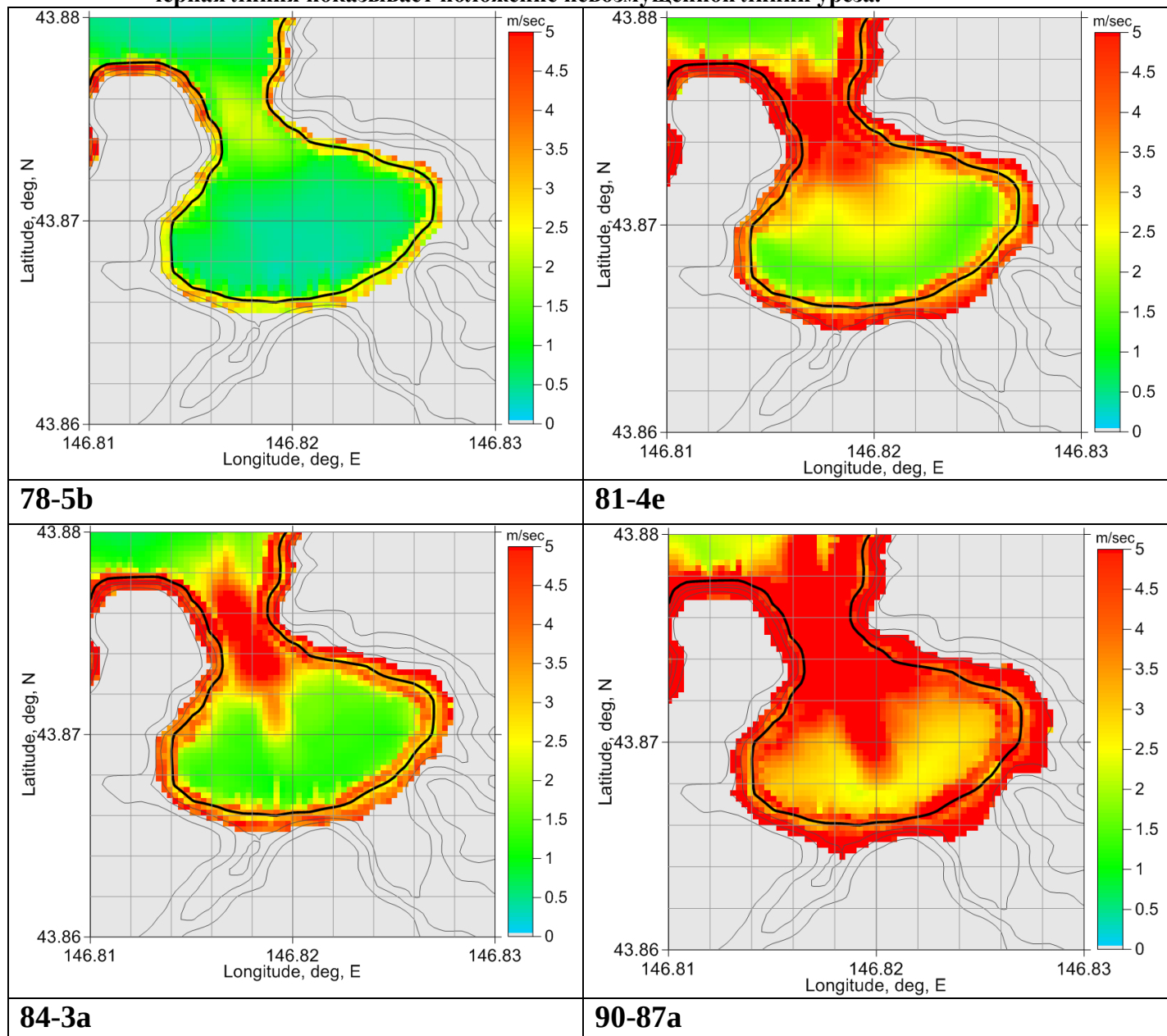
3.4.1.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области

Таблица 5. Распределение максимальной глубины затопления (толщины водного слоя) при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 22) для защищаемого пункта «Малокурильское». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные глубины затопления (толщина водного слоя) показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



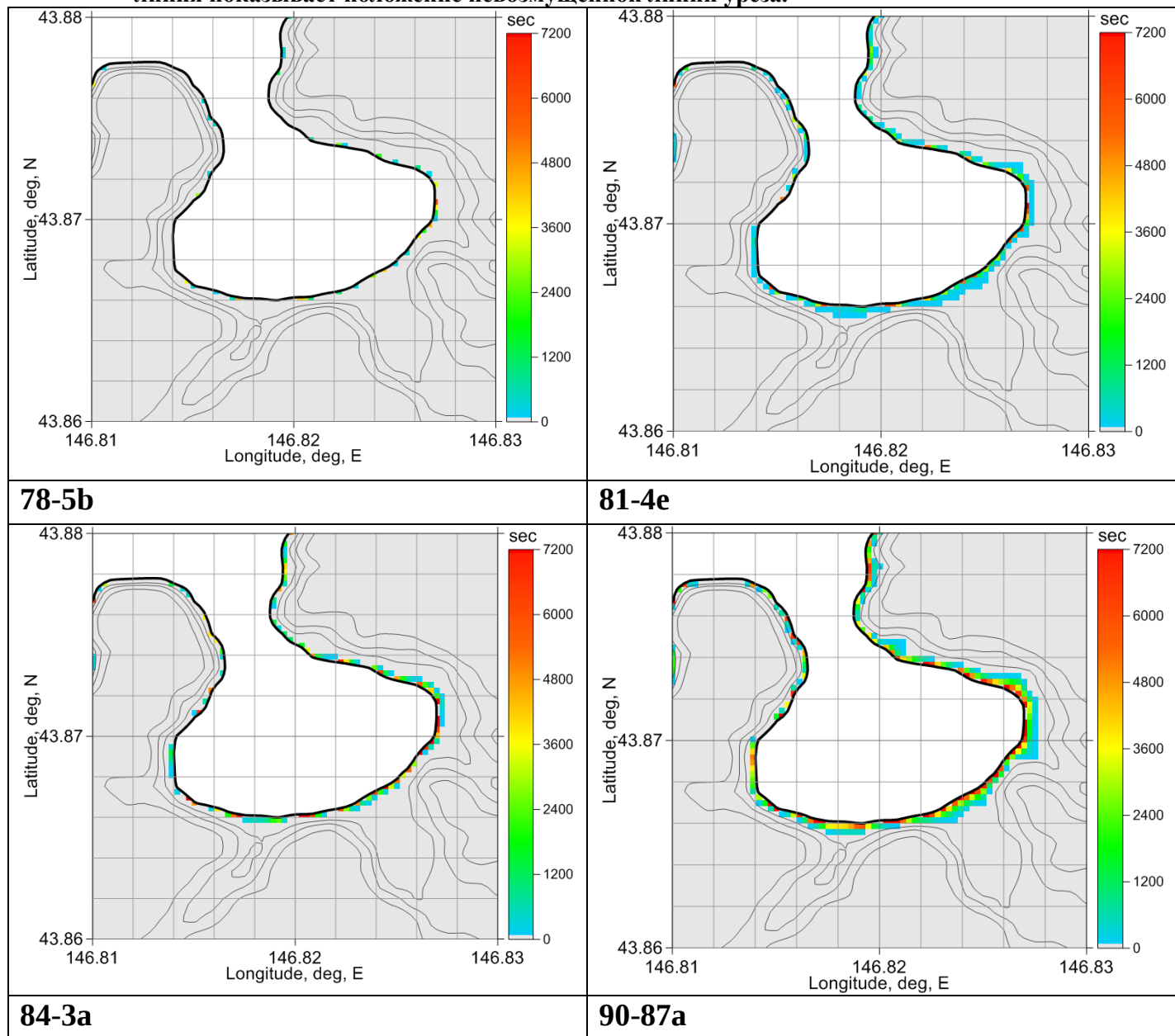
3.4.1.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области

Таблица 6. Распределение максимальных значений модуля скорости течений, вызванных волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 22), для защищаемого пункта «Малокурильское». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Значения модуля скорости течений показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



3.4.1.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области

Таблица 7. Распределение длительности заливания суши (слоем воды с толщиной более 10 см) при цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 22) для защищаемого пункта «Малокурильское». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Цветовая шкала для продолжительности заливания показана справа. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



3.4.2. Пос. Северо-Курильск

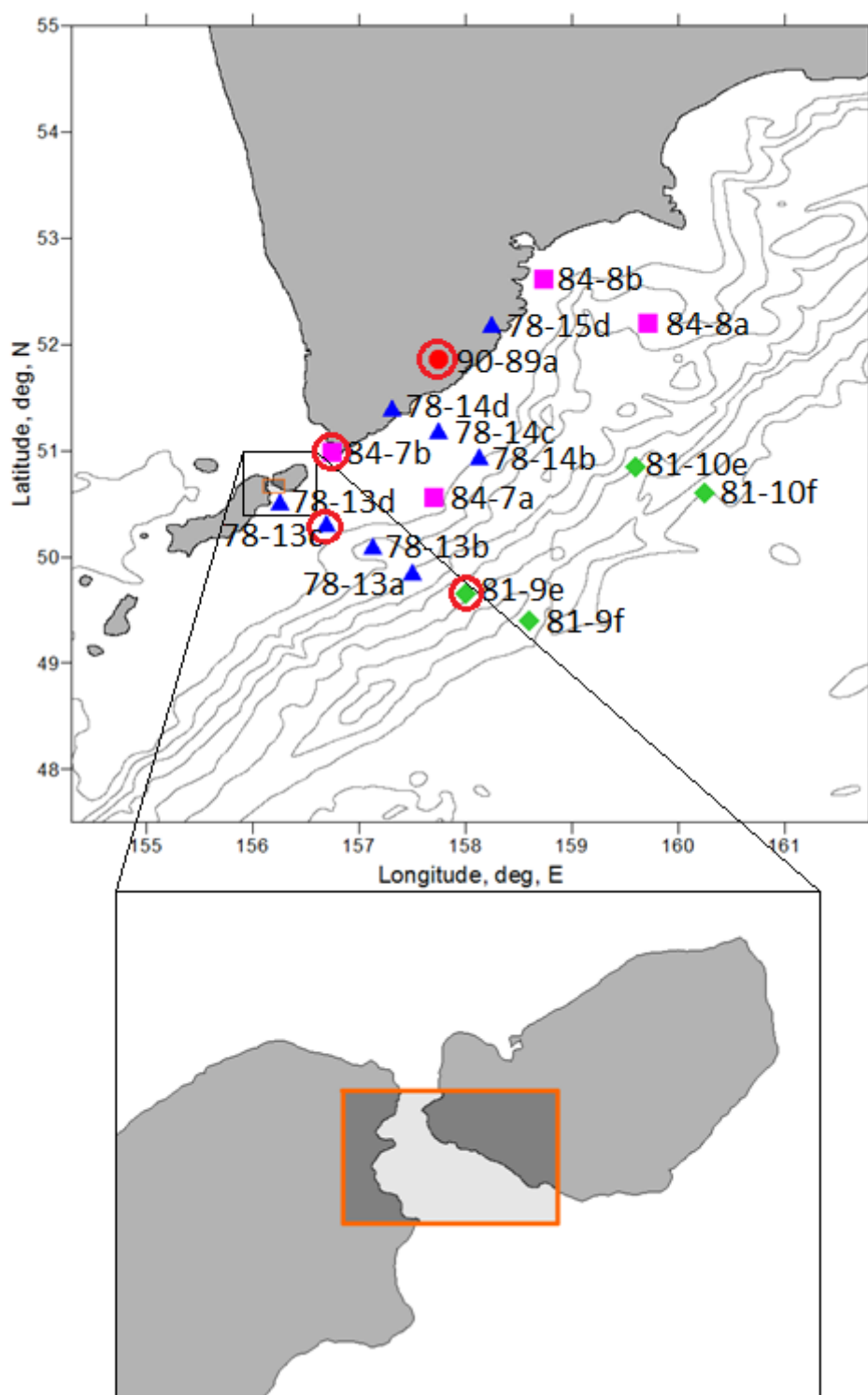
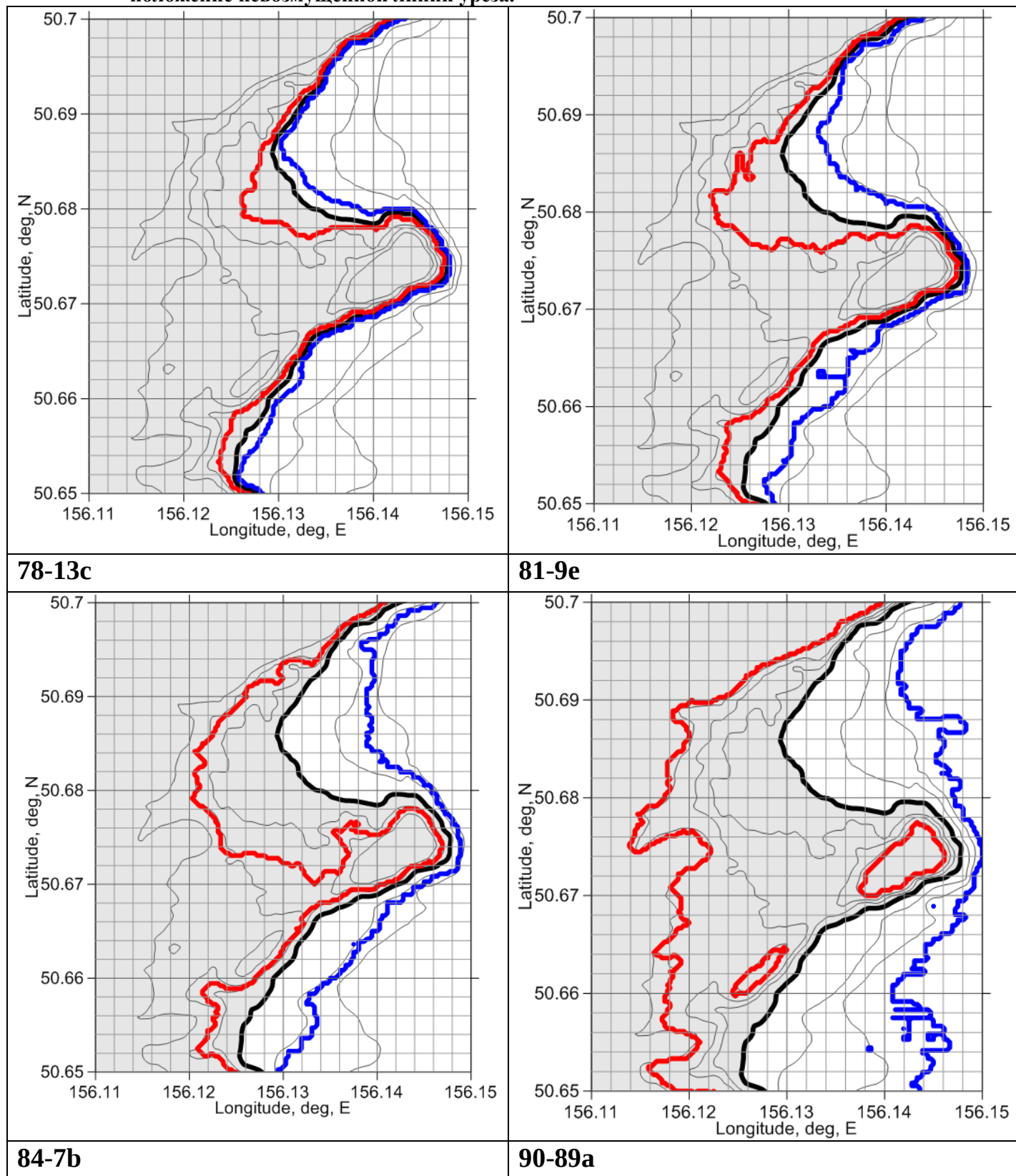


Рис. 23. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к п. Северо-Курильск, волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено $\blacktriangle$), 8.1 ($\blacklozenge$), 8.4 ($\blacklozenge$), 9.0 ($\bullet$): верхняя часть рисунка – расчетная область «СК-II» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами. Выделены (красными кружками $\bullet$) эпицентры модельных цунамигенных землетрясений, использованные для получения результатов, представленных в таблицах (Таблица 8 – Таблица 12).

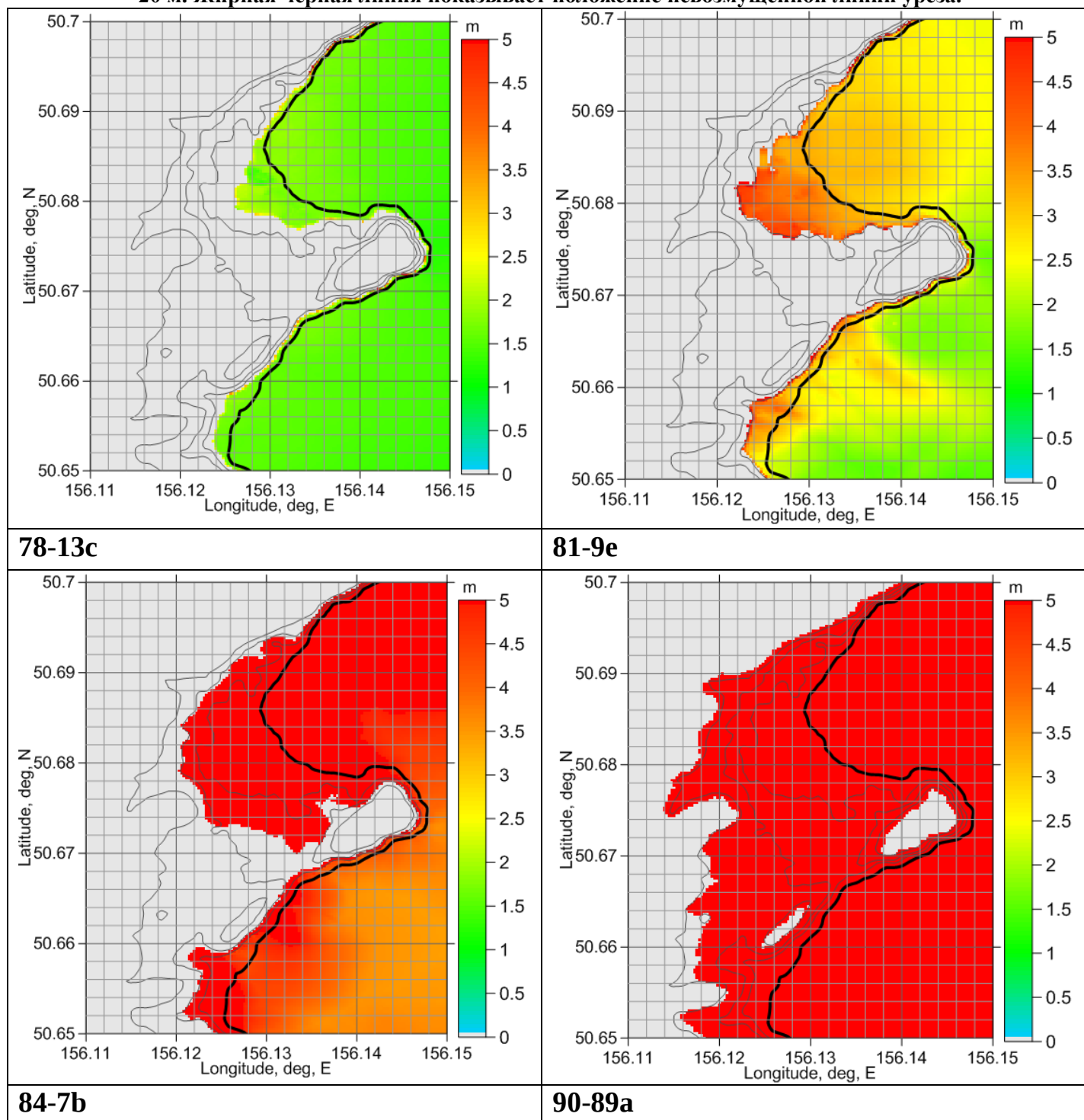
3.4.2.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области

Таблица 8. Границы зон максимального затопления (красная линия) и осушения (синяя линия) волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 23) для участков побережья, прилегающих к защищаемому пункту «Северо-Курильск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



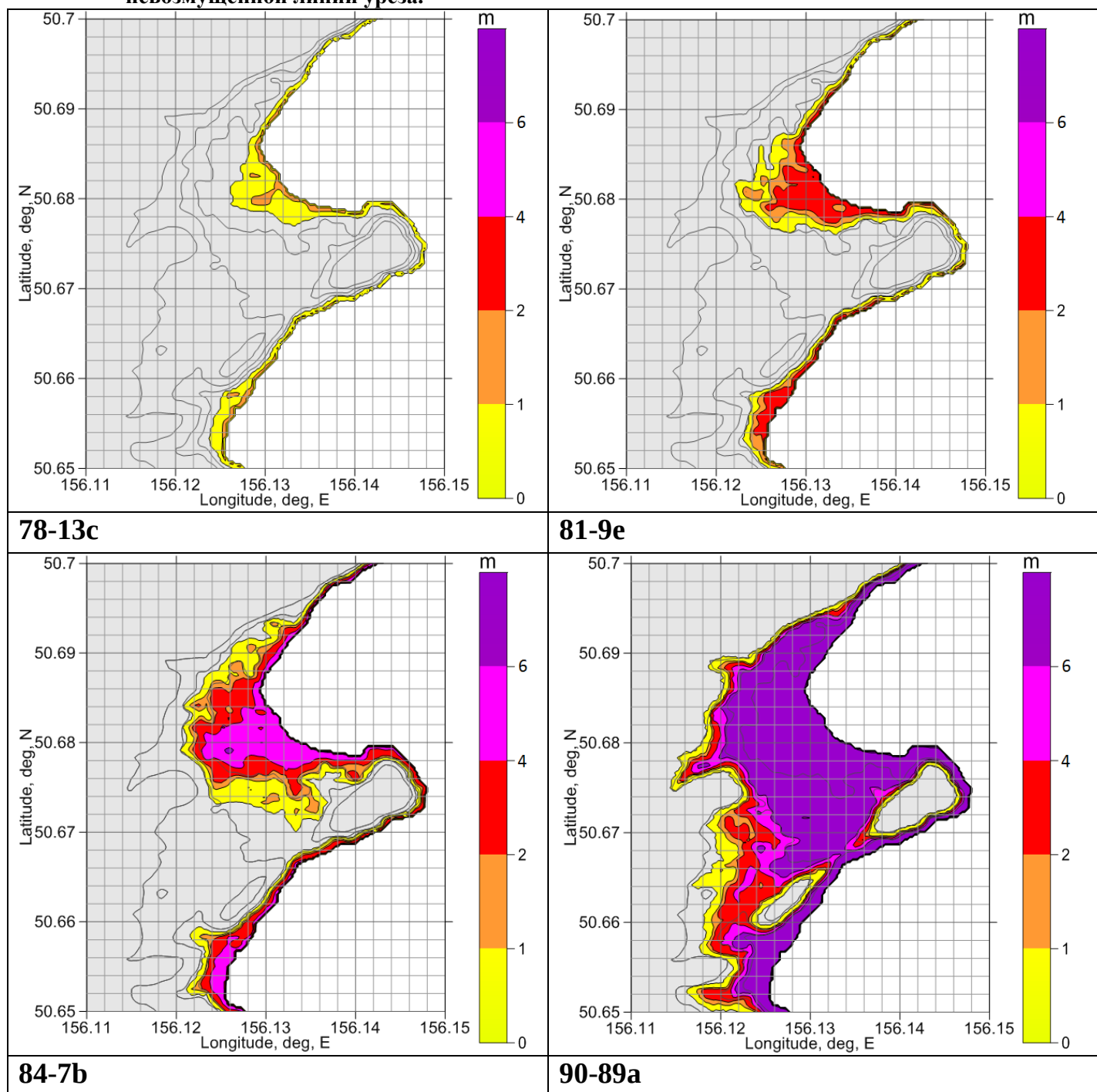
3.4.2.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области

Таблица 9. Распределение максимальных возвышений свободной поверхности при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 23) для защищаемого пункта «Северо-Курильск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные возвышения свободной поверхности показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



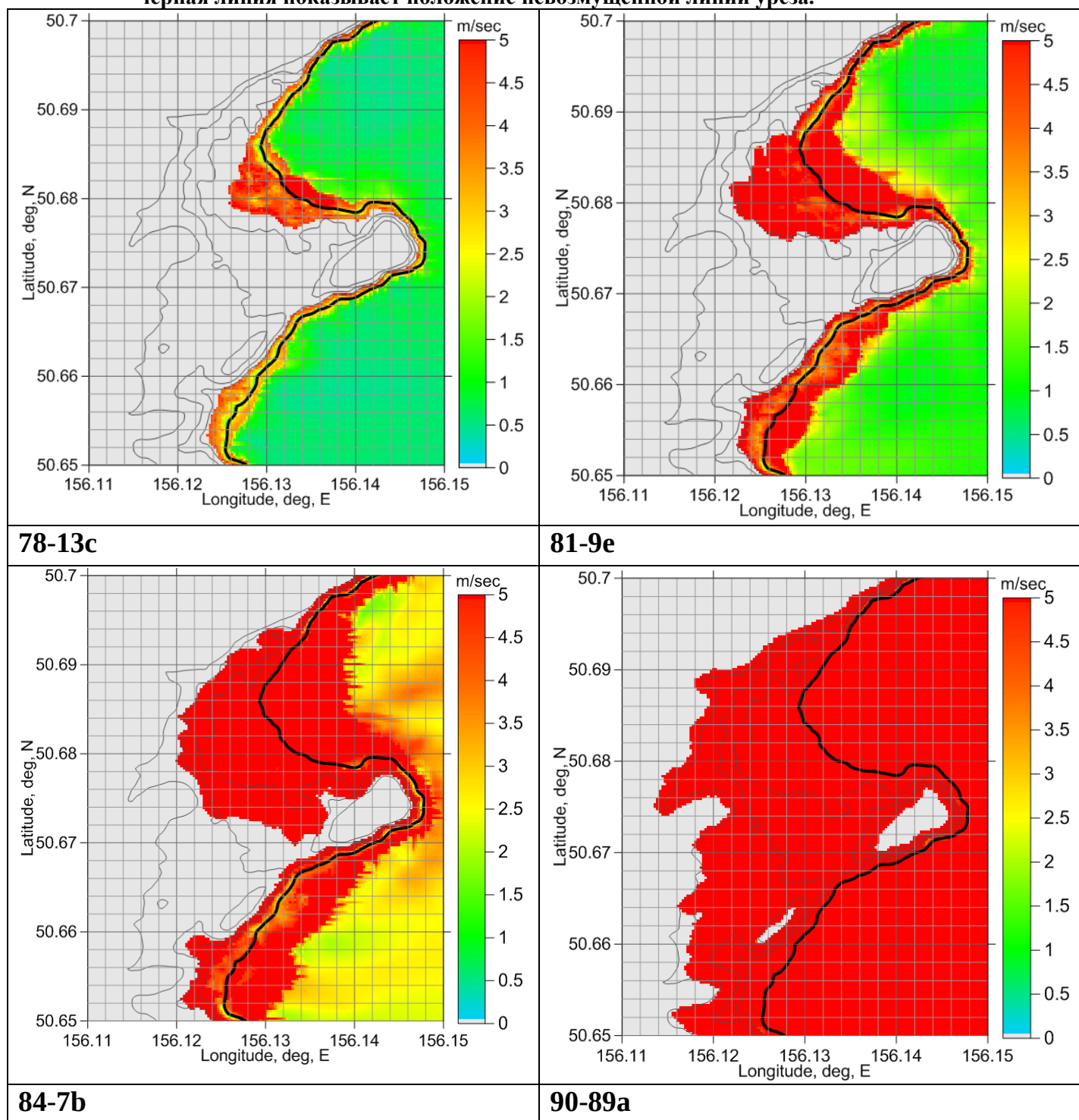
3.4.2.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области

Таблица 10. Распределение максимальной глубины затопления (толщины водного слоя) при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 23) для участков побережья, прилегающих к защищаемому пункту «Северо-Курильск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные глубины затопления (толщина водного слоя) показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



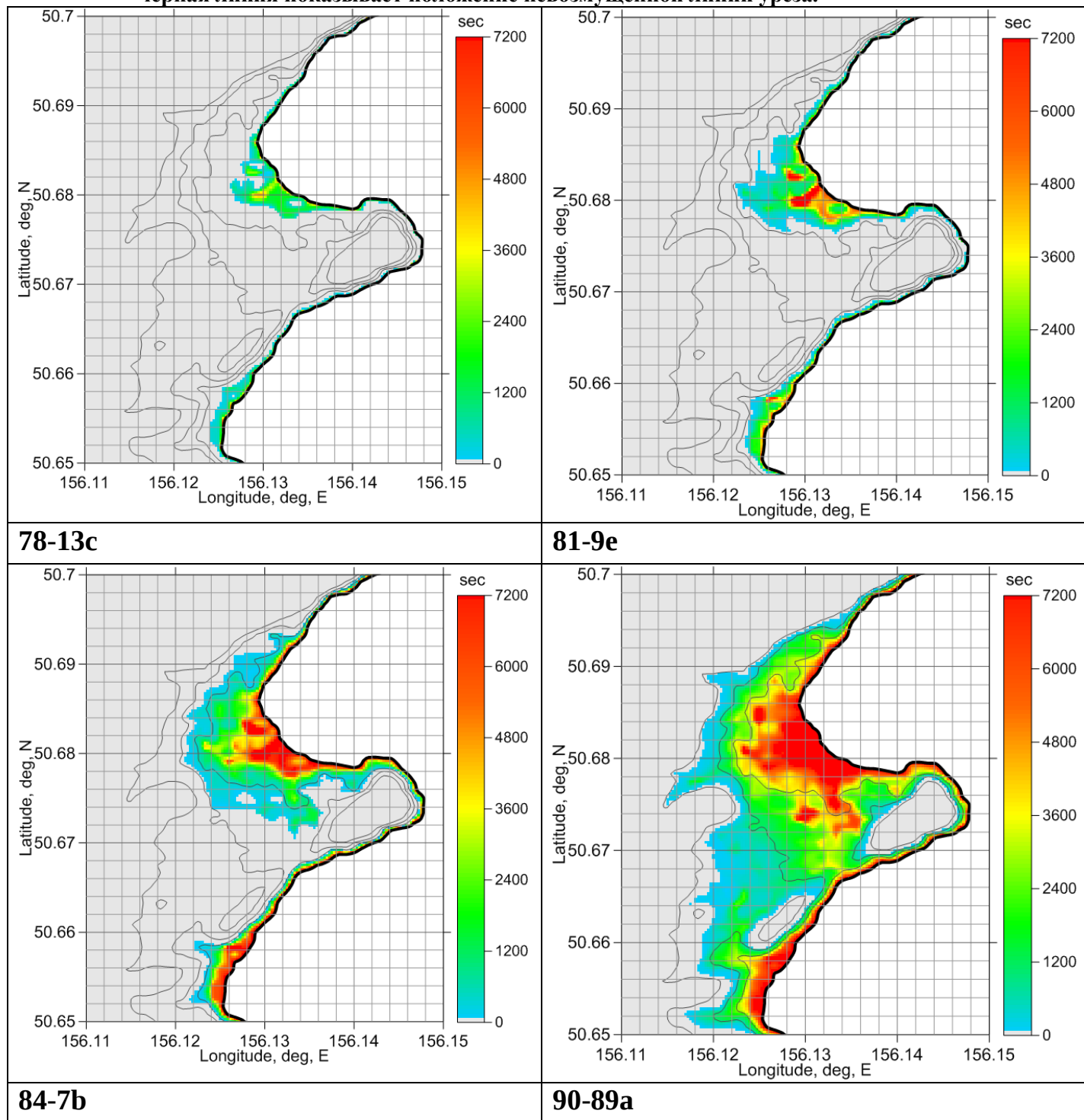
3.4.2.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области

Таблица 11. Распределение максимальных значений модуля скорости течений, вызванных волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 23), для защищаемого пункта «Северо-Курильск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Значения модуля скорости течений показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



3.4.2.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области

Таблица 12. Распределение длительности заливания суши (слоем воды с толщиной более 10 см) при цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 23) для защищаемого пункта «Северо-Курильск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Цветовая шкала для продолжительности заливания показана справа. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



3.4.3. Пос. Усть-Камчатск

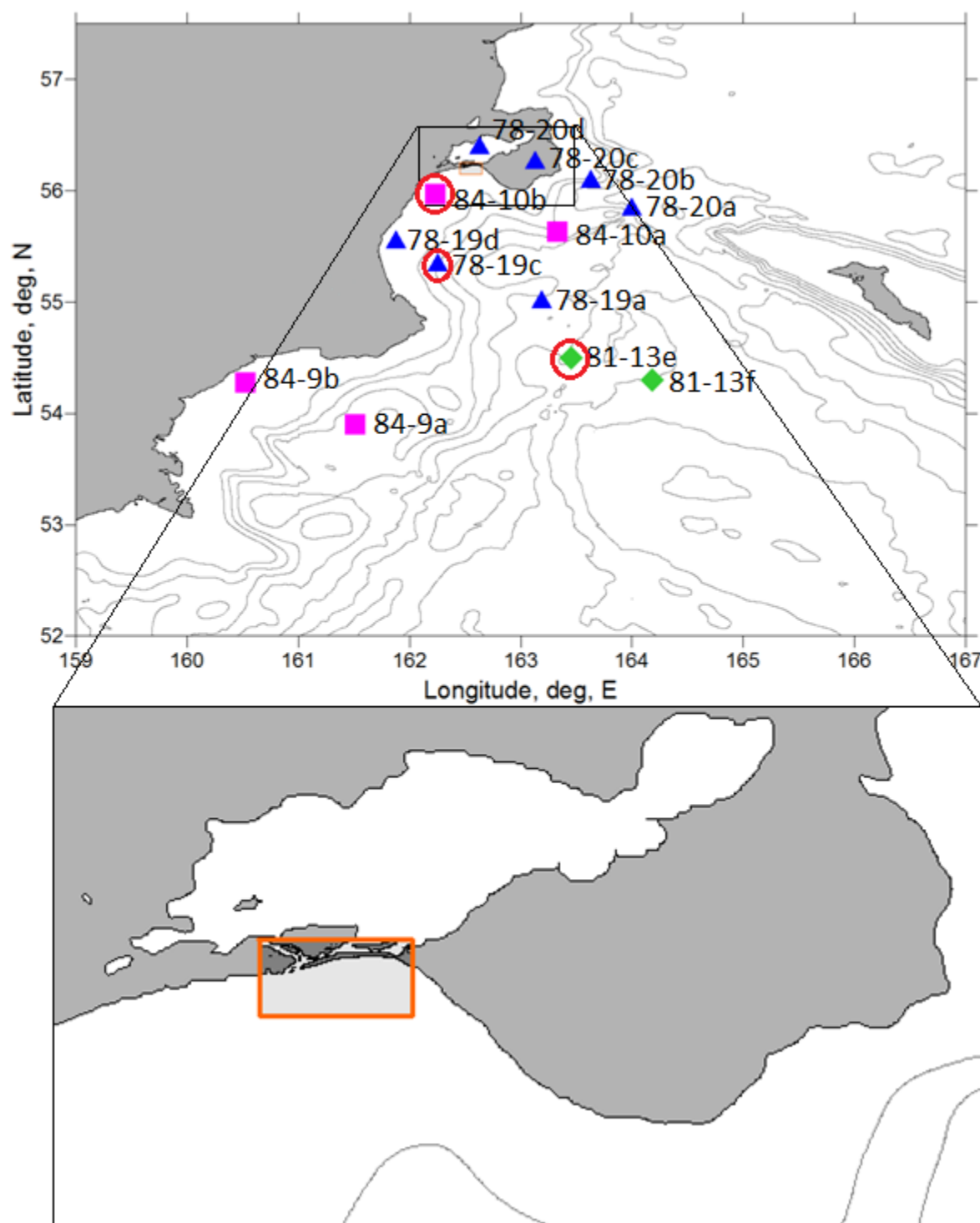
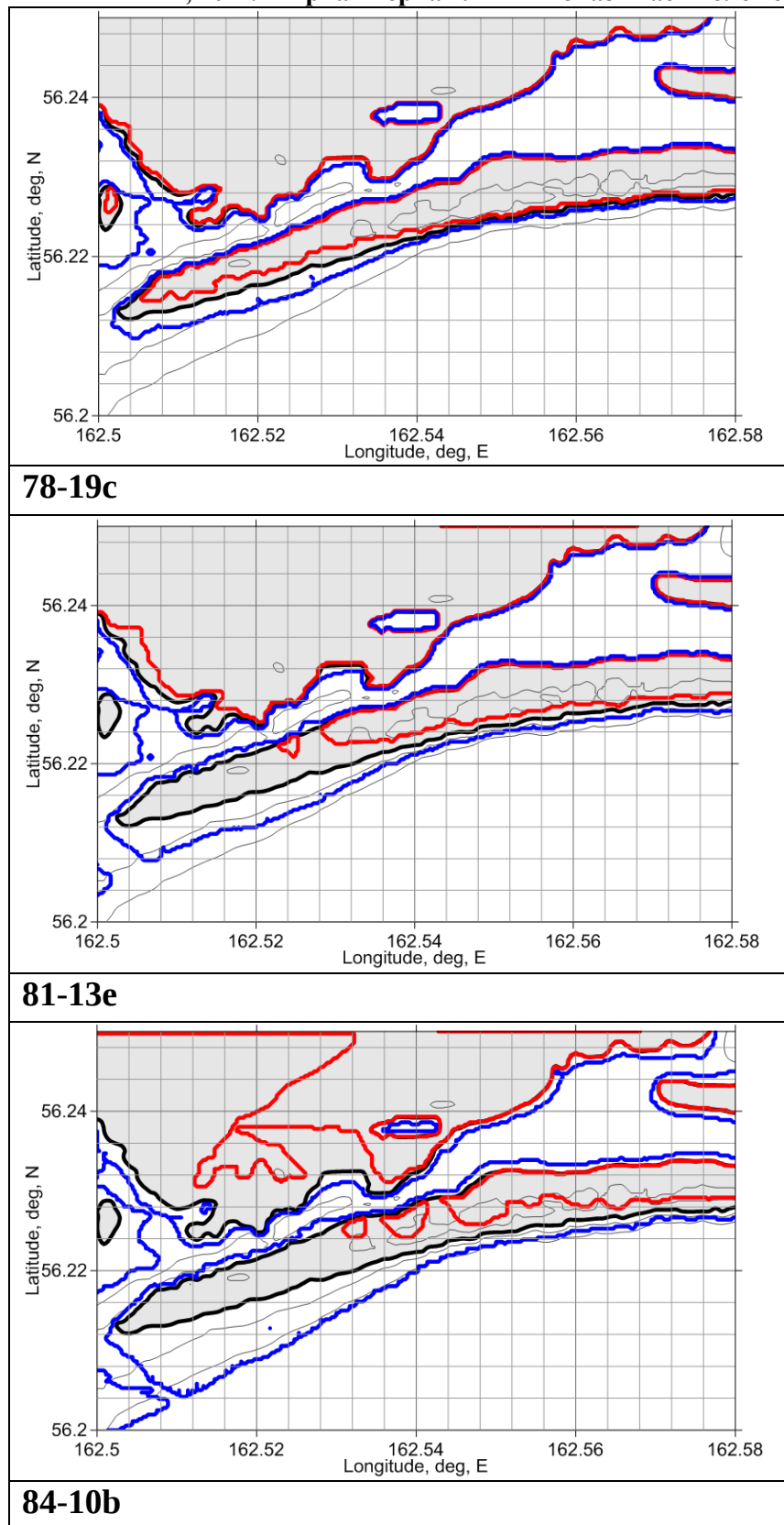


Рис. 24. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье бухты, прилегающее к п. Усть-Камчатск, волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой $M_w=7.8$ (положение эпицентров отмечено $\blacktriangle$), 8.1 ($\blacklozenge$), 8.4 ($\blacksquare$): верхняя часть рисунка – расчетная область «УК» для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, изобаты проведены через каждые 1000 м, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами. Выделены (красными кружками $\bigcirc$) эпицентры модельных цунамигенных землетрясений, использованные для получения результатов, представленных в таблицах (Таблица 13 – Таблица 17).

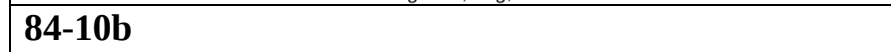
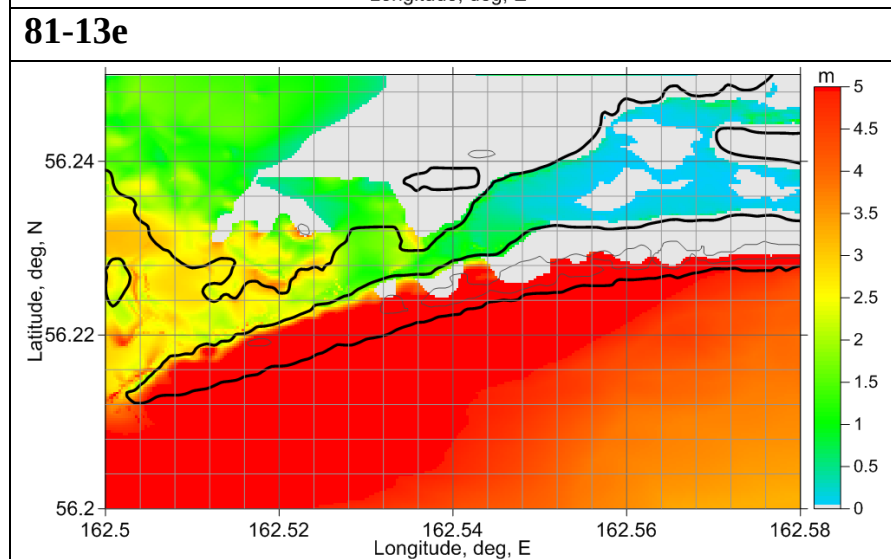
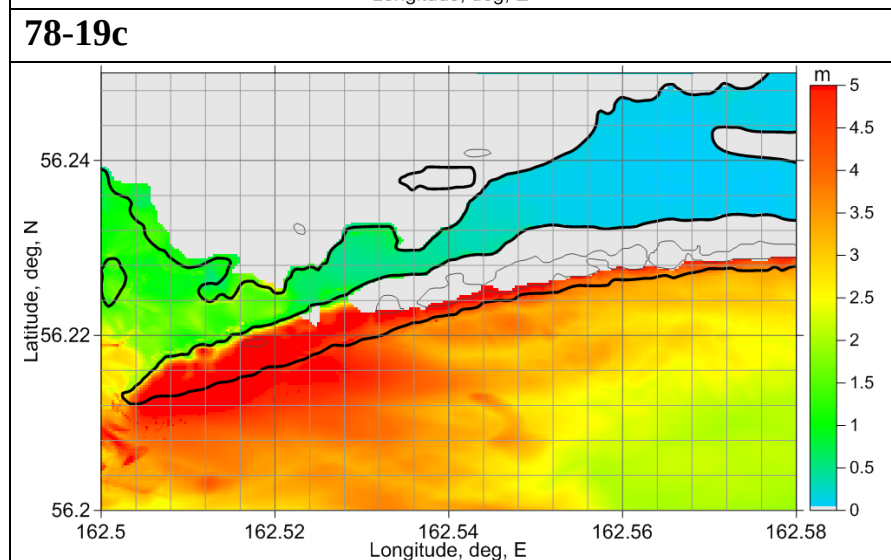
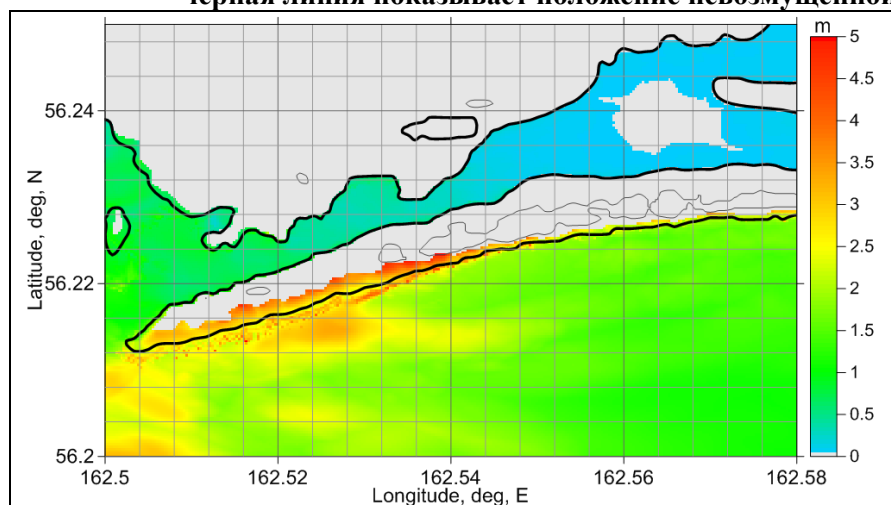
3.4.3.1. Границы зон заливания и осушения во фрагменте расчетной области

Таблица 13. Границы зон максимального затопления (красная линия) и осушения (синяя линия) волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 24) для защищаемого пункта «Усть-Камчатск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



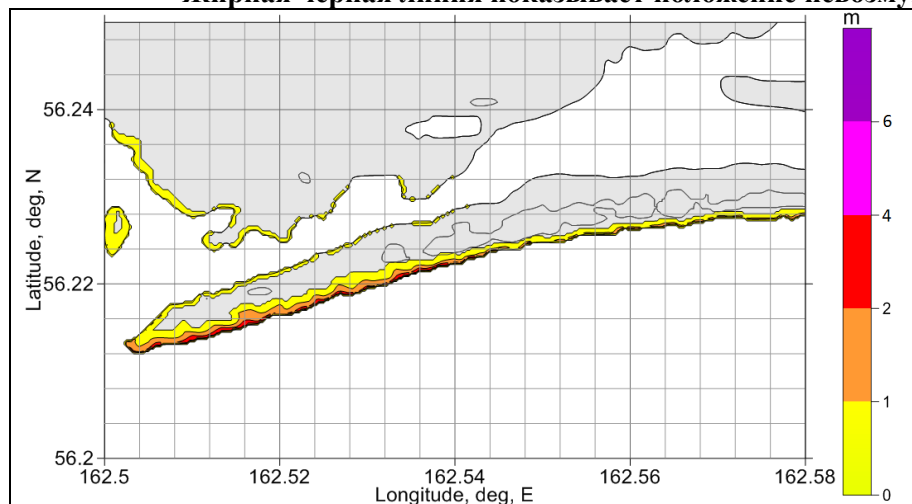
3.4.3.2. Максимальные возвышения свободной поверхности во фрагменте расчетной области

Таблица 14. Распределение максимальных возвышений свободной поверхности при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 24) для защищаемого пункта «Усть-Камчатск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные возвышения свободной поверхности показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.

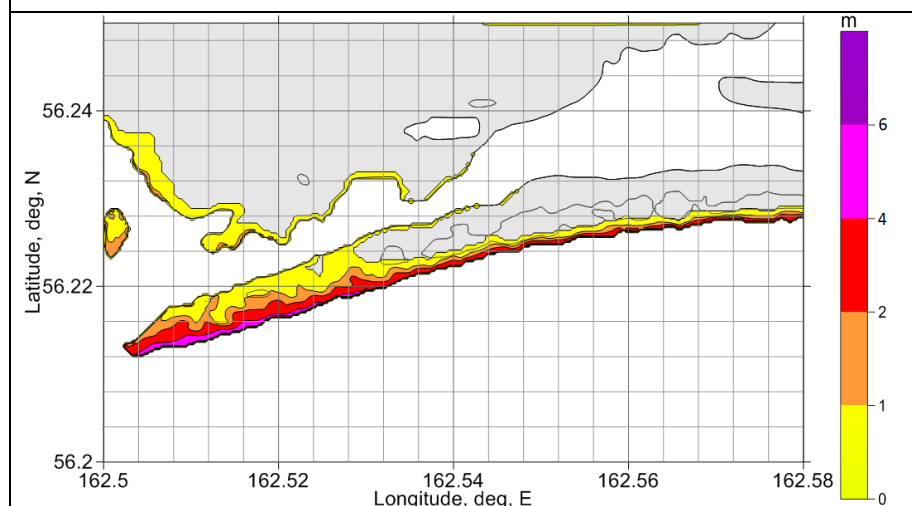


3.4.3.3. Максимальные глубины затопления во фрагменте расчетной области

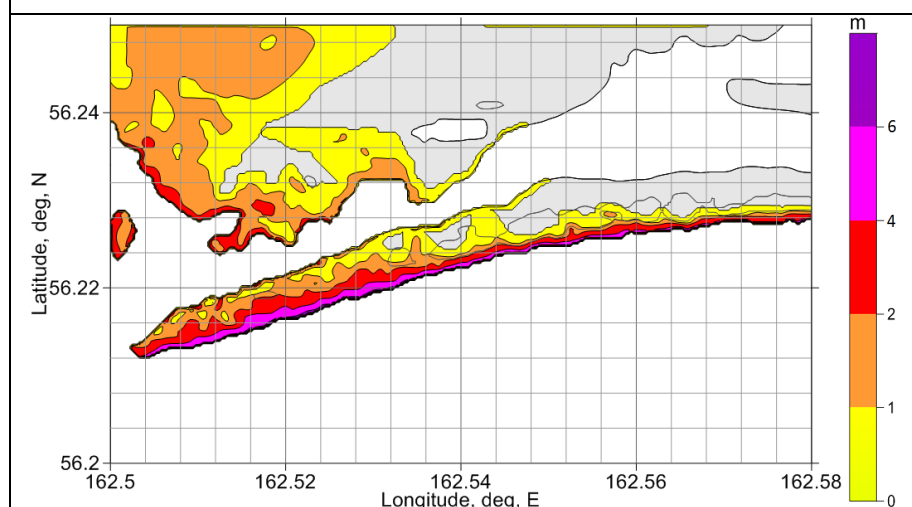
Таблица 15. Распределение максимальной глубины затопления (толщины водного слоя) при заплеске волн цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 24) для защищаемого пункта «Усть-Камчатск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные глубины затопления (толщина водного слоя) показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



78-19c



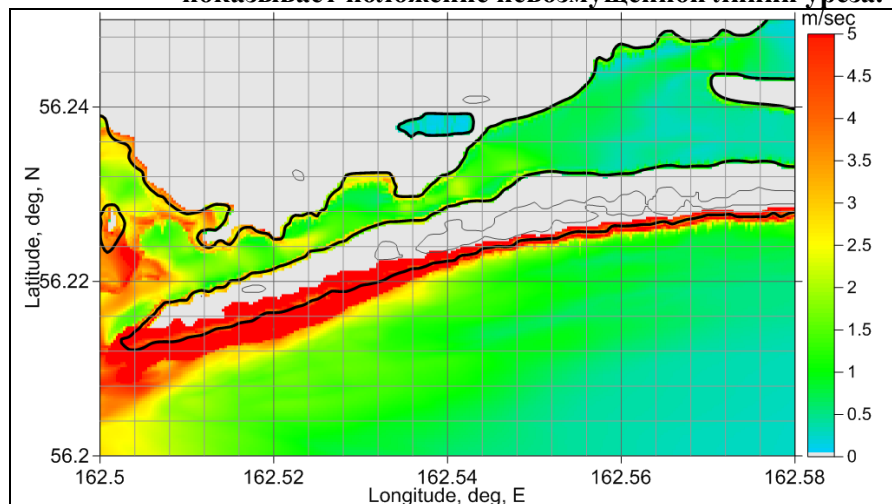
81-13e



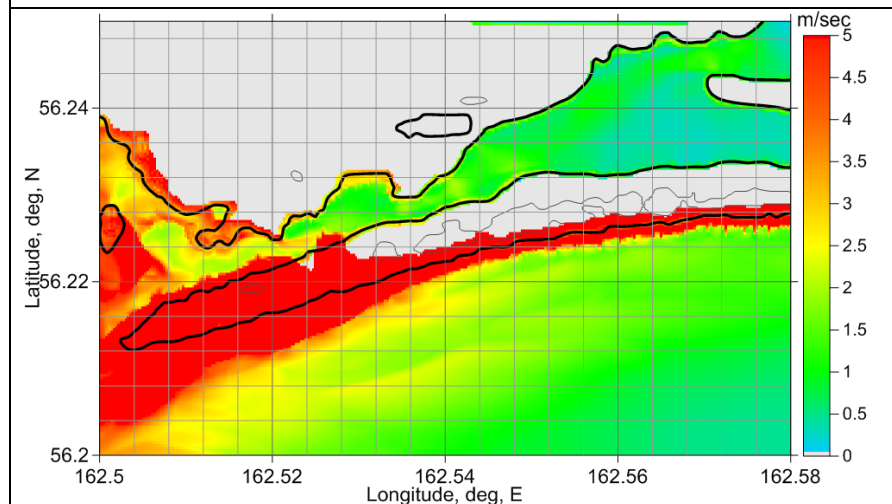
84-10b

3.4.3.4. Максимальные модули скорости во фрагменте расчетной области

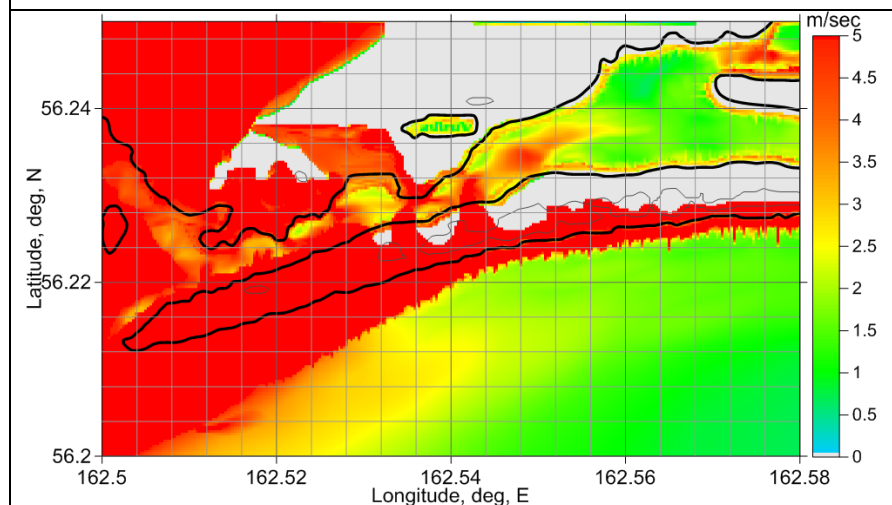
Таблица 16. Распределение максимальных значений модуля скорости течений, вызванных волнами цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 24), для защищаемого пункта «Усть-Камчатск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Значения модуля скорости течений показаны на цветовой шкале. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



78-19c



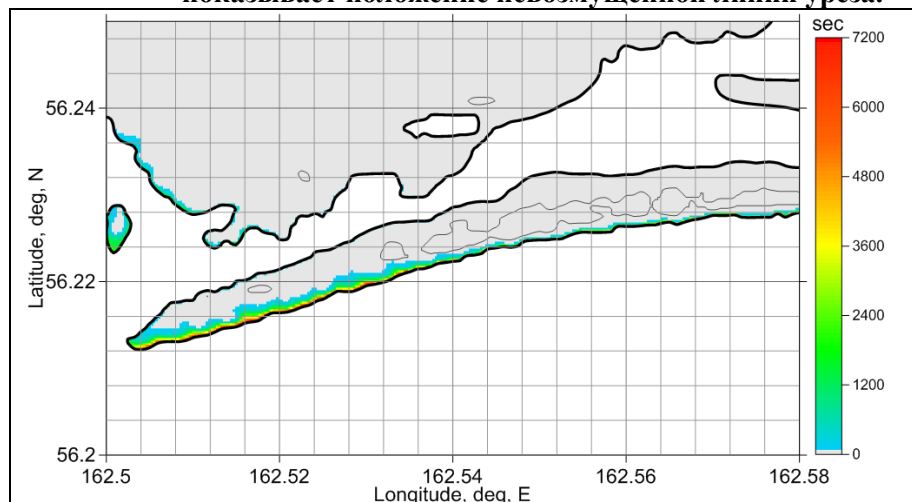
81-13e



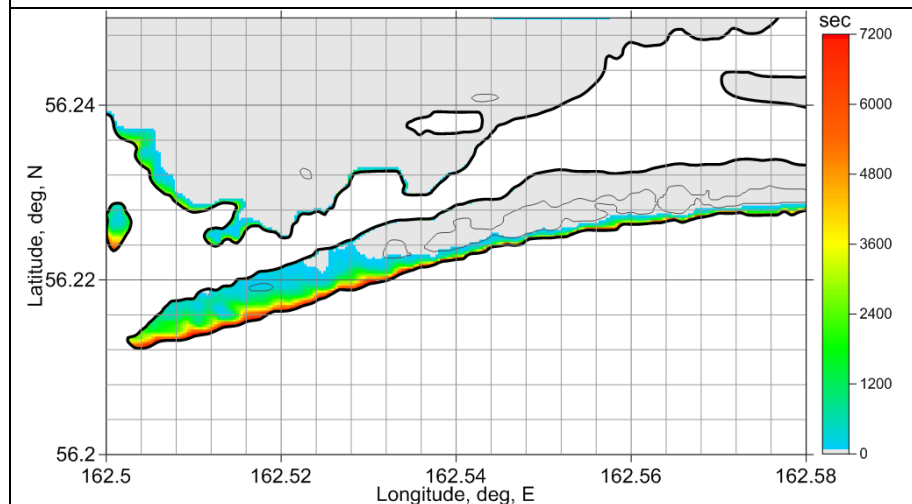
84-10b

3.4.3.5. Длительности затопления во фрагменте расчетной области

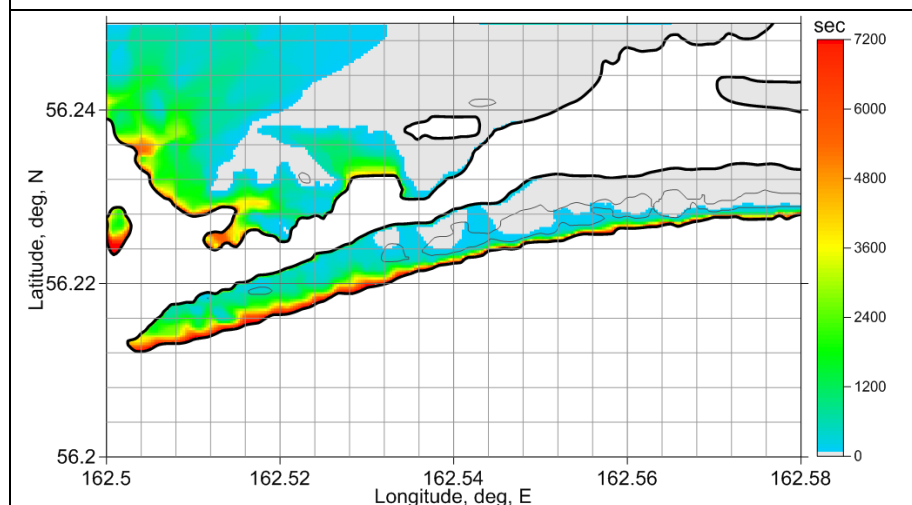
Таблица 17. Распределение длительности заливания суши (слоем воды с толщиной более 10 см) при цунами от «экстремальных» (наиболее опасных) модельных очагов (см. Рис. 24) для защищаемого пункта «Усть-Камчатск». Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Цветовая шкала для продолжительности заливания показана справа. Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.



78-19c



81-13e



84-10b

Приведенные в этом разделе результаты позволяют сопоставить значение максимальной амплитуды волны, достигающей берега (другими словами, высоту «мокрой линии» на «стенке», ограничивающей область расчета в задаче моделирования распространения), со значением близкой по смыслу величины, определяемой в задаче воспроизведения наката волны цунами на сушу. В качестве такой величины естественно выбрать максимальную высоту заплеска, достигаемого в пределах территории (участка побережья), занимаемой защищаемым пунктом.

Ниже приведены результаты такого сравнения для каждого из рассмотренных в настоящем отчете защищаемых пунктов (Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск) и для каждого из рассмотренных в разделе «экстремальных» модельных землетрясений. Расчет амплитуд волны на стенке выполнялся с использованием 1-минутной равномерной батиметрической сетки, в то время как моделирование заплеска выполнялось на 1-секундной сетке, аппроксимирующей рельеф суши и прилегающих участков дна.

Малокурильское

Магнитуда	Индекс источника	Высота на стенке	Высота заплеска	«Коэффициент усиления»
7.8	5b	0.5	0.8	1.6
8.1	3e	1.4	2.5	1.8
	4e	0.7	3.2	4.6
8.4	3a	0.9	2	2.2
	3b	1.2	1.5	1.3
9.0	87a	2.4	5	2.1
Средний «коэффициент усиления»				2.3

Северо-Курильск

Магнитуда	Индекс источника	Высота на стенке	Высота заплеска	«Коэффициент усиления»
7.8	13c	2	2.5	1.3
8.1	9e	1.25	5	4.0
	9f	1.4	3.5	2.5
8.4	7b	4.3	11	2.6
9.0	89a	8.7	25	2.9
Средний «коэффициент усиления»				2.6

Усть-Камчатск

Магнитуда	Индекс источника	Высота на стенке	Высота заплеска	«Коэффициент усиления»
7.8	19c	0.5	4	8.0
	19d	0.9	4	4.4
8.1	13e	1	5.5	5.5
	13f	1.3	5	3.8
8.4	10b	4.2	7	1.7
Средний «коэффициент усиления»				4.7

Для каждой из магнитуд приводятся значения максимальной амплитуды на стенке и максимальной высоты заплеска, соответствующие источникам, порождающим наиболее «опасные» для данного пункта цунами. При этом важно отметить, что в некоторых случаях максимальные высоты на стенке и максимальные заплески порождаются разными (по положению) источниками. В этих случаях в таблицу включаются результаты для обоих источников.

Представленные результаты сравнения высот на стенке и высот заплеска являются предварительными, их подробный анализ еще предстоит сделать, так же как и выполнить верификацию рассчитанных карт заливания на материалах реальных наблюдений.

Здесь же необходимо отметить, что во всех случаях максимальные высоты заплеска оказываются больше максимальных амплитуд, достигнутых «на стенке», что является ожидаемым результатом, хотя бы в силу резкого различия пространственных шагов сеток, использованных для моделирования распространения и наката.

Вторым важным результатом является подтверждение различий в параметрах модельных очагов, создающих максимальные амплитуды на стенке и максимальные высоты заплеска. На данном этапе это подтверждено в отношении положения очага, но можно ожидать подобных же различий и по другим параметрам (например, ориентации очага).

Основной же результат такого сравнения на данный момент состоит в понимании пределов применимости различных подходов к математическому моделированию взаимодействия волн цунами с побережьем, которые оставляют за высотами на «стенке» применение для оценки сравнения цунамиопасности отдельных участков побережья при конкретных землетрясениях и для сравнительной оценки «цунамиэффективности» различных модельных очагов в отношении конкретных защищаемых пунктов (участков побережья).

При необходимости получения более детальной информации о воздействии волн цунами, порождаемых различными модельными источниками в конкретных населенных пунктах (участках побережья), с учетом реальных характеристик рельефов суши и дна, следует выполнять более детальные расчеты наката волн цунами с использованием более сложных моделей и алгоритмов, наиболее адекватно воспроизводящих изучаемые процессы.

4. Пояснительная записка – проект программы работ на период 2014-2015 гг.

Основной проблемой для СПЦ России по-прежнему остается высокий процент ложных тревог, который подрывает доверие населения и властей к службе. Учитывая статистический характер возбуждения цунами даже при землетрясениях с фиксированной магнитудой, превышающей пороговое значение, его снижение в обозримом будущем возможно только путем более точной локализации выдаваемых прогнозов, т.е. перехода от выпуска тревоги по всей зоне к прогнозированию опасности цунами для конкретных защищаемых пунктов. Степень такой угрозы может существенно варьироваться в пределах зоны в зависимости от конфигурации побережья, ориентации пункта по отношению к очагу цунами, ориентации самого очага и т.д.

Все выполненные до 2013 года расчеты распространения цунами от системы модельных очагов региональных и удаленных цунамигенных землетрясений базировались на получении единственного параметра – ожидаемой высоты волны на «стенке», поставленной в ближайшем к защищаемому пункту узле расчетной сетки. Анализ реальных данных и результаты выполненных численных экспериментов показывают, однако, что степень угрозы и реальные последствия определяются не только высотой волны на урезе, но зависят также от периода и направления подхода волны, резонансных характеристик бухт и заливов, состояния прилива и других факторов.

В настоящее время в ИВТ СОРАН и ИВМиМГ СОРАН создана вычислительная технология, позволяющая (при наличии соответствующих цифровых моделей батиметрии и рельефа суши) рассчитывать карты заливания для любого защищаемого пункта. Это означает, что степень угрозы цунами для конкретного берегового пункта может быть детализирована как по его территории, так и по набору различных параметров ожидаемого затопления:

- максимальная высота и
- дальность заплеска,
- продолжительность заливания и осушения дна,
- скорости течений,
- глубина слоя воды на суше.

Серия расчетов по новой методологии была проведена в 2013 году для трех населенных пунктов на Курило-Камчатском побережье (Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск), представляющих собой основные ситуации прогнозирования (широкая бухта с узким входом, открытый в сторону океана пролив, устье большой реки).

- По результатам анализа полученных материалов и оценки степени их достоверности формулируется **первое предложение в Программу работ на 2014 – 2015 гг.:**

Подобные расчеты должны быть выполнены для всех других защищаемых пунктов Дальневосточного побережья РФ, в первую очередь, для наиболее населенных из них, а также тех, у которых есть портовые сооружения и какая-либо инфраструктура в угрожаемой зоне. На Курилах к таким

пунктам могут относиться Южно-Курильск, Курильск, Крабозаводск, Буревестник, на Камчатке – Авачинская бухта, Оссора, Телички, Никольское (на о-ве Беринга), на Сахалине – Холмск, Невельск, Корсаков, Поронайск, в Приморье – Владивосток, Находка, Рудная Пристань. В соответствии с принятым ранее решением о включении в зону ответственности Дальневосточной СПЦ побережья Охотского моря к списку таких пунктов должен быть добавлен Охотск и Магадан.

Совершенно неотложным делом представляется переход от бинарного прогноза цунами (тревога/нет тревоги) к введению классификации тревожной ситуации по нескольким уровням. Представляется, что в качестве основного параметра для такой классификации должна быть взята величина максимальной положительной амплитуды волны цунами на урезе (амплитуда "на стенке" в узле расчетной сетки, ближайшем к защищаемому пункту).

Разделение сигналов тревог по уровням уже давно используется в зарубежных службах предупреждения о цунами. Тихоокеанский центр в Гонолулу в настоящее время использует три диапазона ожидаемого превышения уровня

- 0.3 – 1.0 м **уровень А** (слабое цунами)
- 1.0 – 3.0 м **уровень В** (умеренное цунами)
- более 3 м **уровень С** (сильное цунами)

Если добавить сюда диапазон 0 – 0.3 м (**нет угрозы цунами**), то всего получается четыре уровня, в соответствии с которыми ТЦПЦ классифицирует свои сообщения, направляемые странам-участникам Международной системы предупреждения о цунами на Тихом океане.

Примерно такая же схема (с пороговыми значениями в 1 м и 3 м) используется в японской службе предупреждения. При сильных землетрясениях ЖМА использует еще дополнительные уровни в 5 м и 10 м, однако, важным изменением регламента, введенным после цунами Тохоку 2011 года, явилось предписание использовать термин «разрушительное (huge)» цунами без указания на конкретную высоту волны в процессе обработки таких мега-землетрясений (ввиду длительности развития очагового процесса).

- ii. Представляется целесообразным поэтапное внедрение подобной схемы в регламент Дальневосточной СПЦ. Таким образом, **второе предложение в Программу работ на 2014 – 2015 гг.** следует из необходимости *выполнить верификацию используемой методики моделирования и наката цунами на материалах реальных наблюдений дальневосточных цунами в отношении корректности воспроизведения положения и размеров зон (полигонов) с различными высотами цунами. Сравнение измеренных и расчетных высот цунами в отдельном пункте не может служить критерием верификации, т.к. причины совпадения или несовпадения этих значений слишком разнообразны. Однако разумное совпадение по размерам и положению зон расчетных и фактических высот волн, очерченных по выбранным диапазонам значений, несомненно должно быть обеспечено.*

iii. Третьим, важным с нашей точки зрения, направлением работ в 2014 – 2015 гг. является исследование вариаций конечного продукта (карт заливания) по отношению к неопределенностям входных параметров задачи. При заданных параметрах очага результат расчета получается с достаточно высокой точностью (порядка 1%), однако это не означает высокую точность реального прогноза. Неопределенности и погрешности, неизбежные при оперативном определении положения очага и величине его магнитуды, приводят к неопределенностям в значениях заплеска на берегу, величину которых необходимо оценивать для каждой конкретной ситуации. Возможно, что сами погрешности не должны доводиться до конечных потребителей (чтобы исключить необходимость принятия ответственных решений в ситуациях, когда погрешность результата очень велика, например, ожидаемая высота волны в пределах от 1 до 10 метров), но они всегда должны быть известны персоналу центров.

Введение в регламент и практическое использование результатов предварительного моделирования требует также дополнения системы модельных очагов цунамигенных землетрясений Дальнего Востока. Используемая сейчас система модельных очагов обеспечивает полное покрытие возможных цунамигенных зон в Курило-Камчатской зоне и в акватории Японского моря. Однако она построена без перекрытий по площадкам разрыва, что приводит к слишком большому пространственному шагу для магнитуд 8.4 и 9.0 (215 и 430 км соответственно). Положение очага относительно берегового пункта, наряду с его магнитудой и глубиной, является одним из основных параметров, определяющих высоту волны. Поэтому погрешности, связанные с несовпадением фактического положения источника цунами с положением ближайшего модельного очага, являются недопустимо большими при магнитудах 8.0 и более.

iv. Четвертым предложением в программу работ на 2014 – 2015 гг. становится предложение о детализации системы модельных очагов цунамигенных землетрясений Дальнего Востока за счет уменьшения шага смещения координат модельных очагов до величины, сопоставимой с точностью оперативных определений координат землетрясений, т.е. ± 25 -30 км и проведения новой серии вычислительных экспериментов с целью оценок воздействия порождаемых этими модельными очагами волн цунами на защищаемое Дальневосточное побережье России. К этому направлению работ примыкает также необходимое расширение системы модельных очагов в акватории Охотского моря. Именно таким образом можно будет добиться устранения указанных в предыдущем абзаце погрешностей.

5. Заключение

За отчетный период исполнителями выполнены следующие работы:

Создана методика расчета карт дальностей заливания и карт других параметров, характеризующих воздействие цунами на сухой берег, сопряженная с методикой расчета распространения цунами на реальных участках акватории Курило-Камчатской зоны. В рамках этой методики проведена большая серия расчетов для оценки воздействия цунами на побережье в районе поселков Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск.

Проведен анализ всех доступных материалов по воздействию исторических цунами, как региональных, так и удаленных, на участки побережья, примыкающие к выбранным пунктам. Сделан вывод о том, что недостаточность и фрагментарность исторических данных не позволяют получить для этих пунктов надежных оценок цунамиопасности в рамках статистико-вероятностного подхода. В связи с этим для оценки цунамиопасности необходимо использование результатов моделирования.

По согласованию с НПО «Тайфун» выбран критерий (превышение расчетной высотой волны «на стенке» вблизи защищаемого пункта величины 0.5м), в соответствии с которым для каждого из рассмотренных береговых пунктов (Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск) выбран набор «значимых» гипотетических цунамигенных землетрясений с магнитудами 7.8, 8.1, 8.4, 9.0 из построенной в 2007-2012 гг. системы региональных очагов.

Выполнены необходимые модификации расчетных областей, обеспечившие возможность проведения расчетов для всех выбранных источников.

Для каждого из регионов и для каждого источника, включенного в соответствующий «значимый» набор, определен с помощью серийных вычислительных экспериментов согласованный набор характеристик, описывающих воздействие цунами на побережье в районе расположения защищаемого пункта (дальности максимального заливания и осушки, глубина заливания, длительность заливания, максимальные скорости течений).

Созданы шаблоны графических представлений результатов расчетов карт заливания, облегчающие последующий анализ и интерпретацию результатов. Все графические материалы, характеризующие воздействие цунами на территорию выбранных пунктов и прилегающие участки побережья, представлены в соответствии с предложенными шаблонами.

Сформулированы предложения в программу работ на 2014 – 2015 гг. в рамках Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года» по применению результатов численных расчетов цунами и оценки величины заплеска на берег для уточнения критериев «опасности» подводных землетрясений для конкретных защищаемых пунктов.

Проанализированы тенденции использования результатов моделирования в зарубежных службах предупреждения о цунами, в частности, линейка новых продуктов, предлагаемых к внедрению в 2014 году Тихоокеанским центром предупреждения о цунами в Гонолулу. Сделан вывод о том, что данные продукты ни по уровню быстродействия, ни по детальности прогнозирования не смогут способствовать повышению качества и надежности прогнозов цунами в большинстве

ситуаций прогнозирования цунами от региональных землетрясений с очагами в пределах Курило-Камчатской зоны, Японского и Охотского морей.

6. Литература

Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. (1982) Метод крупных частиц в газовой динамике. М.; Наука. 392 с.

Заякин Ю.А. (1996) Цунами на Дальнем Востоке России, Петропавловск-Камчатский: Камшат, 88 с.

Кайстренко В.М., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А. и др. (1997) Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 8. С. 55-73.

Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. (2011) Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. На Тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. Т. 38, № 1. С. 41-64.

Крашенинников С.П. (1755) Описание земли Камчатки, т.1, Санкт-Петербург, 438 с.

Лобковский, Л.И., Куликов, Е.А., Рабинович, А.Б., Иващенко, А.И., Файн, И.В., Ивельская, Т.Н. (2008) Землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г и 13 января 2007 г в районе Средних Курил: оправдавшийся прогноз // ДАН, Т. 418, №6. - с. 829 - 833.

Порядок расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации // Руководящий документ РД 52.18.–2011, В.С.Косых (руководитель разработки), Л.Б.Чубаров, д-р физ.-мат. наук, В.К.Гусяков, д-р физ.-мат. наук, С.А.Бейзель, канд. физ.-мат. наук, Д.А.Камаев, д-р техн. наук, В.М.Григорьева, канд. физ.-мат. Наук. Обнинск, 2011. 47 с.

Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., Программа для ЭВМ: Модуль расчета наката волн цунами на берег RunUp-LP // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2013617980. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (RU). Заявка №2013615558/69. Дата поступления заявки 02 июля 2013. Зарегистрировано в Реестре Программ для ЭВМ 28 августа 2013.

Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е., Добровольский А.Д., Живаго А.В. (1958) Цунами 4–5 ноября 1952 г. // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР, № 4. С. 36-37.

Смышляев А.А. (2003) Ночь океана (Хроника тихоокеанского цунами 1952 года) // В книге: Смышляев А.А. Время красной рыбы, Петропавловск-Камчатский, "Новая книга", С. 250-320.

Соловьев С.Л. (1968) Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // В кн.: Проблема цунами, М.: Наука, С. 7-50.

Соловьев С.Л. (1978) Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1937-1976 гг. // В кн.: Изучение цунами в открытом океане, М., Наука, С. 61-136.

Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. (1961) Сводка данных о цунами в СССР // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР, № 9, С. 23-55.

Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик води цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №2011614598. Правообладатели: Учреждение Российской академии наук Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН (RU), Заявка №2011612895, Дата поступления 25 апреля 2011 г. Зарегистрировано в Реестре Программ для ЭВМ 9 июня 2011г.

Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н., Кайстренко В.М. (2012) Цунами на Курильских островах. Особенности проявления и меры по снижению риска // Южно-Сахалинск, ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 44 с.

Atwater B.F., Nelson A.R., Clague J.J. et al. (1995) Summary of coastal geologic evidence about past great earthquakes at the Cascadia subduction zone // *Earthquake Spectra*, Vol.11, No. 1. P.1-18.

Bautin S.P., Deryabin S.L., Sommer A.F., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. (2011) Use of analytic solutions in the statement of difference boundary conditions on a movable shore line // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. Vol. 26, No. 4. P. 353-377.

HTDB/WLD (2013) Historical Tsunami Database for the World Ocean, Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS, Novosibirsk, Russia, <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>

Kanamori H. (1972) Mechanism of tsunami earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.*, V.6, P.346-359.

Kawai H., Sato M., Kawaguchi K., Seki K. (2011) The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami observed by GPS buoys // *J. Jap. Soc. Civil Eng.*, Ser. B2 67. P. 1291-1295.

Minoura K., Gusiakov V.K., Kurbatov A.V. (1993) Tsunami deposits intercalated in coastal sequences of the Kamchatka Peninsula // *Historical Earthquakes*, Vol. 9. P. 99-115.

Long-wave runup models (1996) Editors: Yeh H., Liu P., Synolakis C. World Scientific, Singapore. 404 p.

Mori N., Takahashi T. and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012) Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami // *Coastal Engineering J.* Vol. 54, No. 1. P. 1-27.

NGDC/NOAA Tsunami Database (2013) http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml.

Synolakis C.E. (1987) The runup of solitary waves // *J. Fluid Mech.* Vol. 185. P. 523-545.

Synolakis C.E. (1991) Tsunami Runup on Steep Slopes: How Good Linear Theory Really Is // *Natural Hazards*. Vol. 4. P. 221-234.

Takagi T. (1996) Finite element analysis in bench mark problems 2 and 3 // In: *Long Wave Runup Models*, Yeh H. et al (ed), World Scientific, Singapore. P. 258-264.