

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю.И. Шокин

10 июня 2013 года

**«Моделирование и анализ характеристик проявления
волн цунами у защищаемых пунктов
Дальневосточного побережья Российской Федерации»**

ОТЧЕТ

по четвертому 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

1	Аннотация.....	4
2	Введение	4
3	Обзор исторических наблюдений цунами в выбранных пунктах	6
4	Методика расчета наката	12
5	Модели и алгоритмы расчета характеристик наката волны цунами на прибрежную зону ...	13
6	Верификация численных алгоритмов и валидация математической модели.....	17
7	Постановка задачи моделирования наката волны цунами на защищаемое побережье.....	27
8	Результаты моделирования.....	33
9	Заключение.....	63
10	Литература.....	64

1 Аннотация

Согласно Техническому заданию и уточненному Календарному плану на 2013 г., в рамках 4-го этапа работ предполагалось разработать методику моделирования наката волн цунами на береговую зону с целью определения зон затопления, распределения скоростей течения, распределения максимальных глубин и длительности затопления. С использованием разработанной методики следовало провести пробные расчеты для населенных пунктов Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск, расположенных в различных сеймотектонических зонах.

Таким образом, в настоящий отчет включены необходимые сведения о математических моделях, алгоритмах и методиках расчета характеристик затопления с приложением примеров их применения в районах перечисленных выше населенных пунктов.

За отчетный период исполнителями выполнены следующие работы:

1. Создан, исследован и проверен на тестовых решениях и экспериментальных данных алгоритм моделирования заплеска волн цунами на участки побережья с реальным рельефом суши.
2. Создана модифицированная версия программного комплекса MGC, обеспечивающая сквозной расчет характеристик волн цунами на всех этапах жизни волны от генерации до заплеска на побережье.
3. Подготовлены массивы цифровой батиметрии для акваторий, прилегающих к районам бухты Малокурильской, а также городов Северо-Курильска и Усть-Камчатска.
4. Подготовлены массивы цифрового рельефа суши, прилегающей к этим акваториям.
5. Построены модели трех гипотетических цунамигенных землетрясений, послуживших источниками волн цунами, накатывающихся на выбранные участки побережья.
6. Проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых рассчитаны важнейшие параметры проявления гипотетических цунами на побережье.
7. Результаты сопоставлены с известными натурными данными.

Основным результатом стало создание методик расчета характеристик затопления волнами цунами побережья, прилегающего к защищаемым пунктам; продемонстрирована работоспособность этих методик. Показано, что ключевым моментом, определяющим успех решения обсуждаемого класса задач, является доступ к массивам детальной батиметрии (с шагом оцифровки от 15 до 30 м), соответствующим массивам цифрового рельефа и диссипативным характеристикам дна и суши, определяющим степень шероховатости поверхностей.

2 Введение

Задачей службы прогноза цунами (СПЦ) является прогнозирование времен прихода и возможной высоты волны в конкретном населенном пункте после прошедшего 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 первого (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. Для отработки этой методики на этапе составления технического задания были выбраны три населенных пункта – Малокурильское, Северо-Курильск и Усть-Камчатск.

Выбор этих пунктов был продиктован следующими обстоятельствами:

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

2) различной ориентацией 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) различной конфигурацией прибрежной акватории, вблизи которой расположен защищаемый пункт. Для пос. Малокурильского – 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. .

Отработка 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.

3 Обзор исторических наблюдений цунами в выбранных пунктах

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 предположить, 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). В 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 Малогурильской 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 Малогурильской 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 примерно 160 км от Малогурильского. После этого землетрясения впервые была объявлена тревога цунами по Дальневосточному региону СССР (Шевченко и др., 2012).

Следующее значительное подтопление Малогурильского 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. 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 Малогурильской 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 Малогурильской 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 Малогурильского. На восточном берегу острова (б.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,

вызавшее на острове многочисленные оползни и трещины в грунте, а также существенные разрушения в поселках Малокурильское и Крабовозводское. 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 высота волн на ближайшем побережье достигала 20-22 м (Лобковский и др., 2008).

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 достигла 2.3 метра, в Крабовозводском – 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 (магнитуды 9) подводных землетрясениях, дважды происходивших здесь на протяжении последних 270 лет.

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 саженей) 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 ее сильном преувеличении. Ясно, 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 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 небольшом протяжении побережья.

Транстихоокеанское 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 транстихоокеанское 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 сопровождалась 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.

4 Методика расчета наката

Реализованная в отчетный период методика расчета наката на выбранные участки «защищаемого» побережья волн цунами, возникших в результате гипотетических модельных сейсмических очагов, предполагает 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, встроенного в зарегистрированный ранее исполнителями программный комплекс MGS. 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 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.

5 Модели и алгоритмы расчета характеристик наката волны цунами на прибрежную зону

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. 1.

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,
 $\omega_E = 7.292115 \cdot 10^{-5} 1/c$.

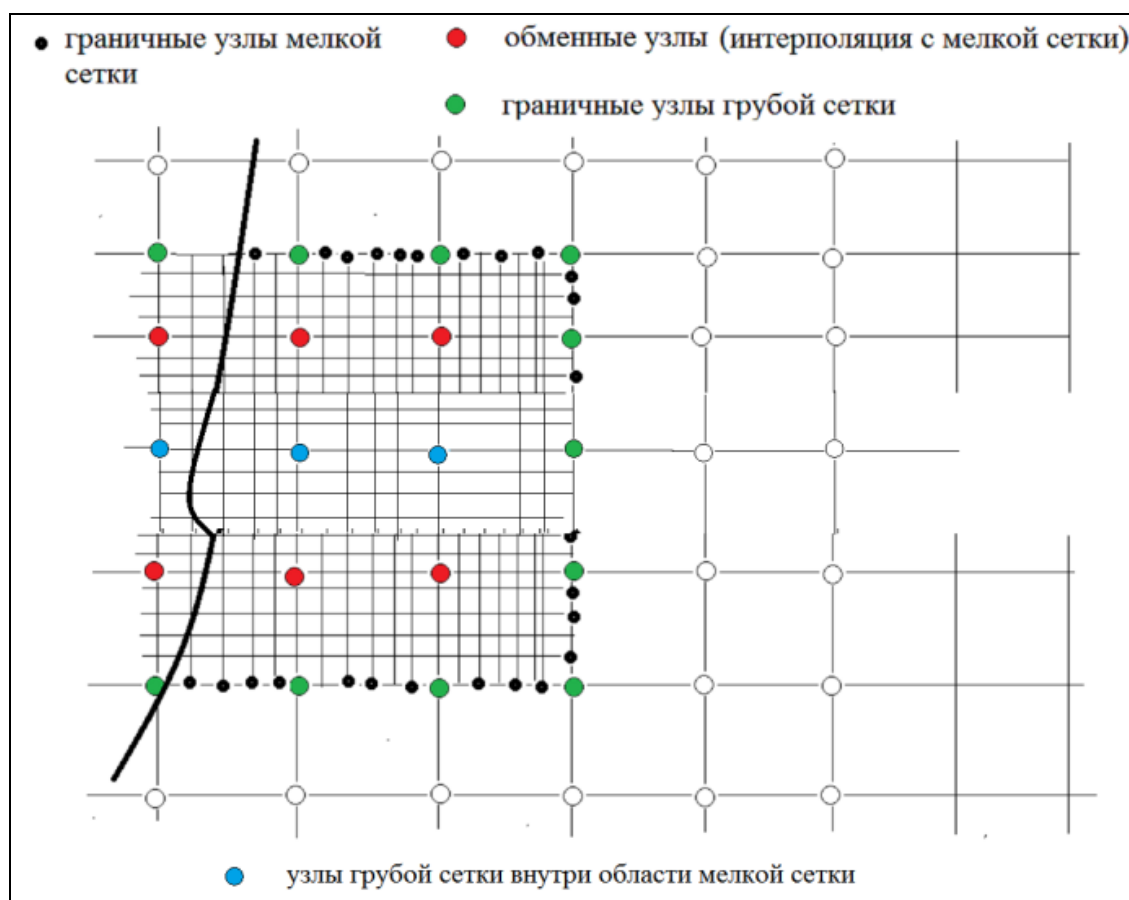


Рис. 1. Структура вложенных сеток, жирная черная линия соответствует начальному положению линии уреза.

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. 1), на боковых границах которого задаются параметры течения, полученные путем интерполяции по времени и по пространству вдоль этих границ результатов расчета в глобальной области.

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:

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

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

На втором (лагранжевом) этапе решаются уравнения переноса

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

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. 2). В узлах сетки определены сеточные функции $H_{i,j}$ и $h_{i,j}$ (кружочки), расположение компонент скорости u_λ , u_ϕ обозначены квадратиками и треугольниками соответственно.

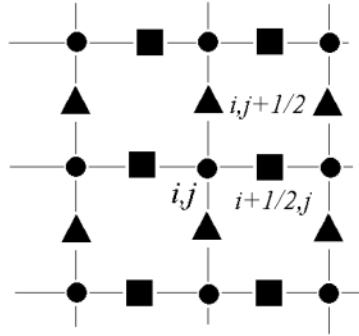


Рис. 2. Структура шаблона разностной схемы.

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:

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

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 $\Delta t \leq \alpha \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u_x| + \sqrt{gH}}, \frac{\Delta y}{|u_y| + \sqrt{gH}} \right\}$ 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.

6 Верификация численных алгоритмов и валидация математической модели

Численные методы расчета наката волн на берег верифицировались на хорошо известных тестовых задачах (Long-wave runup models, 1996) в одномерной и двумерной постановках.

В одномерном случае рассматривалась задача о накате уединенной волны на плоский откос с углом наклона β , сопрягающийся с участком дна постоянной глубины H_0 . Соответствующее начальное смещение свободной поверхности и поле скорости задавались по формулам:

$$\eta(x,0) = \frac{A}{ch^2(Z)}, \quad Z = \sqrt{\frac{3A}{4(H_0 + A)}} \cdot \frac{(x - x_0)}{H_0}, \quad u(x,0) = -\frac{\eta \sqrt{g(H_0 + A)}}{H_0 + \eta},$$

где A – амплитуда уединенной волны, x_0 – начальное положение ее гребня (см. Рис. 3).

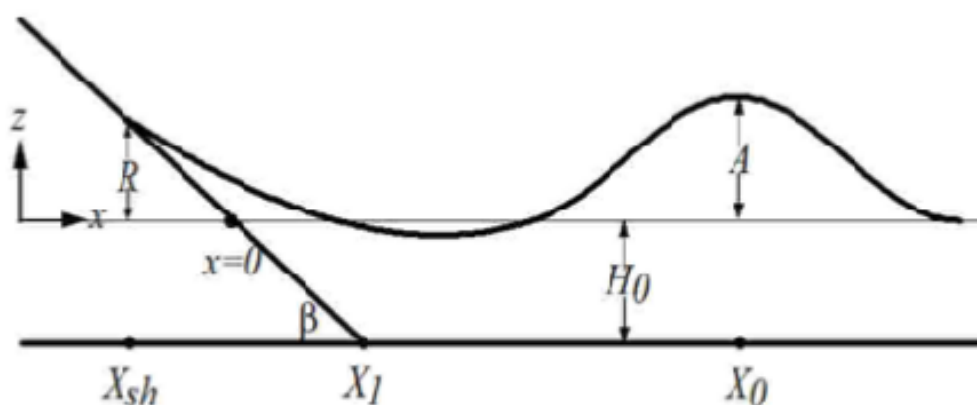


Рис. 3. Схема расчетной области для одномерных тестовых расчетов.

Для рассматриваемой задачи К.Синолакисом в работе (Synolakis, 1987) получено аналитическое решение для определения величины вертикального заплеска:

$$\frac{R}{H_0} = 2.831 \sqrt{\operatorname{ctg} \beta} \left(\frac{A}{H_0} \right)^{5/4} \quad (6)$$

Эта формула применима в пределах $(0.288 \tan \beta)^2 \ll \frac{A}{H_0} < 0.479 (\tan \beta)^{10/9}$.

Для верификации предложенных численных алгоритмов использовался следующий набор параметров, характеризующих постановку задачи (Таблица 1 – Таблица 3):

Таблица 1. Параметры одномерной тестовой задачи: амплитуды падающей волны в зависимости от углов склона.

$\operatorname{ctg} \beta$	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85	19.85
A/H_0	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05

Таблица 2. Параметры одномерной тестовой задачи: углы склона в зависимости от амплитуд падающей волны.

A/H_0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
β	1°	2°	~2.88° ($\operatorname{ctg} \beta = 19.85$)	4°	5°	8°	10°

Таблица 3. Параметры одномерной тестовой задачи: различные углы склона и амплитуды падающей волны.

β	10°	10°	10°	15°	15°	15°
A/H_0	0.1	0.15	0.02	0.1	0.15	0.2

На следующем рисунке (Рис. 4) приведено сравнение величин вертикального заплеска, полученных по аналитической формуле (6), с рассчитанными по методу крупных частиц. Дополнительно приведены результаты численных расчетов других авторов (в том числе, с использованием на подвижной линии уреза аналитических граничных условий (Bautin S.P. et al, 2011)) и данные лабораторных экспериментов из работ (Synolakis, 1987; Synolakis, 1991).

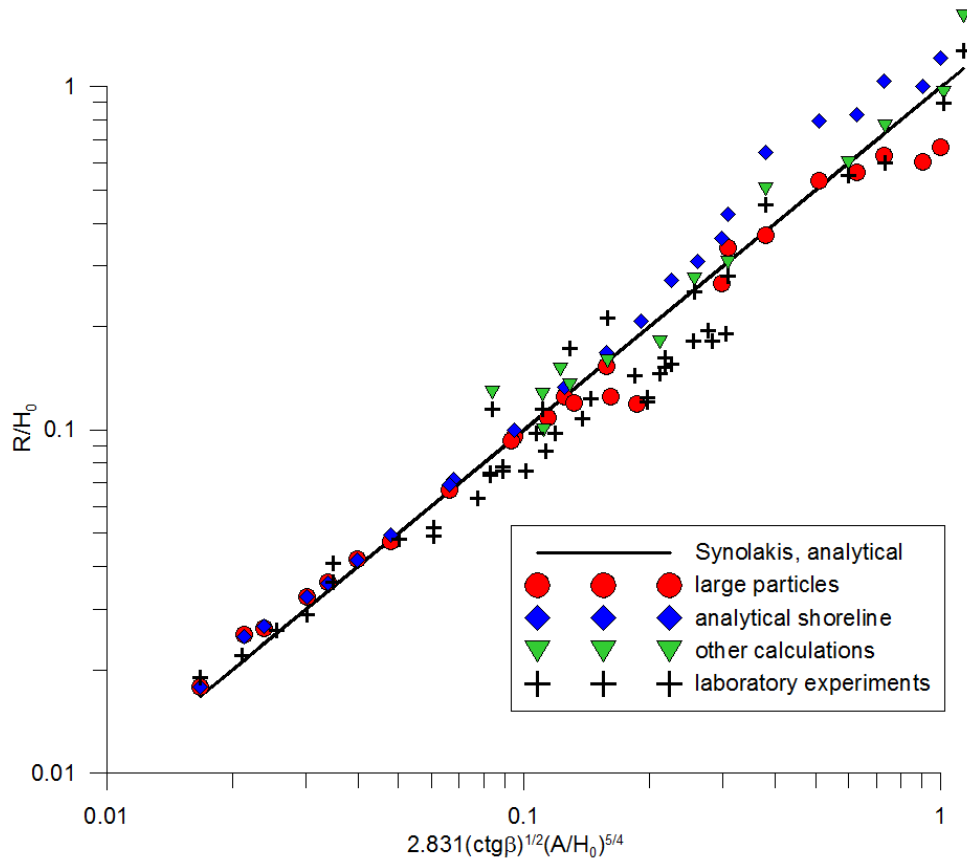


Рис. 4. Сравнение результатов, полученных с помощью метода крупных частиц с аналитическими результатами, экспериментальными данными и материалами вычислительных экспериментов других авторов.

Серия вычислительных экспериментов была также проведена по сопоставлению полученных авторами результатов с данными натурального эксперимента, выполненного в исследовательской лаборатории ВМС США. Соответствующая акватория представляла собой прямоугольный бассейн шириной $L_y = 30$ м и длиной $L_x = 25$ м; глубина невозмущенного слоя воды $H_0 = 0.32$ м. В центральной части исследовательского бассейна был расположен остров, представляющий собой прямой круглый конус (Рис. 5) с радиусом нижнего основания $R_0 = 3.6$ м, верхнего – $R_1 = 1.1$ м. Высота конуса $H_1 = 0.625$ м, угол наклона образующей при основании $\beta \approx 14^\circ$ ($\tan \beta = 1/4$). Боковые стенки бассейна сделаны из специального материала, обеспечивающего поглощение подходящих к ним волн (с минимальным отражением).

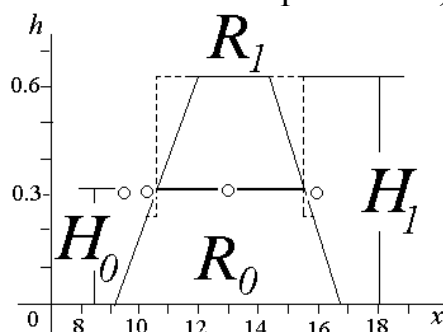


Рис. 5. Параметры бассейна и конического острова в эксперименте по взаимодействию уединенной волны с островом (вид сбоку).

Входящая в бассейн уединенная волна породилась управляемым перемещением волнопродуктора, состоявшего из 60 пластин, каждая из которых имела ширину 0.46 м и высоту 0.76 м. В лабораторном эксперименте генерировались уединенные волны трех различных амплитуд $A_0 = 0.015, 0.03, 0.06$ м (эксперименты *A, B, C*).

Графики перемещения пластин волнопродуктора $X(t)$ (для экспериментов *A* и *B*) приведены на следующем рисунке (Рис. 6).

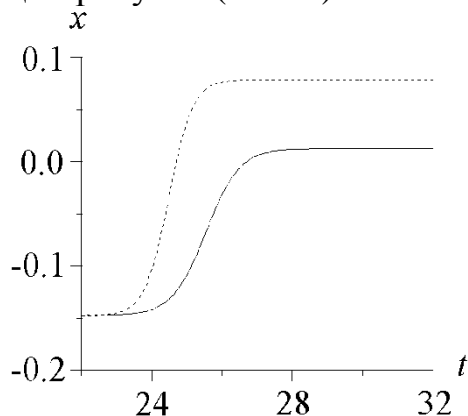


Рис. 6. Графики перемещения пластин волнопродуктора (для экспериментов *A* и *B*).

Задача вычислительного эксперимента ставится в правосторонней системе координат, ось Oy которой направлена параллельно волнопродуктору, а Ox — перпендикулярно ему в сторону острова. Предполагается также, что начало системы координат совпадает с краем волнопродуктора (Рис. 7), а центр модельного острова располагается в точке с координатами $x_0 = 12.96$ м, $y_0 = 13.80$ м.

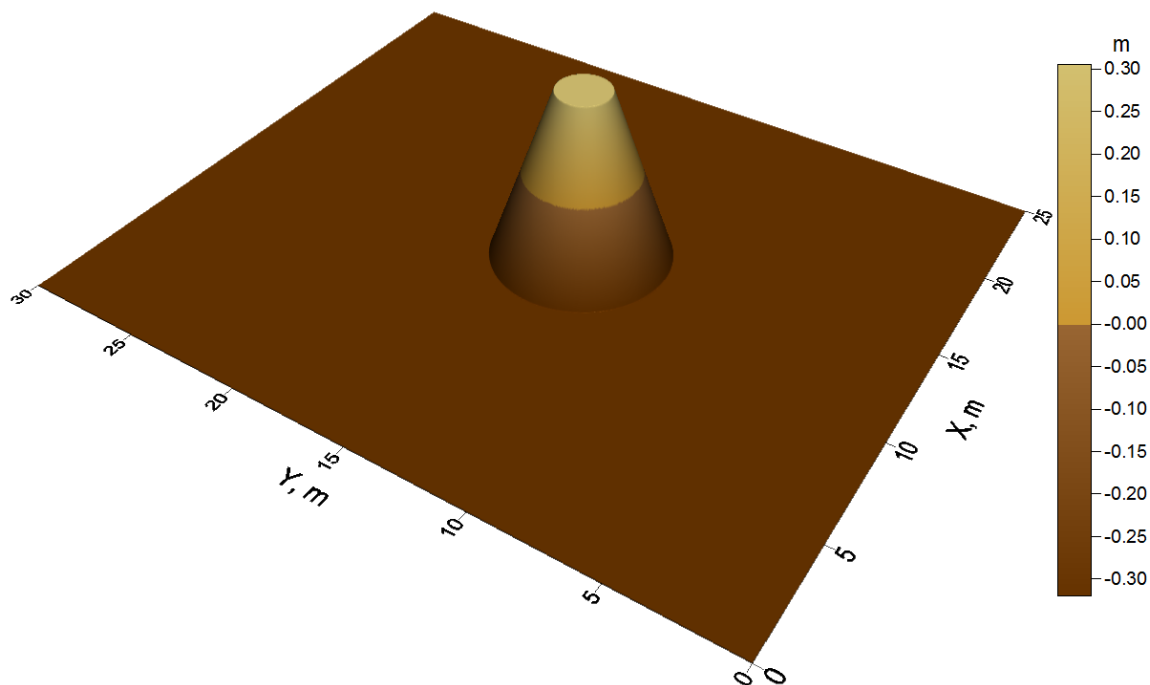


Рис. 7. Рельеф дна модельного бассейна для тестирования двумерной модели и соответствующего алгоритма.

Лабораторные данные, доступные для сравнения и оценки результатов численного моделирования, представляют собой мареограммы, записанные

«контрольными» датчиками, расположенными в четырех характерных точках бассейна из общего набора 27 регистрирующих приборов: #6, 9, 16, 22 (Рис. 8, Таблица 4). В таблице указаны номера датчиков, в которых рассчитывались мареограммы, их координаты и глубины в точках их установки. Датчик #6 установлен непосредственно перед островом, датчик #9 – на мелководье со стороны волнопродуктора, датчик #16 – на мелководье справа, датчик #22 – на мелководье за островом. Кроме этого, фиксировались максимальные заплески по периметру острова в 24-х точках.

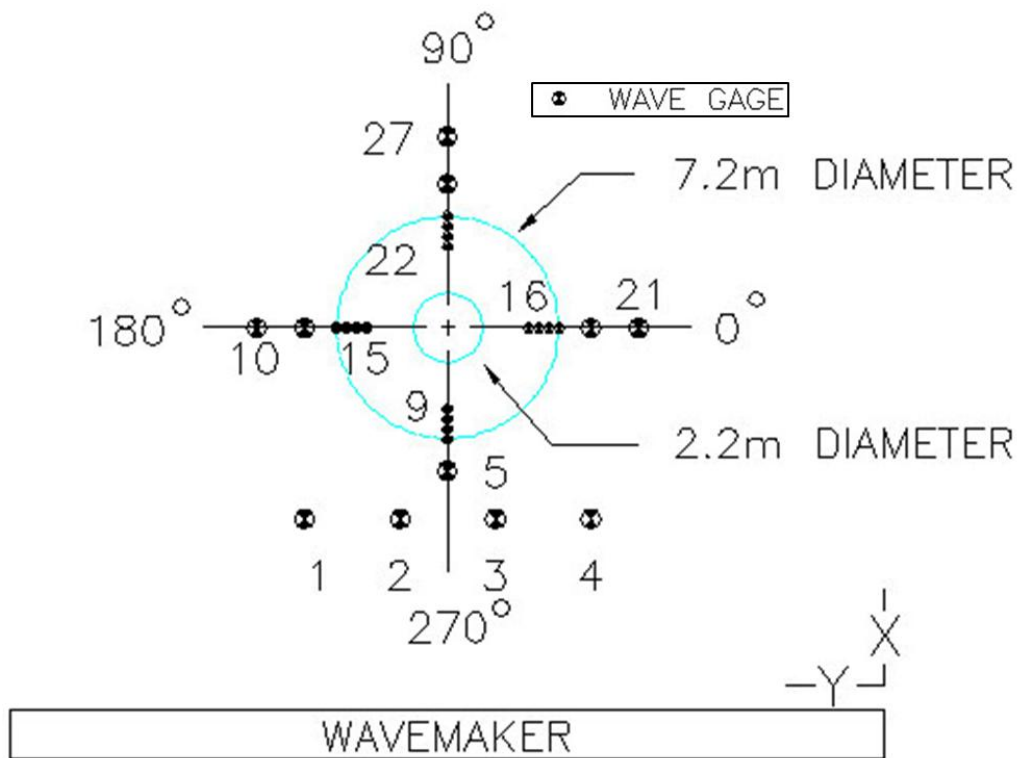


Рис. 8. Схема расстановки датчиков (вид сверху).

Таблица 4. Расположение четырех «контрольных» датчиков и глубины в точках их размещения

gage #	x	y	H
6	9.36	13.80	0.317
9	10.36	13.80	0.082
16	12.96	11.22	0.079
22	15.56	13.80	0.083

При постановке вычислительного эксперимента задача несколько упрощалась в части генерации падающей на остров уединенной волны – вместо моделирования движения волнопродуктора через границу впускалась уединенная волна (солитон) с нужной амплитудой A_0 :

$$\eta(0, y, t) = A_0 \operatorname{sech}^2 \left\{ \left(\frac{3A_0}{4H_0^2(H_0 + A_0)} \right)^{1/2} (x_0 - ct) \right\}, \quad c = \sqrt{g(H_0 + A_0)}.$$

В ближайших к входной границе внутренних точках задавалась нормальная компонента скорости u_n по формуле $u_n = \frac{c\eta}{H + \eta}$. Касательная компонента

скорости v во внутренних узлах сетки, прилегающих к входной границе, вычислялась из соотношения $u_y = v_x$, которое является следствием предположения о квази-потенциальности вектора скорости \mathbf{u} . Это соотношение выполняется точно на участках бассейна с постоянной глубиной. На других границах ставились хорошо известные «поглощающие» условия, задаваемые уравнением Зоммерфельда $f_t + cf_n = 0$, где направление n совпадает с направлением внешней к границе нормали. Ниже будут приведены результаты, соответствующие экспериментам (A) – $A_0^A = 0.015$ м и (B) – $A_0^B = 0.03$ м. При этом использовалась равномерная разностная сетка с шагом 2 см.

Общий характер развития волнового процесса (Рис. 9) слабо зависит от амплитуды падающей волны (эксперименты A, B): уединенная волна с возрастающей по мере взаимодействия с модельным островом амплитудой огибает его и образует в тыльной части острова зону концентрации энергии, которая движется по направлению к выходной границе. За этим волновым образованием следует череда концентрических волн, покидающих бассейн через боковые выпускающие границы. Показанные на рисунке последовательные во времени состояния свободной поверхности были рассчитаны для эксперимента (A) без учета донного трения.

В связи с тем, что задание граничных данных в лабораторных и численных экспериментах несколько отличалось, целью проведенных расчетов было получение не столько количественного совпадения полученных результатов, сколько хорошего качественного описания волнового процесса.

Как показывают приведенные ниже результаты, рассчитанные значения находятся в хорошем соответствии с натурными данными и, в частности, хорошо воспроизводят изменение величины вертикального наката при обтекании волной острова: максимальный накат наблюдается на передней стороне, затем, при обходе вдоль острова, он постепенно снижается, а на задней стороне наблюдается еще один экстремум величины заплеска (Рис. 9 (д), Рис. 10).

Таблица 5. Сравнение рассчитанных авторами настоящего отчета значений максимального вертикального заплеска на передней и задней по отношению к падающей волне сторонах конического острова с данными лабораторного эксперимента и вычислений, приведенных в статье (Takagi, 1996)

	Эксперимент A						Эксперимент B					
	Расчет методом крупных частиц				Расчет (Takagi, 1996)	Эксперимент.	Расчет методом крупных частиц			Расчет (Takagi, 1996)	Эксперимент.	
Коэффициент Шези (шероховатость)	0	0.002	0.004	0.005			0	0.002	0.004			
R (см) спереди	4.5	4.1	3.6	3.6	4.9	3.2	11.5	9.1	7.1	8.7	7.4	
R (см) сзади	3.5	3.1	2.5	2.1	4.1	2.2	9.1	6.1	4.1	7.2	8.6	

В таблице (Ошибка! Источник ссылки не найден.) приведены рассчитанные без учета трения значения максимального вертикального наката на фронтальной и задней сторонах острова в сравнении с экспериментом и с рассчитанными с помощью метода конечных элементов (также без учета трения) значениями из работы (Takagi, 1996).

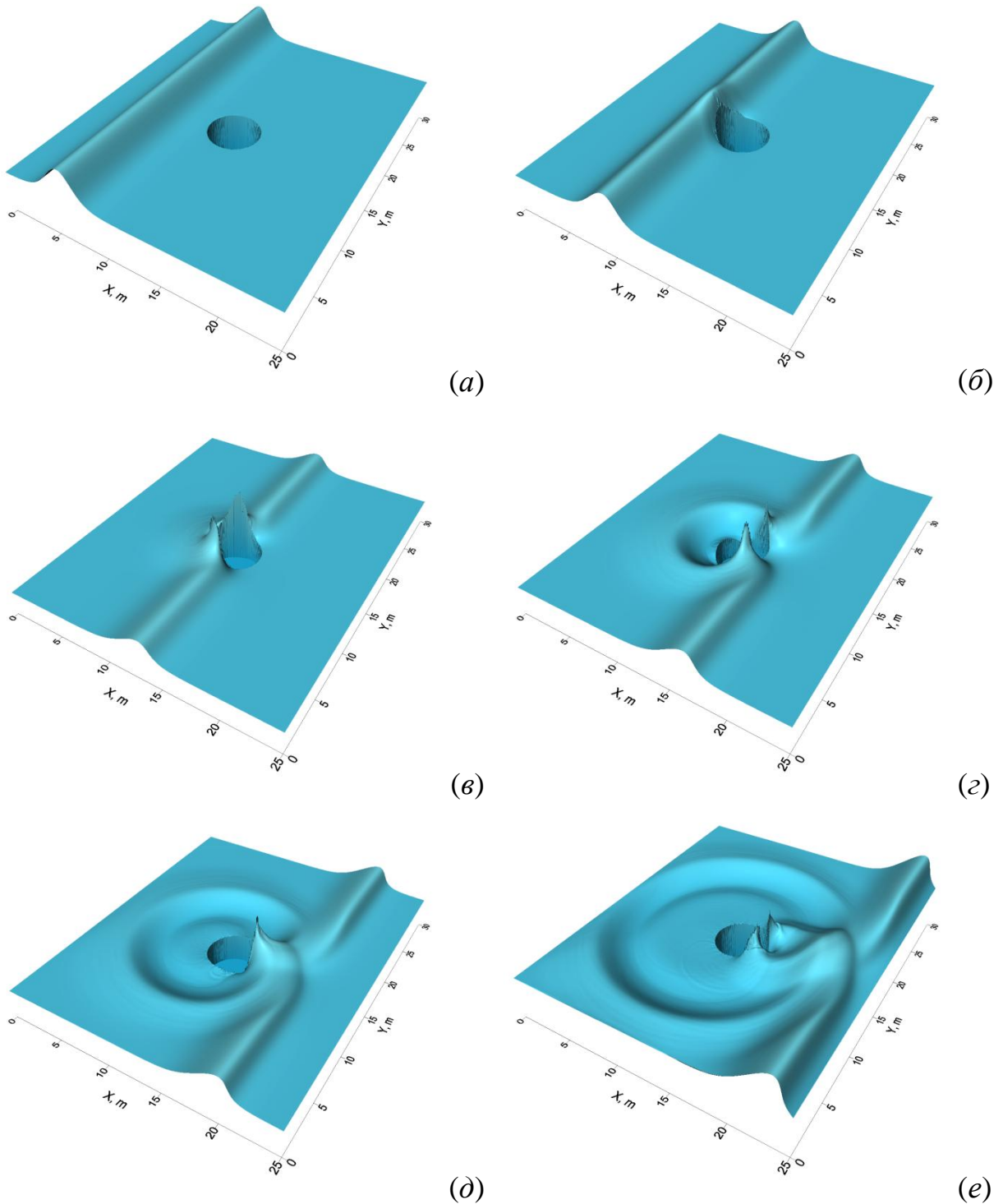


Рис. 9. Последовательные во времени состояния свободной поверхности при взаимодействии уединенной волны с коническим островом.

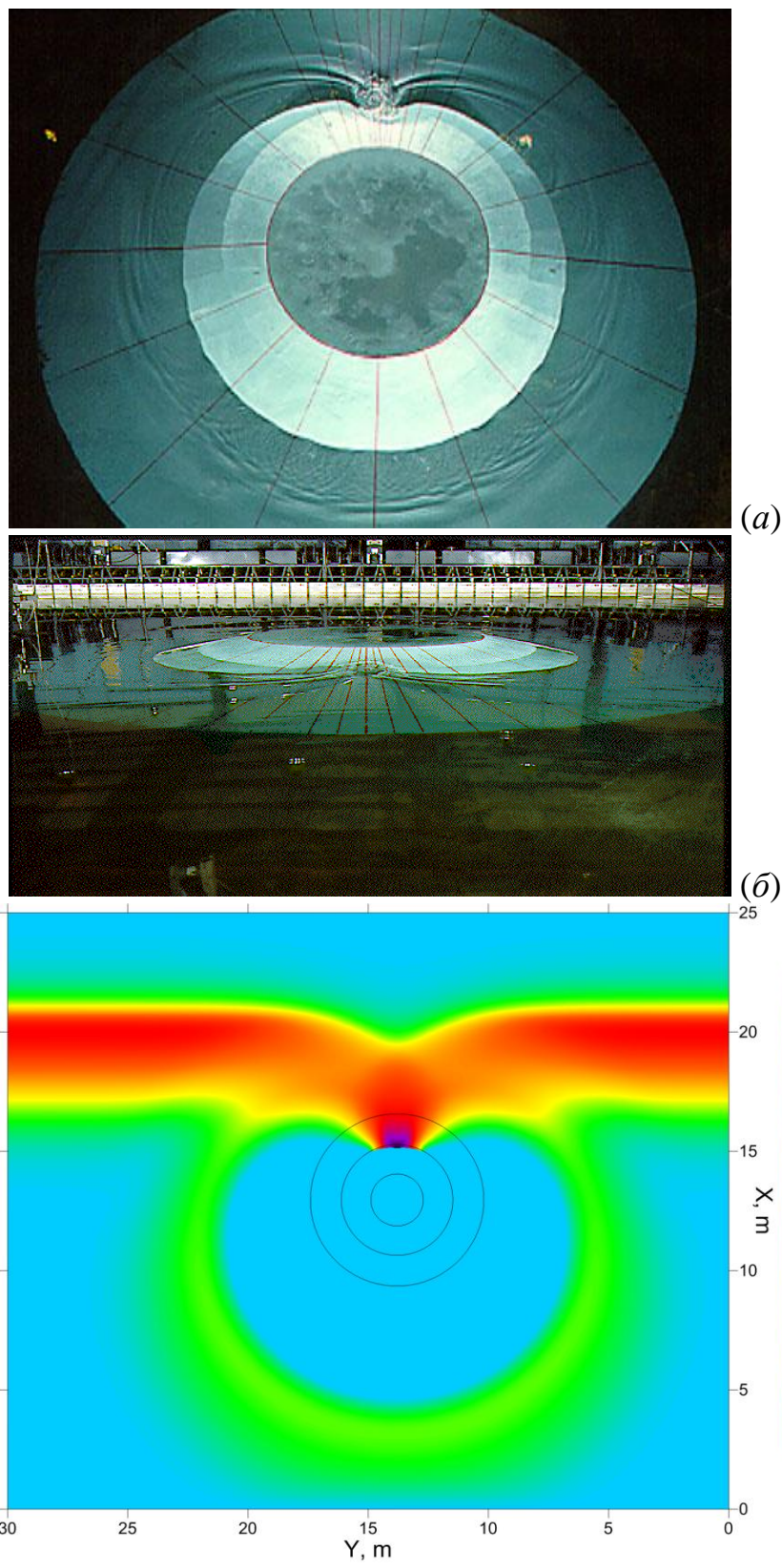


Рис. 10. Взаимодействие уединенной волны (солитона) с коническим островом в момент времени, совпадающий с моментом фиксации состояния свободной поверхности на предыдущем рисунке (Рис. 9, δ): (a) – лабораторный эксперимент (вид сверху) – <http://chl.erdc.usace.army.mil/chl.aspx?p=s&a=Projects;35> – волна приближается к острову «снизу»; (б) – то же (вид с тыльной стороны); (в) – результат вычислительного эксперимента в близкий момент времени.

Анализ высот заплеска вдоль периметра конического острова (Рис. 11), рассчитанных в ходе тестовых испытаний для различных значений параметра шероховатости (k_f), подтвердил ранее обнаруженную тенденцию к образованию теневой («безопасной») зоны на северо-востоке побережья острова и значительный рост высоты заплеска в северной части побережья.

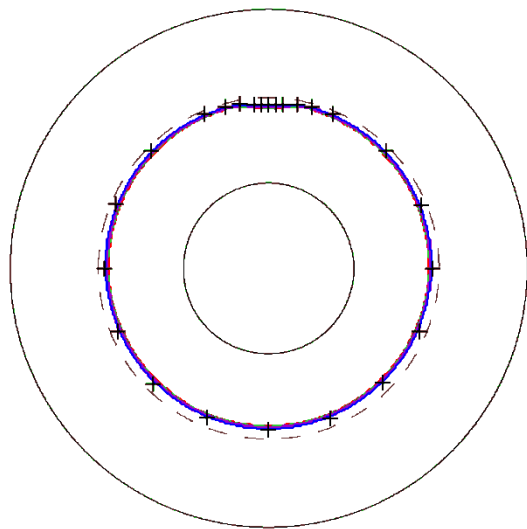
Приведенные на рисунке результаты явно демонстрируют нелинейность изучаемого процесса. Это проявляется в том, что если при малой амплитуде падающей волны (эксперимент *A*) удастся подобрать параметр шероховатости (коэффициент Шези), при котором результаты численного моделирования вплотную приближаются к экспериментальным данным вдоль всего периметра конического острова, то при увеличении амплитуды (эксперимент *B*) падающей волны такого единого параметра подобрать не удастся. В этом случае экспериментальные данные о заплеске в тыльной (теневой) зоне острова хорошо воспроизводятся при нулевом значении коэффициента Шези, а в остальных частях – при его значении, равном 0.004. Следует отметить также, что с увеличением амплитуды падающей волны возрастает различие между результатами, полученными с различными коэффициентами трения.

Сравнение полученных численных результатов показывает, что несмотря на допущенное упрощение при задании исходного возмущения математическая модель и построенный на ее основе вычислительный алгоритм вполне адекватно воспроизводят процесс взаимодействия уединенной волны с препятствием в виде конического острова. Результаты также демонстрируют сходимость к экспериментальным данным при адекватном подборе свойств (шероховатость) заливаемой суши.

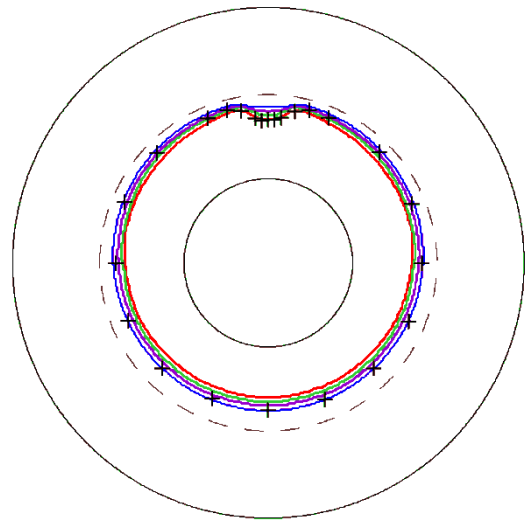
Сопоставляя мареограммы, рассчитанные в точках установки «контрольных» датчиков для эксперимента *A* методом крупных частиц, с записанными в этих же точках экспериментальными данными (Рис. 12), можно отметить хорошее совпадение в головной части записей и несколько упрощенное воспроизведение последующих осцилляций.

Представленные в настоящем разделе отчета материалы тестовых испытаний модели и алгоритма позволяют рассматривать созданный вычислительный инструментарий вполне пригодным для моделирования волн цунами в целом – от генерации вплоть до заплеска на берег.

Эти же результаты, однако, указывают, что для получения результатов с точностью, обеспечивающей приемлемое качество прогнозной оценки характеристик взаимодействия волн цунами с побережьем, необходимо обладать детальной цифровой информацией (с шагом оцифровки порядка 15 м) о батиметрии акваторий, прилегающих к защищаемым участкам побережья и характеристикам рельефа суши (растительность, параметры земной поверхности, наличие строений и их характеристики и т.п.).



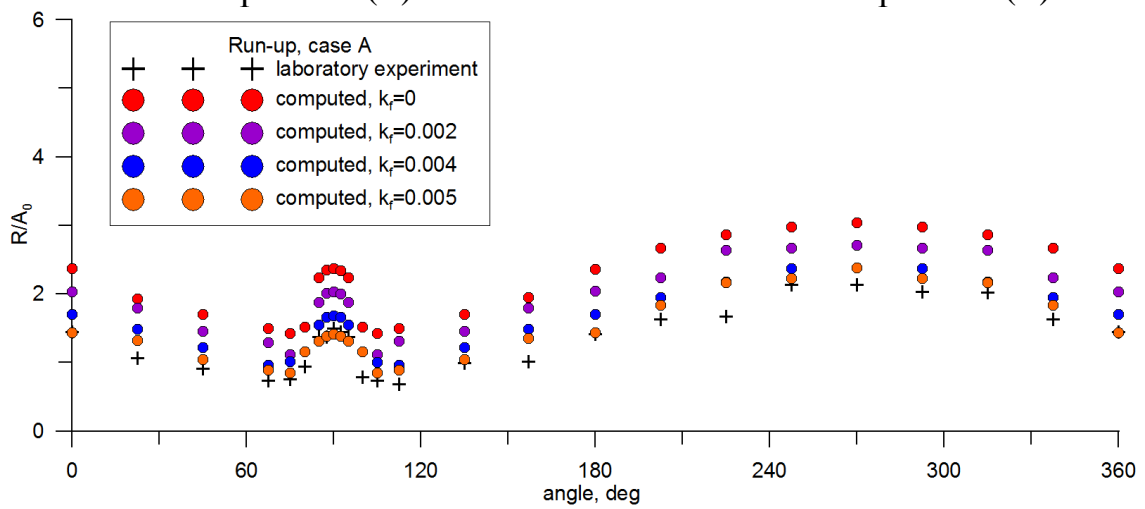
(a)



(б)

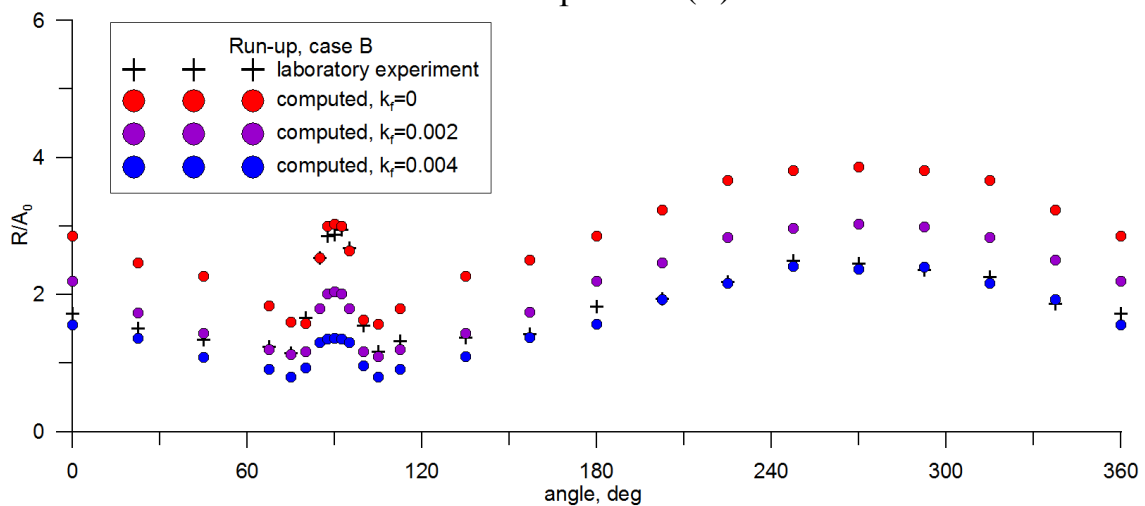
Эксперимент (A)

Эксперимент (B)



(в)

Эксперимент (A)



(г)

Эксперимент (B)

Рис. 11. Верхняя часть рисунка представляет сопоставление рассчитанных для различных значений коэффициента шероховатости границ заплеска уединенной волны на конический остров (цветные линии) с экспериментальными данными (крестики) – эксперименты A и B. Нижняя часть рисунка представляет распределение высот заплеска по периметру острова для экспериментов A и B. Цвета линий и маркеров одинаковым образом соответствуют различным значениям коэффициента шероховатости.

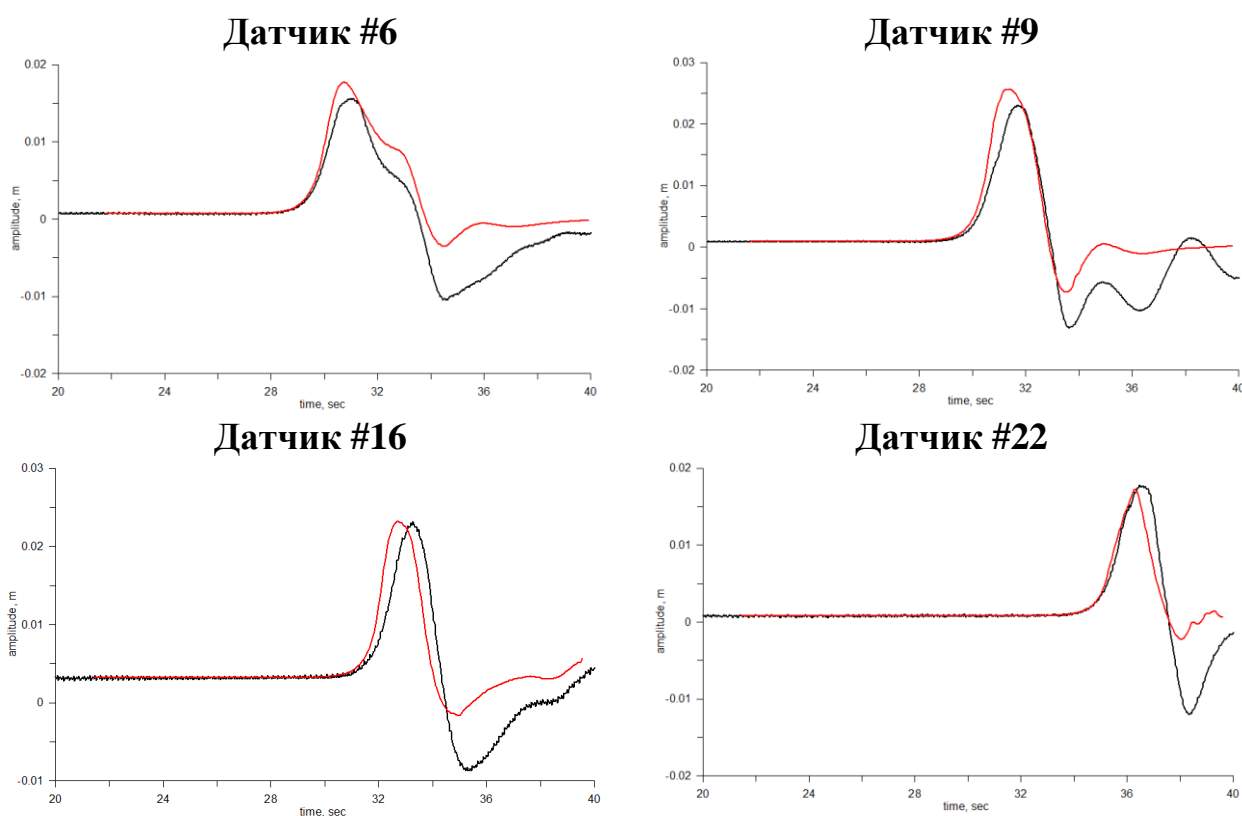


Рис. 12. Сравнение мареграмм, рассчитанных в точках размещения «контрольных» датчиков (красные линии), с экспериментальными данными (черные линии).

7 Постановка задачи моделирования наката волны цунами на защищаемое побережье

В отчетный период, согласно Техническому заданию, исполнителями были проведены предварительные расчеты наката волн цунами на три защищаемых пункта: бухта Малокурильская, г. Северо-Курильск и г. Усть-Камчатск. Для каждого из этих пунктов были построены детальные цифровые массивы топографии и батиметрии в соответствующих им малых областях. Источником информации для такого построения послужили: топография – массив SRTM-3sec (SRTM version 2.1, http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/), батиметрия – оцифрованные исполнителями изображения прилегающих к «защищаемым» участкам побережья акваторий, полученные из набора батиметрических карт С-МАР ООО «Компания «Век Камчатка Плюс» М-AN-C013.12 Kamchatka peninsula and Kuril islands, а также изображения, предоставленные заказчиком. В качестве рельефа в глобальной области использовался цифровой массив GEBCO-30sec.

Параметры вычислительных экспериментов, включающие границы соответствующих глобальных и малых областей, время начала и окончания расчетов, приведены ниже в таблице (Таблица 6). Пространственные шаги грубой сетки во всех трех случаях составляли 10 угловых секунд, шаги мелкой – 1 угловая секунда (около 30 метров).

В качестве модельных источников были рассмотрены гипотетические сейсмические очаги с магнитудой $M_w = 8.4$ из рассмотренных на предыдущих

этапах работ наборов. Порожденные этими очагами волны цунами предыдущие имели ощутимые максимальные высоты вблизи защищаемых пунктов. Соответствующие параметры приведены в следующей таблице (Таблица 7).

Таблица 6. Параметры расчетных областей для моделирования распространения волн цунами и их наката на побережье

Защищаемый пункт	Границы глобальной области, град.	Границы малой подобласти, град.	Время начала расчета распространения, мин.	Время начала расчета наката, мин.	Время окончания расчета распространения, мин.	Время окончания расчета наката, мин.
<i>б. Малокурльская</i>	146.0–150.5° E 42.0–45.5° N	146.7778– 146.8417° E 43.8417– 43.9167° N	0	4	120	120
<i>г. Северо-Курильск</i>	153.8–158.8° E 47.0–52.0° N	156.1– 156.3° E 50.6– 50.725° N	0	0	120	120
<i>г. Усть-Камчатск</i>	161.0–165.5° E 53.0–57.0° N	1662.45– 162.65° E 56.15– 56.25° N	0	0	120	80

Таблица 7. Список параметров модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 8.4$, использовавшихся для предварительных расчетов наката на «защищаемые» участки побережья

Защищаемый пункт	ID	Эпицентр, град.	L, км.	W, км.	DE, град.	LA, град.	TE, град.	D0, м.	H_top, км.
<i>б. Малокурльская</i>	8.4-3b	148.01° E 44.8° N	215	75	15	90	54	5.5	25
<i>г. Северо-Курильск</i>	8.4-7b	156.75° E 50.98° N	215	75	15	90	38	5.5	25
<i>г. Усть-Камчатск</i>	8.4-10a	163.33° E 55.63° N	215	75	15	90	33	6.1	5

Взаимное расположение глобальных областей, малых областей, а также начальных смещений водной поверхности иллюстрируется рисунками (Рис. 13 – Рис. 15). Рельефы топографии и батиметрии малых областей, в которых выполнялось моделирование наката волн цунами, представлены на рисунках (Рис. 16 – Рис. 18).

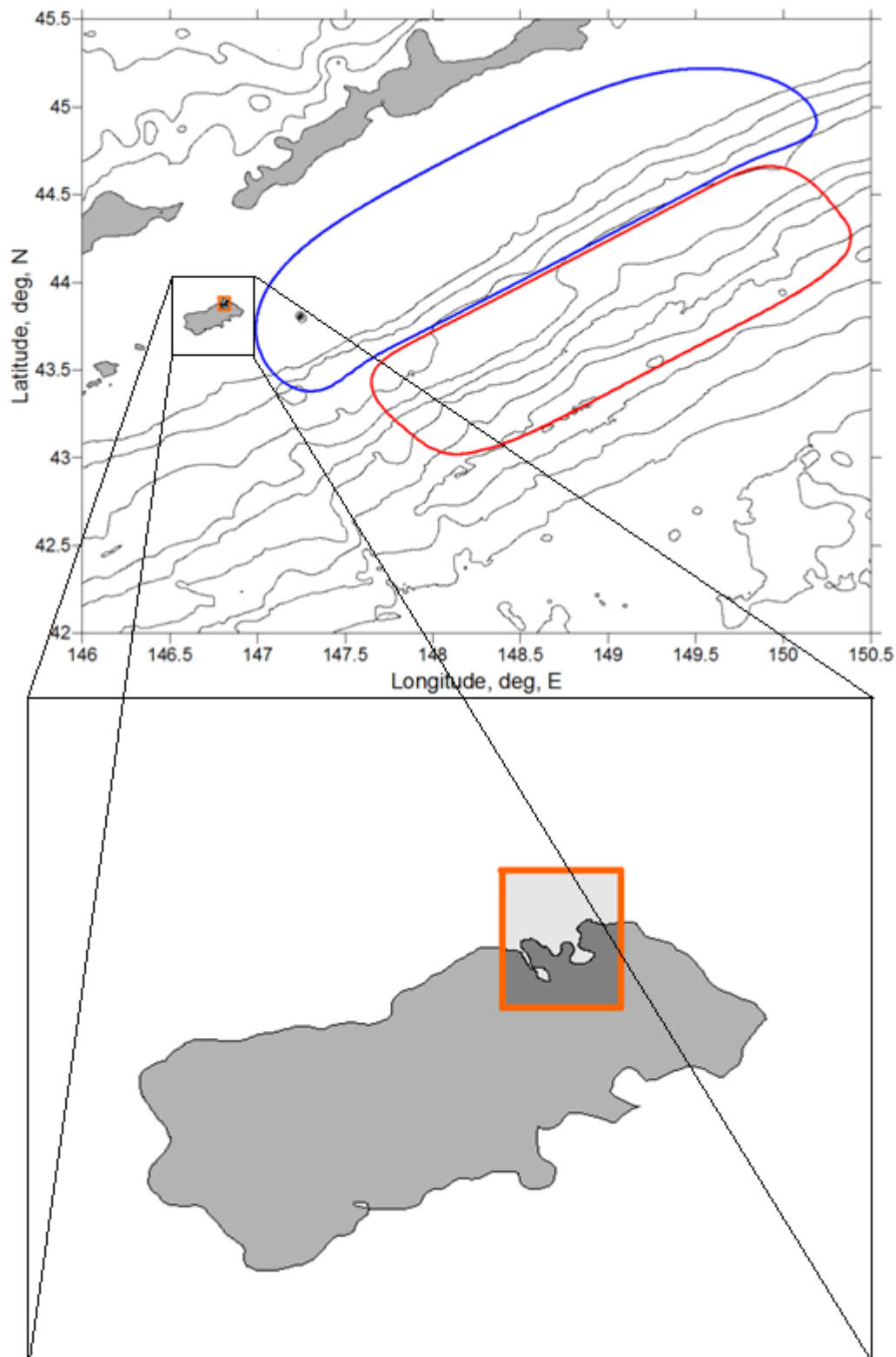


Рис. 13. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье бухты Малокурильская волны цунами, порожденной модельным землетрясением с магнитудой $M_w=8.4$: верхняя часть рисунка – расчетная область для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, основные изобаты проведены через каждые 1000 м; красной и синей линиями отрисованы контуры изолиний начального возвышения уровней 10 см и – 10 см соответственно, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

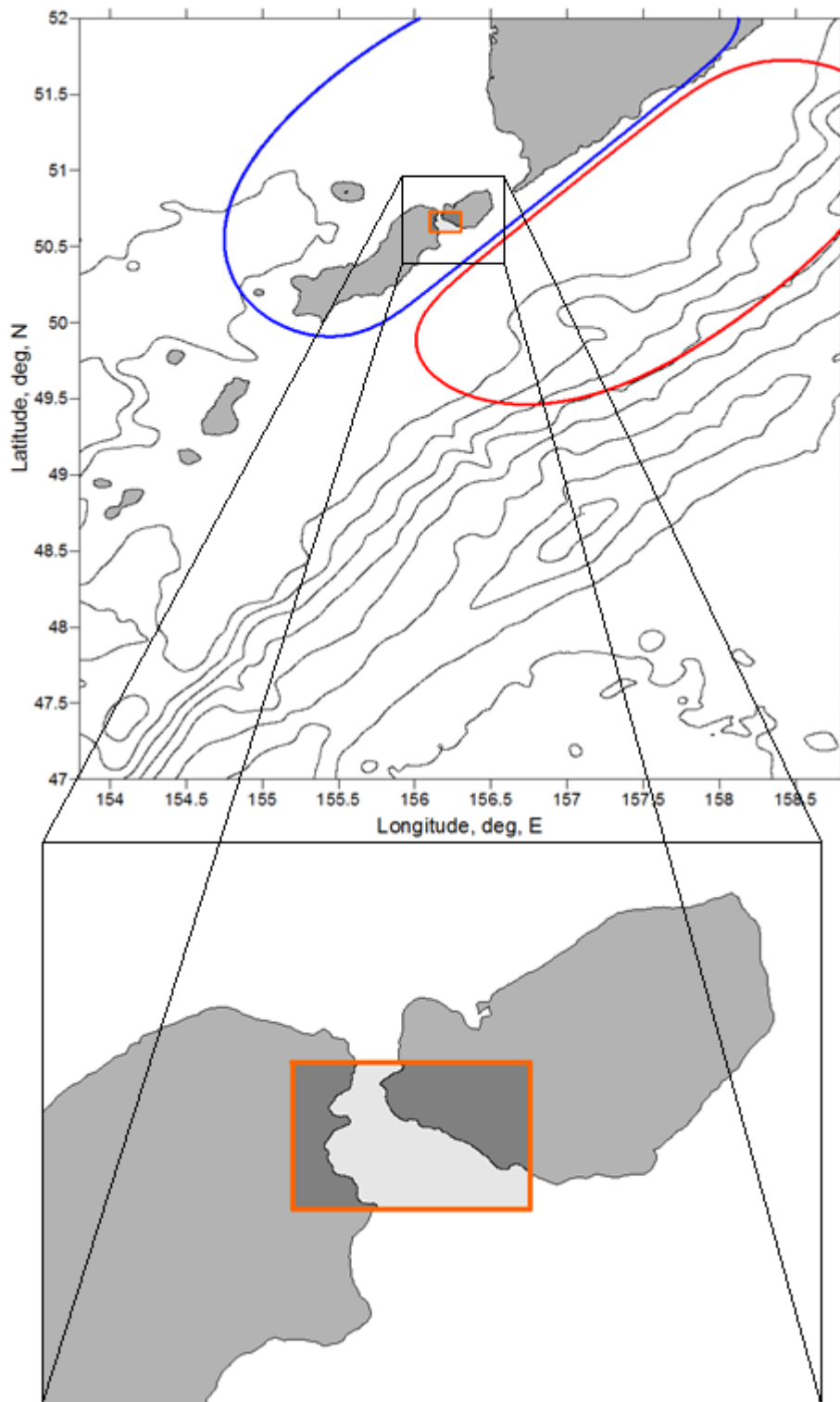


Рис. 14. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к г. Северо-Курильску, волны цунами, порожденной модельным землетрясением с магнитудой $M_w=8.4$: верхняя часть рисунка – расчетная область для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, основные изобаты проведены через каждые 1000 м; красной и синей линиями отрисованы контуры изолиний начального возвышения уровней 10 см и – 10 см соответственно, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

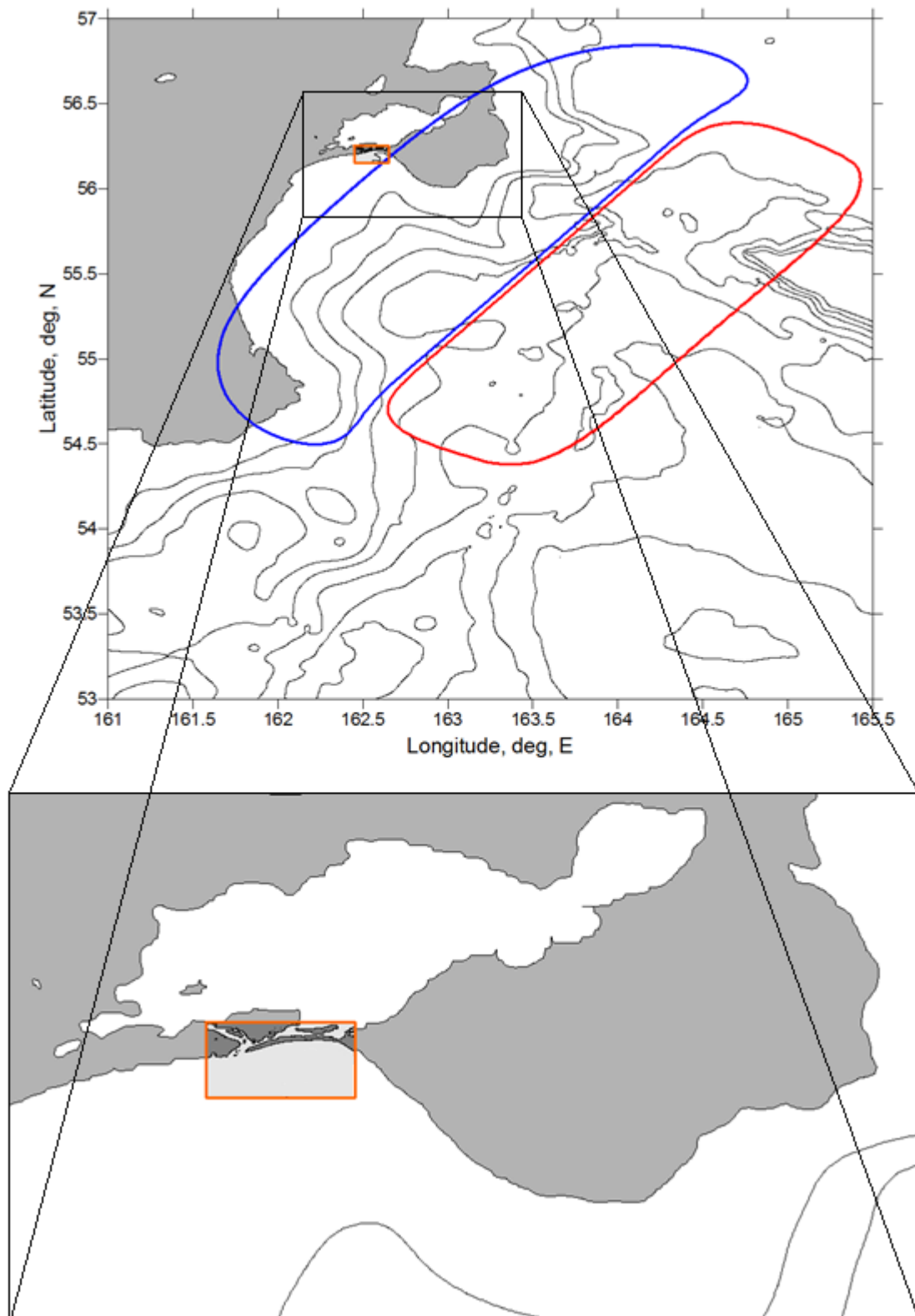


Рис. 15. Схема акватории для моделирования воздействия на побережье, прилегающее к г. Усть-Камчатску, волны цунами, порожденной модельным землетрясением с магнитудой $M_w=8.4$: верхняя часть рисунка – расчетная область для моделирования распространения волны от источника возмущения к побережью, основные изобаты проведены через каждые 1000 м; красной и синей линиями отрисованы контуры изолиний начального возвышения уровней 10 см и – 10 см соответственно, оранжевым прямоугольником выделена область для расчета наката волны цунами.

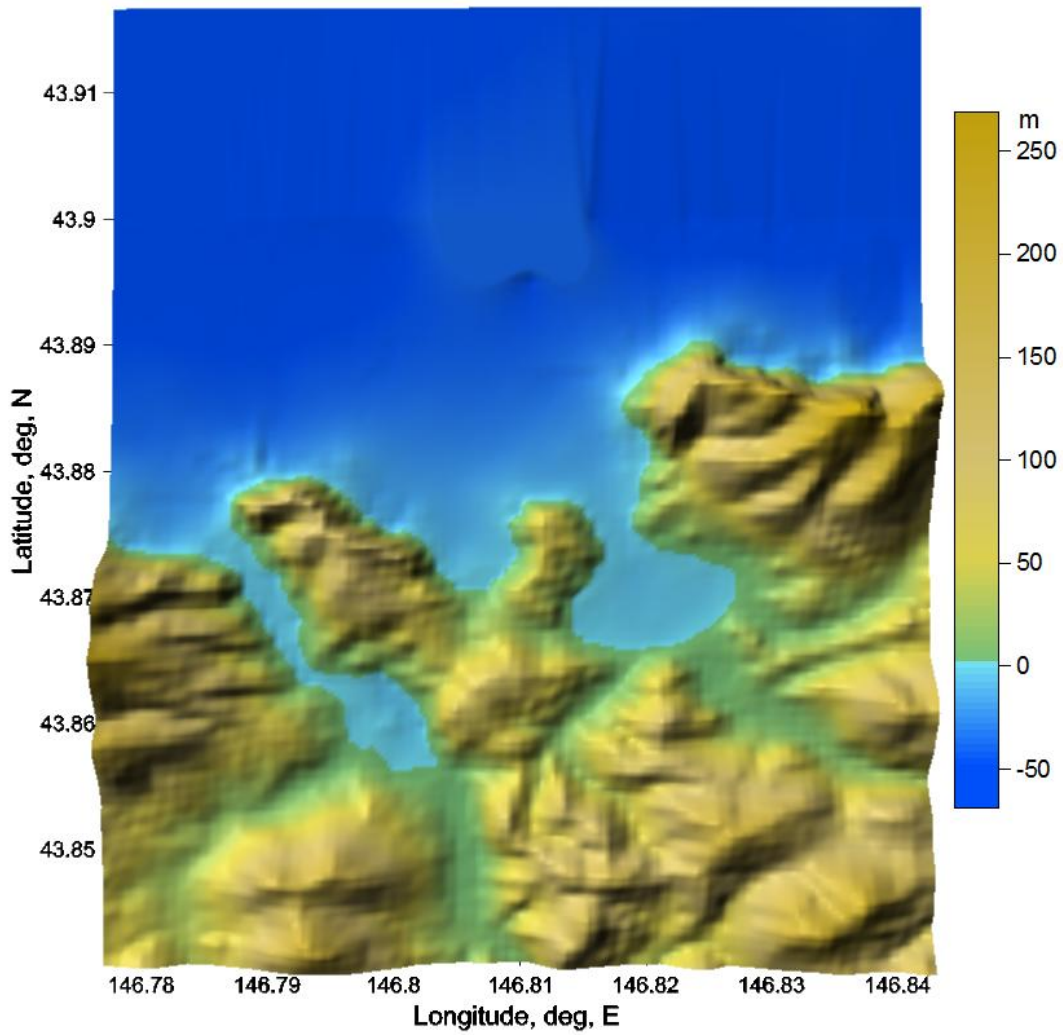


Рис. 16. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье бухты Малокурильская волны цунами.

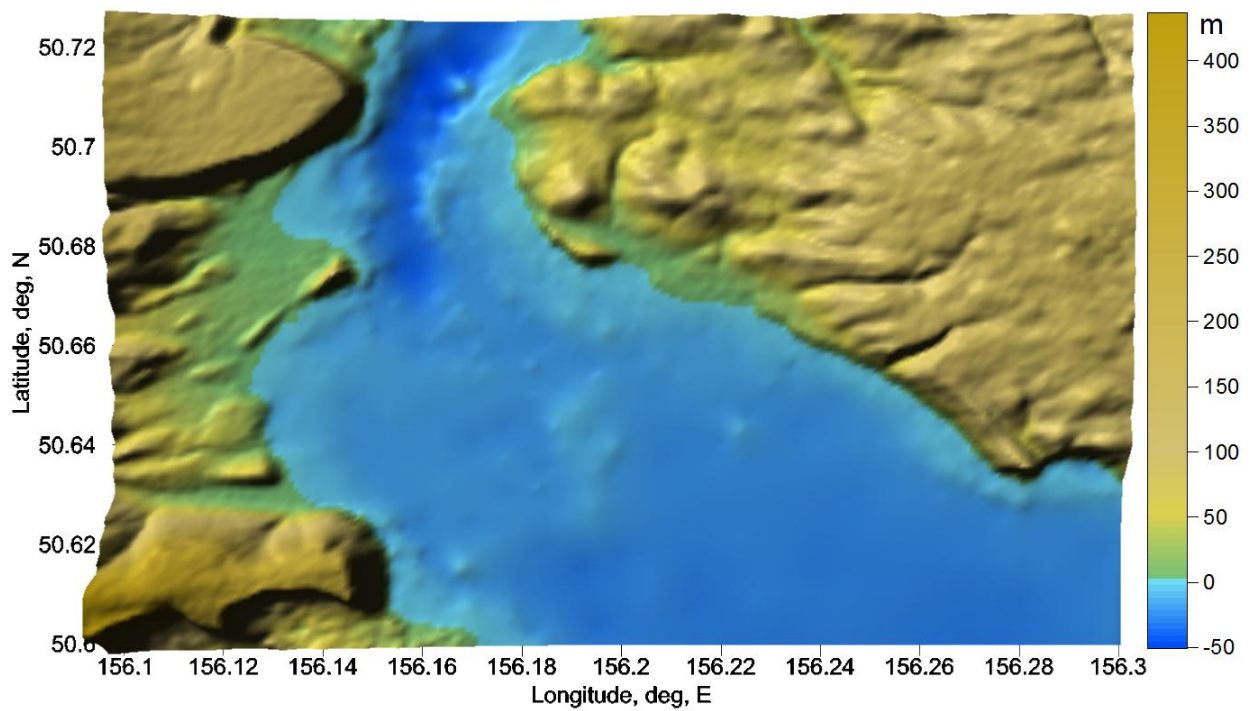


Рис. 17. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи г. Северо-Курильска

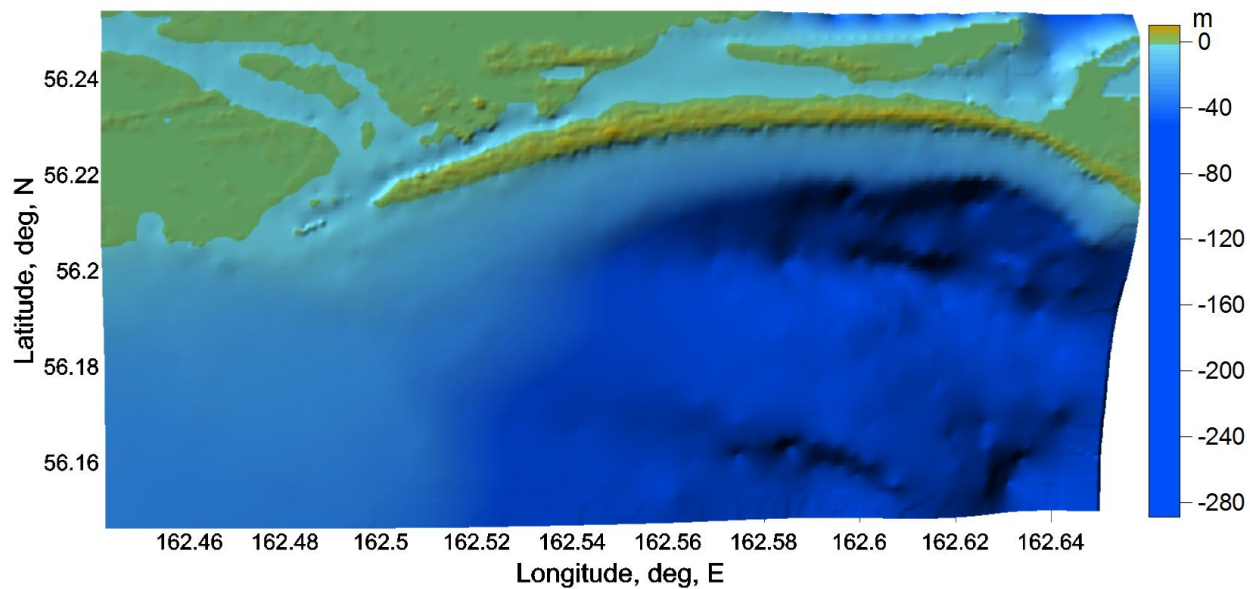


Рис. 18. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье
вблизи г. Усть-Камчатска

8 Результаты моделирования

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных уровней свободной поверхности («малая» область)

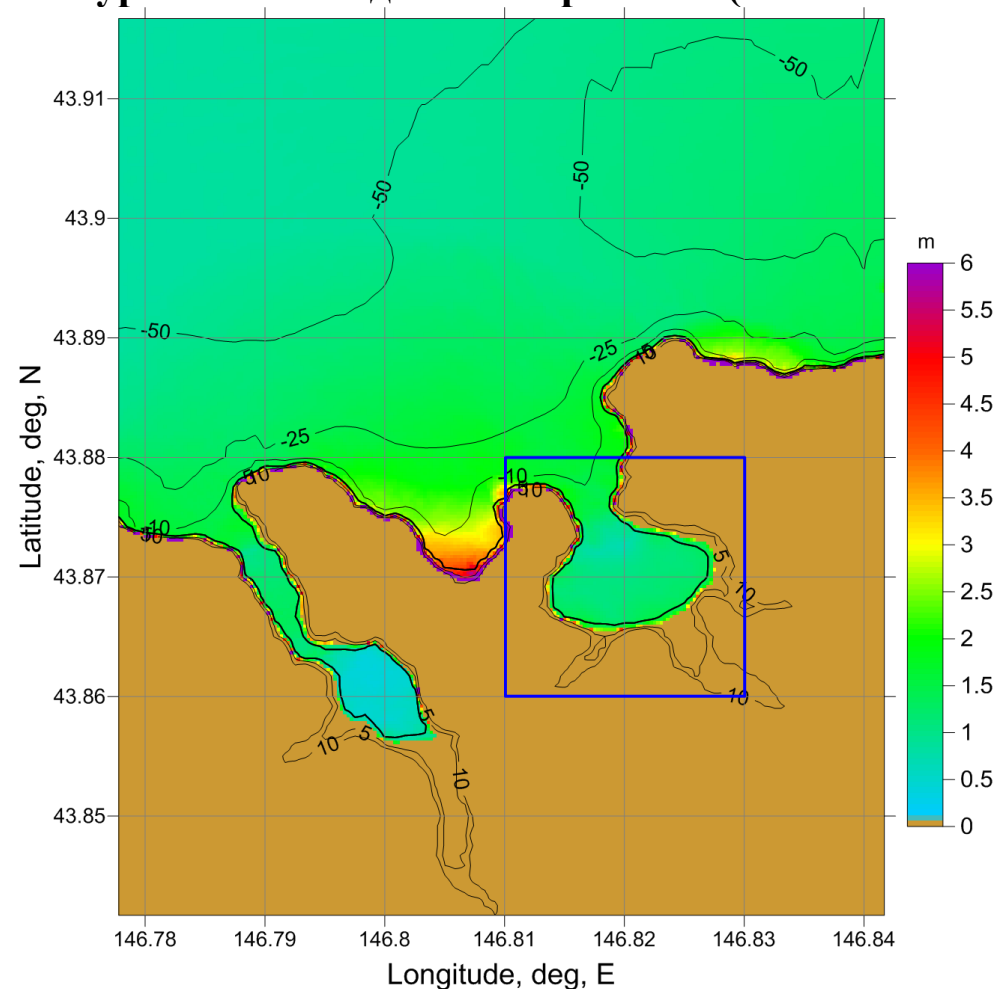


Рис. 19. Распределение максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность бухты Малокурильская, представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных уровней свободной поверхности (фрагмент «малой» области)

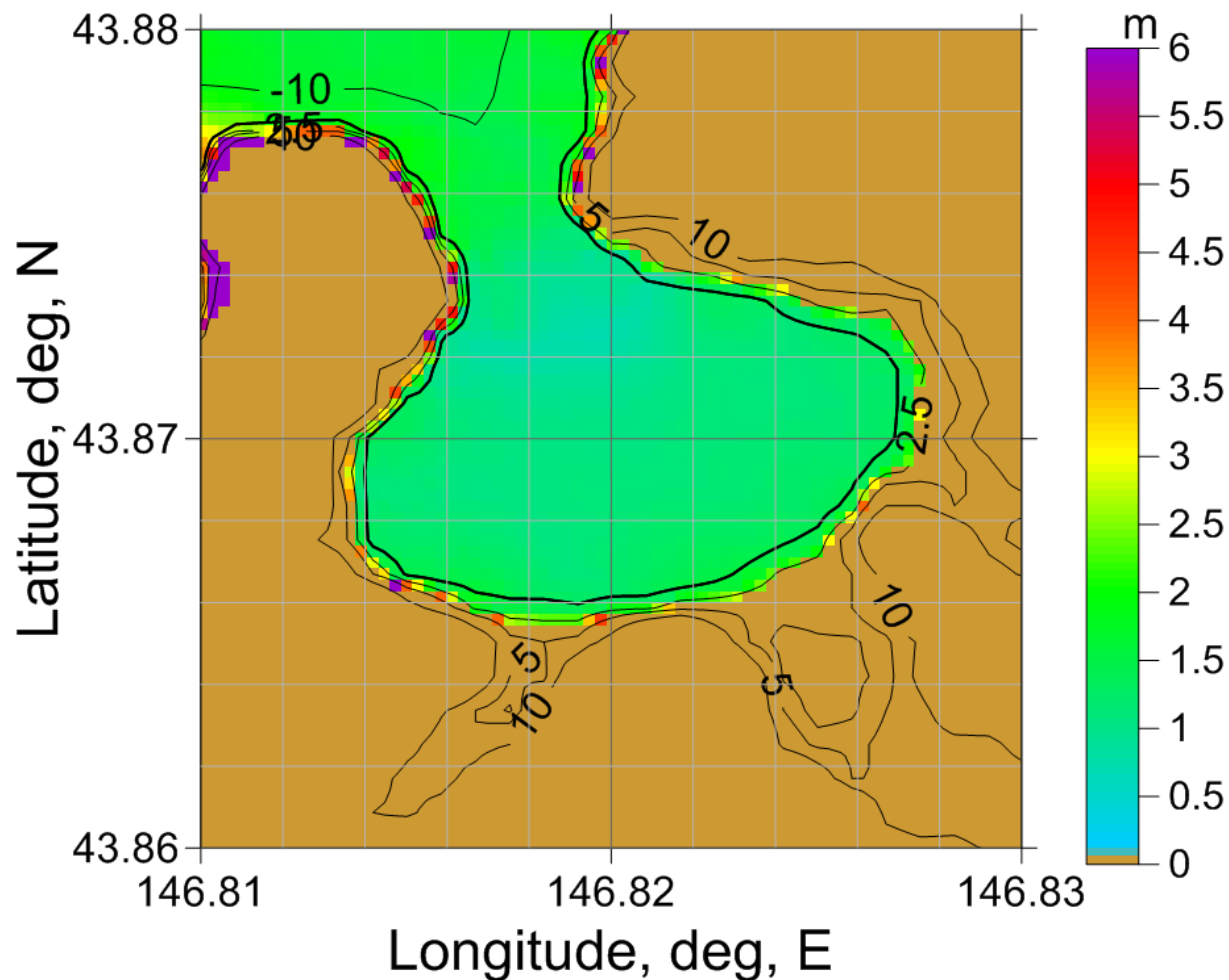


Рис. 20. Фрагмент распределения максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных ГЛУБИН затопления («малая» область)

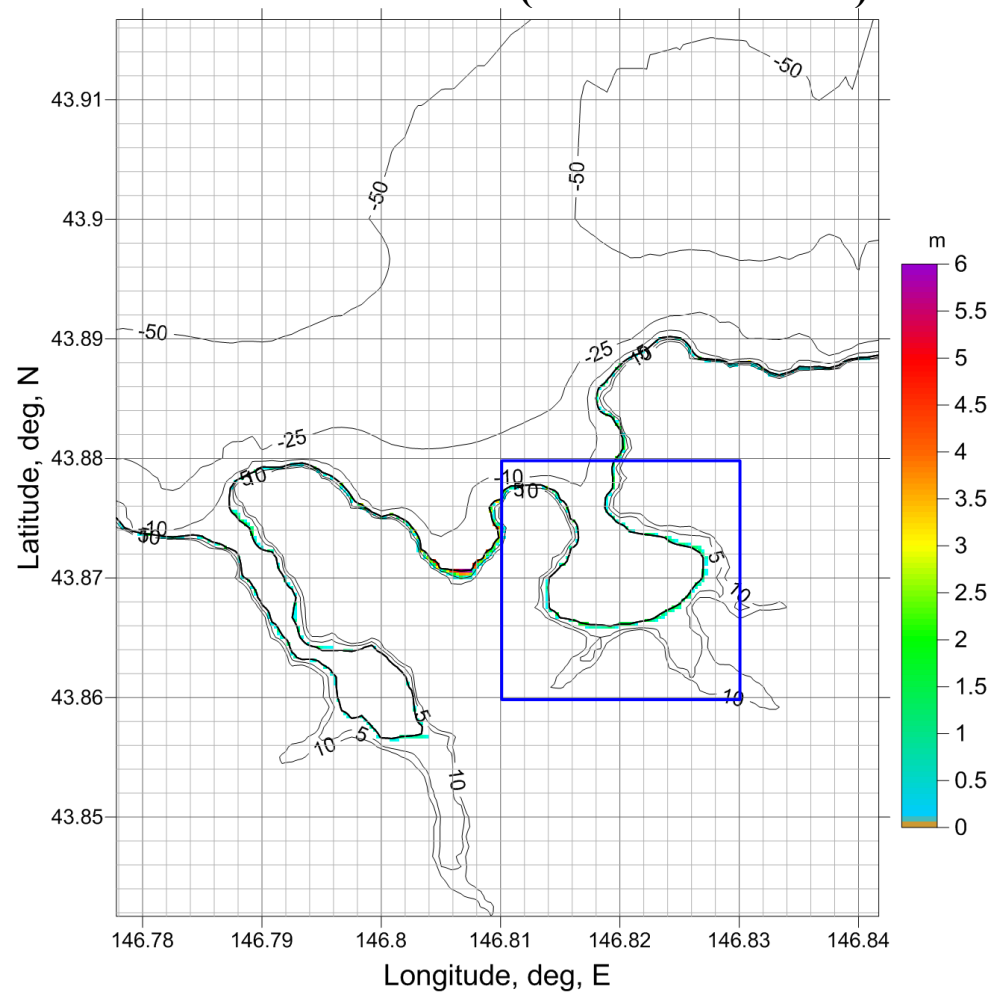


Рис. 21. Распределение максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность бухты Малокурильская, представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных ГЛУБИН затопления (фрагмент «малой» области)

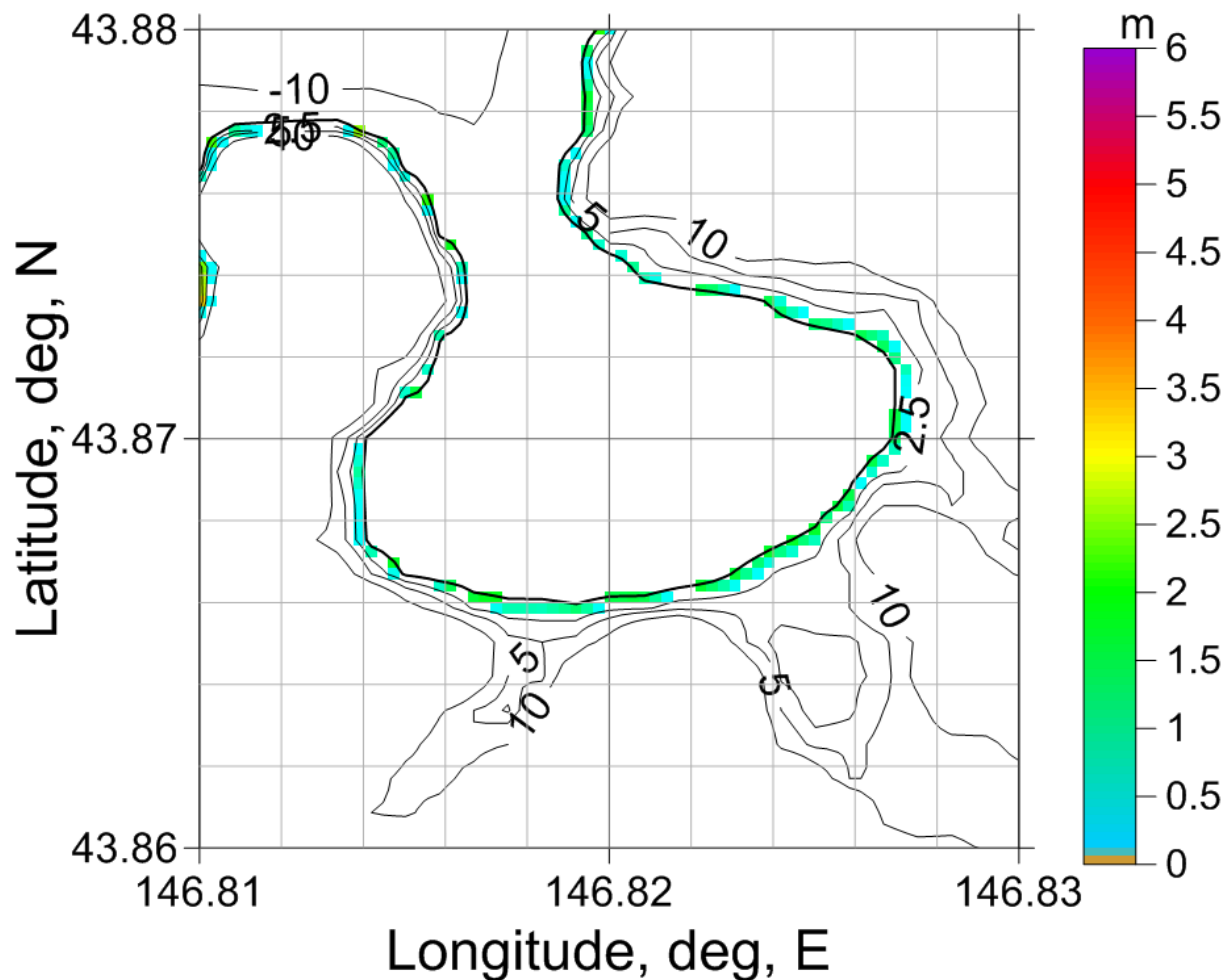


Рис. 22. Фрагмент распределение максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления («малая» область)

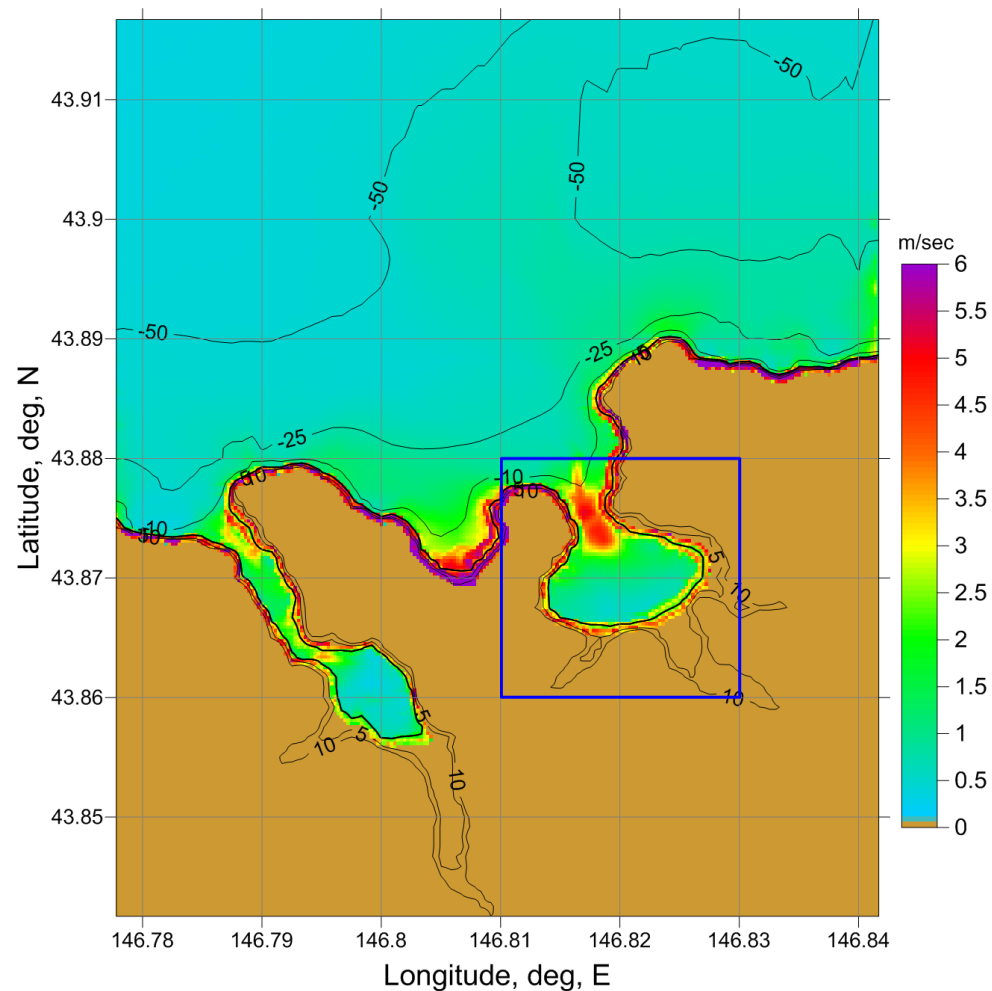


Рис. 23. Распределение максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность бухты Малокурильская, представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления
(фрагмент «малой» области)

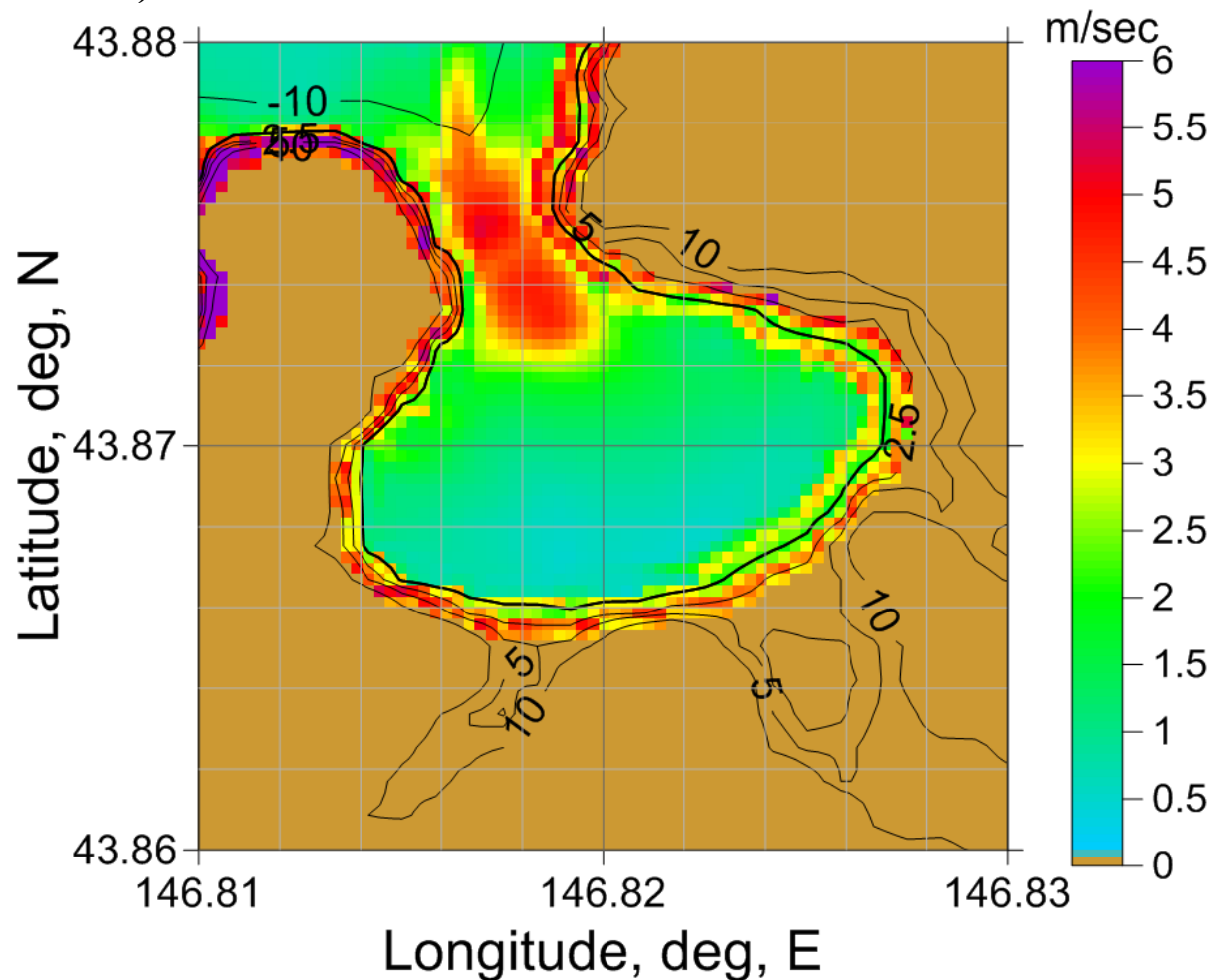


Рис. 24. Фрагмент распределения максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, -50 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район бухты Малокурильская

Поля скоростей течения в ключевые моменты развития процесса («малая» область)

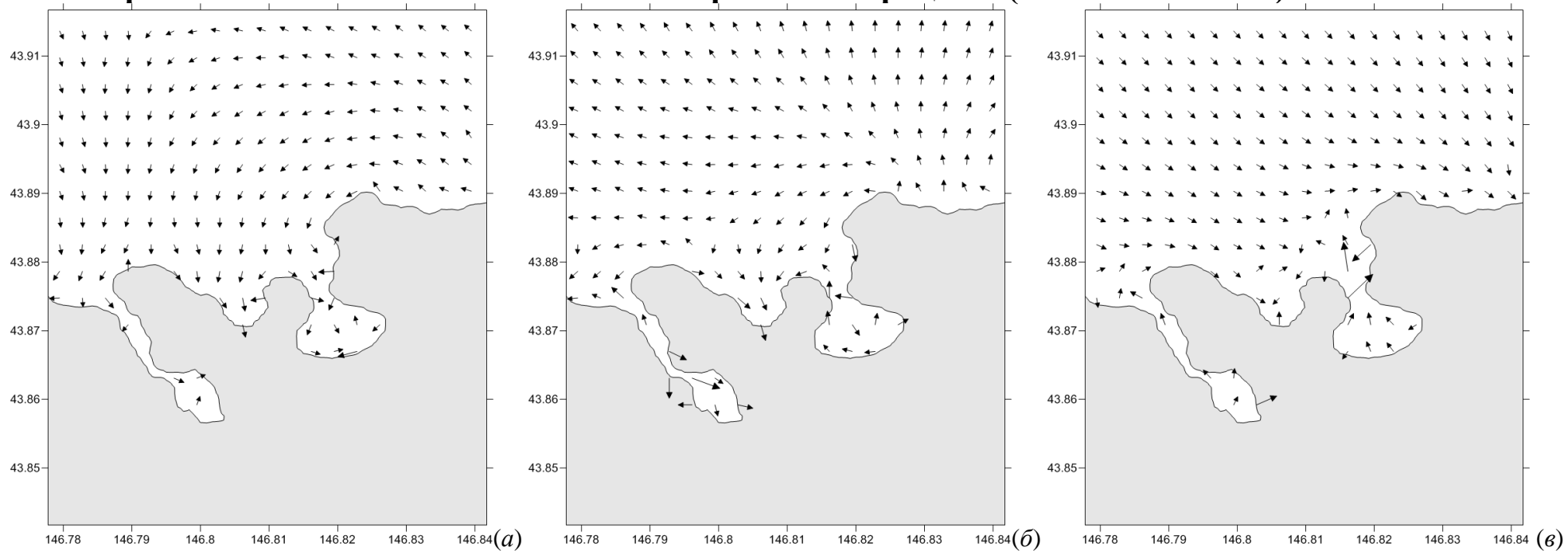


Рис. 25. Поля скоростей течения в окрестности бухты Малокурильская в моменты начала затопления (а), его наиболее интенсивной фазы (б) и отката волны цунами (в).

Район бухты Малокурильская

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth

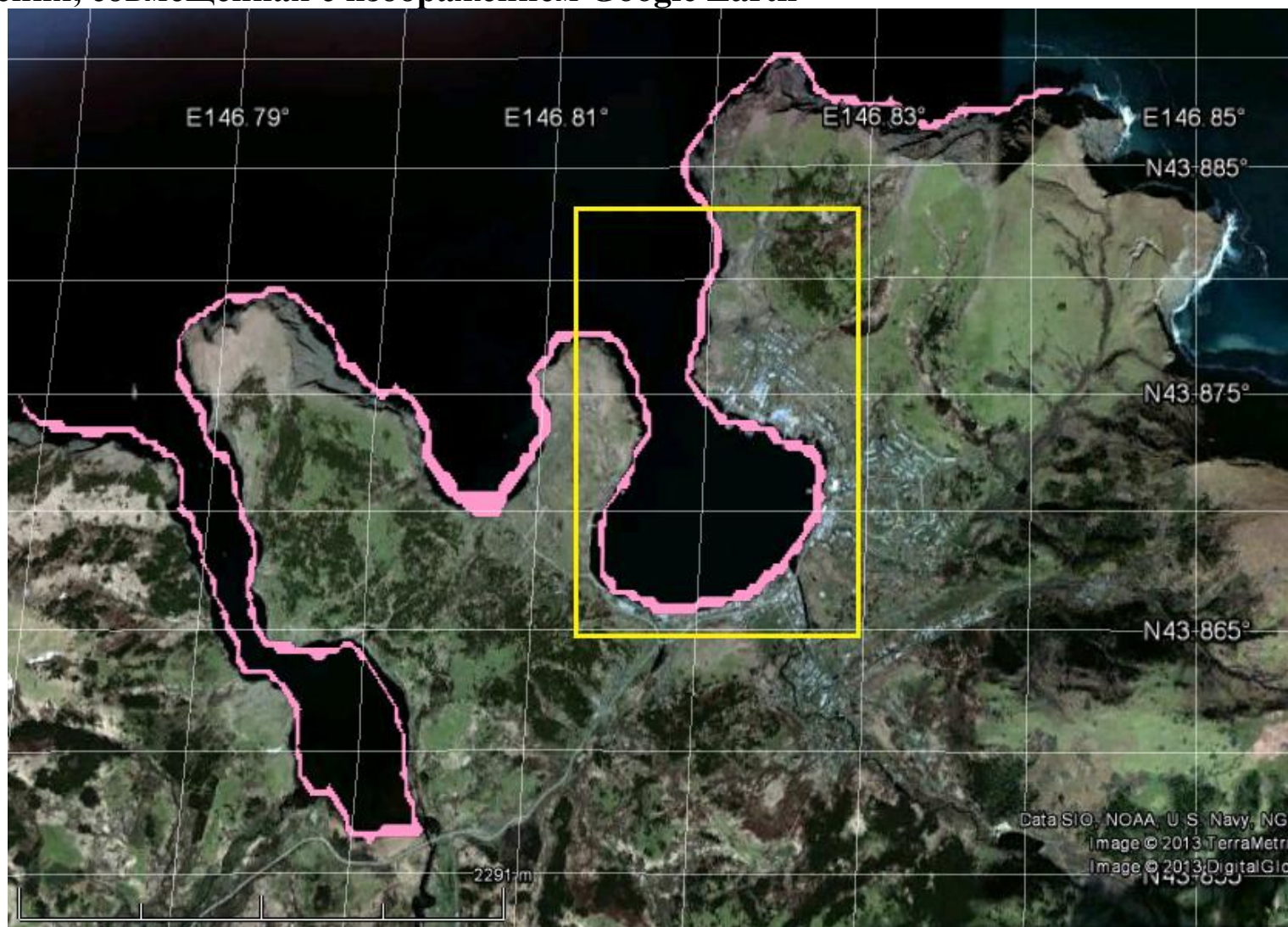


Рис. 26. Зона затопления в окрестности бухты Малокурильская, совмещенная с изображением Google Earth. Желтым прямоугольником выделена окрестность бухты Малокурильская, представленная ниже для детального анализа.

Район бухты Малокурильская

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth (фрагмент изображения)



Рис. 27. Фрагмент зоны затопления в окрестности бухты Малокурильская, показанной на рис. 26, совмещенный с изображением Google Earth.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных уровней свободной поверхности («малая» область)

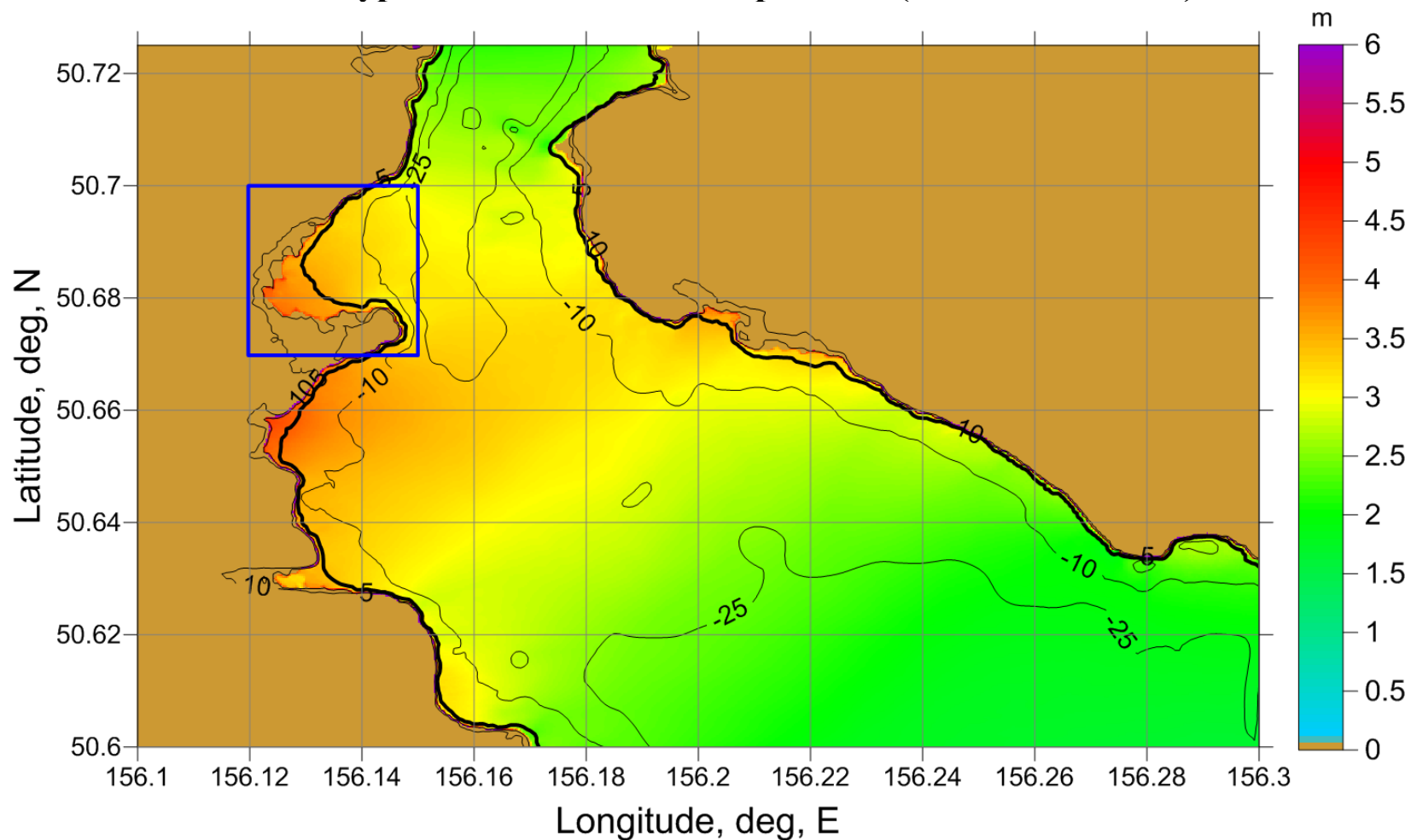


Рис. 28. Распределение максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Северо-Курильск», представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных уровней свободной поверхности (фрагмент «малой» области)

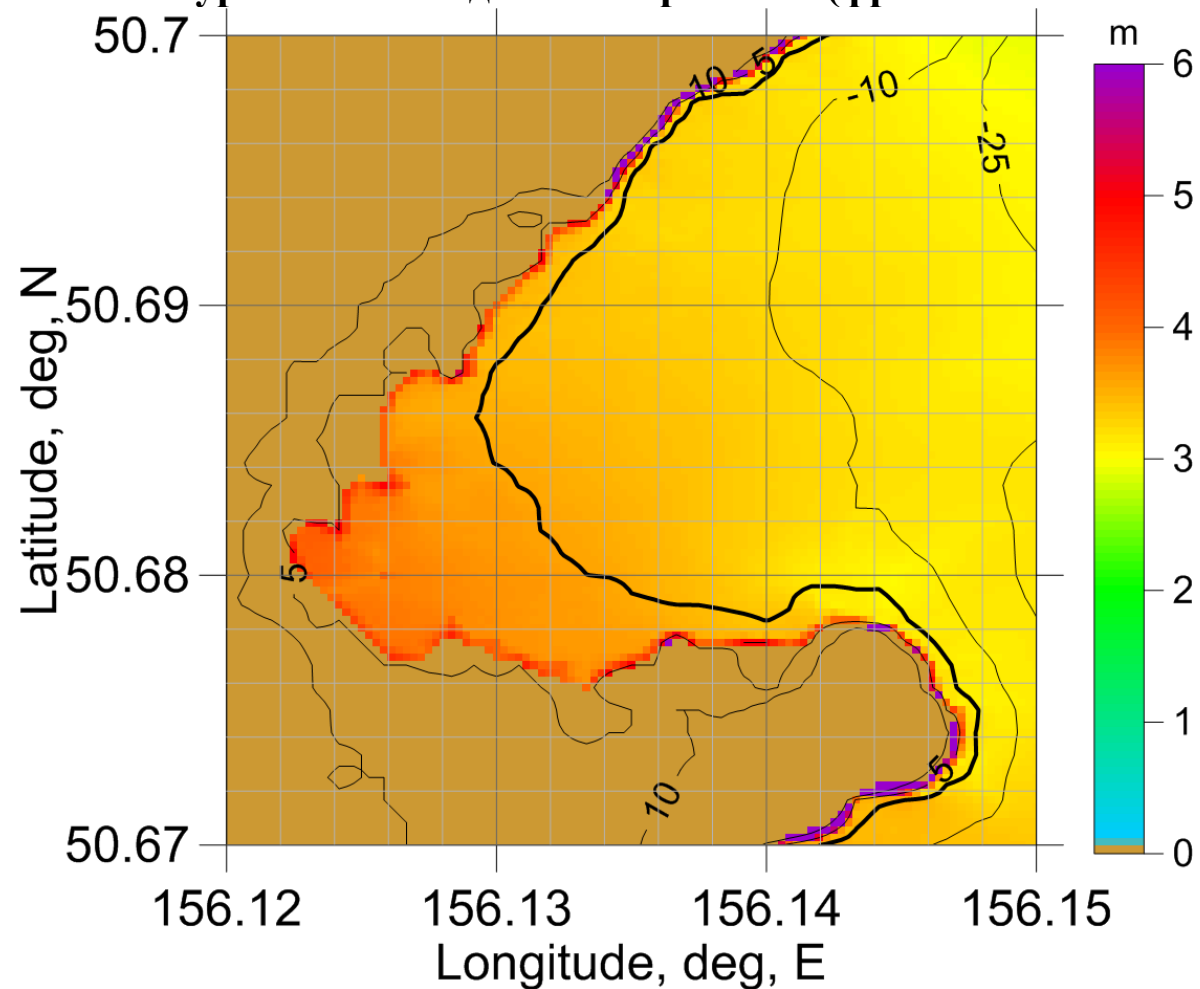


Рис. 29. Фрагмент распределения максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных ГЛУБИН затопления («малая» область)

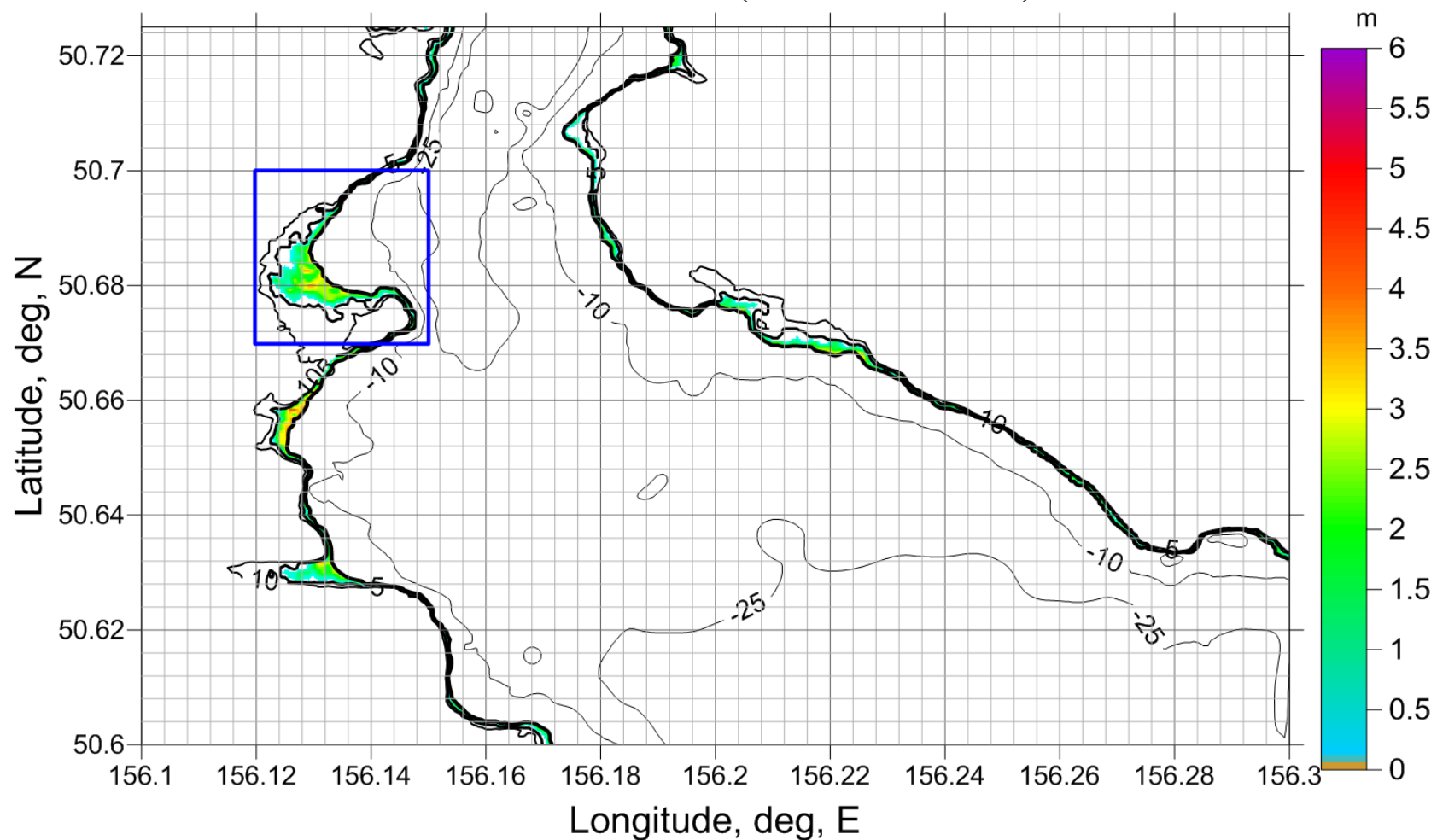


Рис. 30. Распределение максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Северо-Курильск», представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных ГЛУБИИ затопления (фрагмент «малой» области)

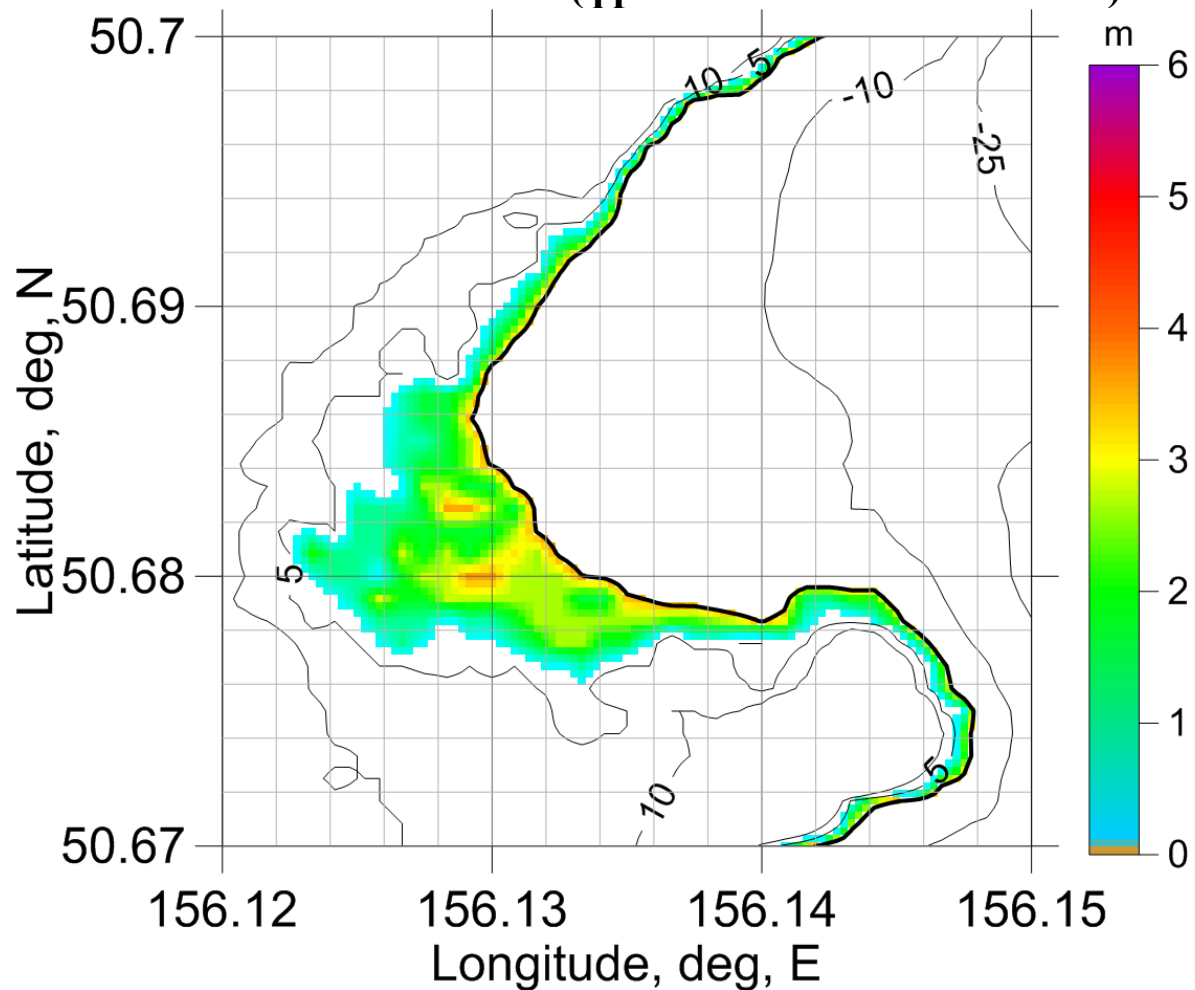


Рис. 31. Фрагмент распределения максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления («малая» область)

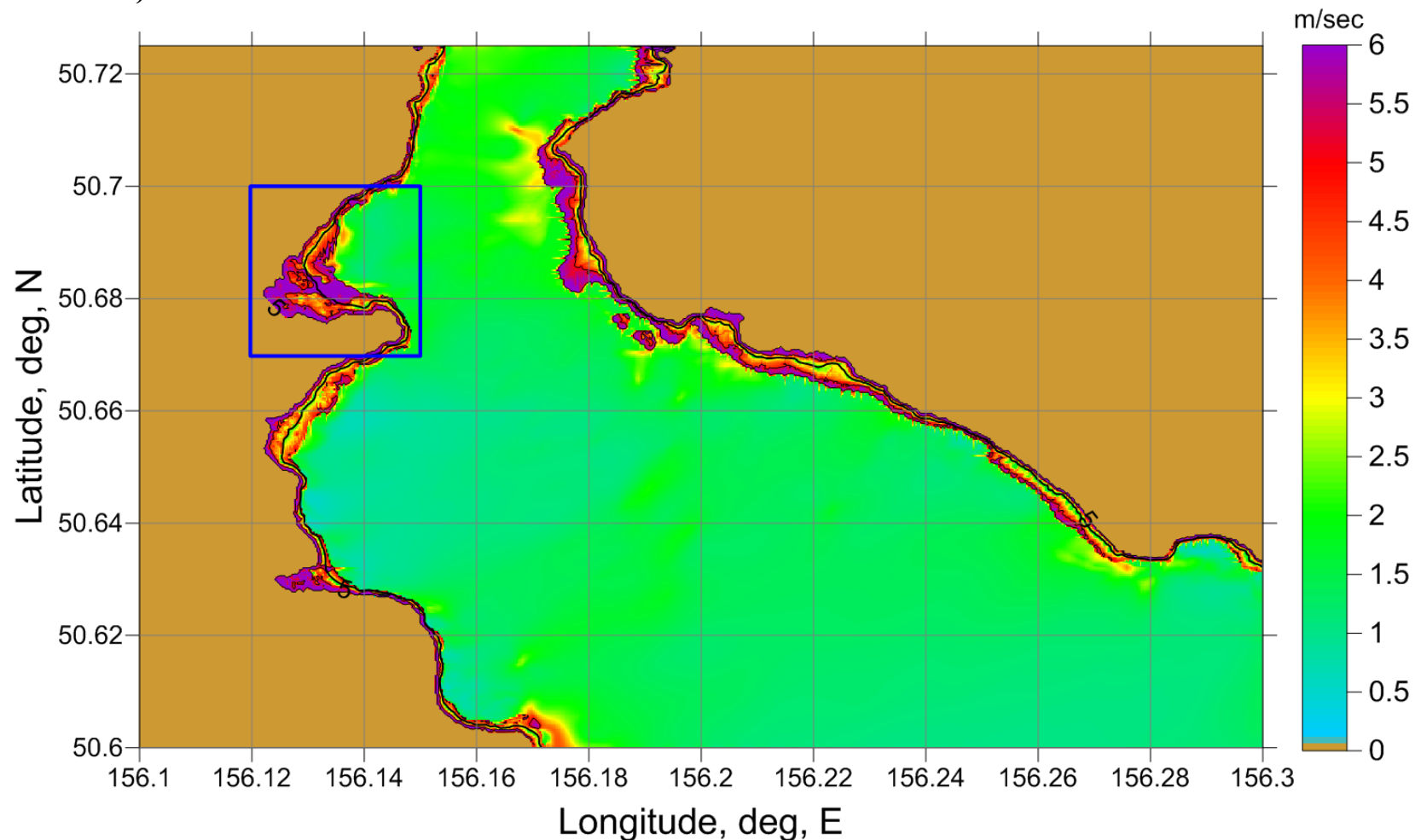


Рис. 32. Распределение максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Северо-Курильск», представленная ниже для детального анализа. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления (фрагмент «малой» области)

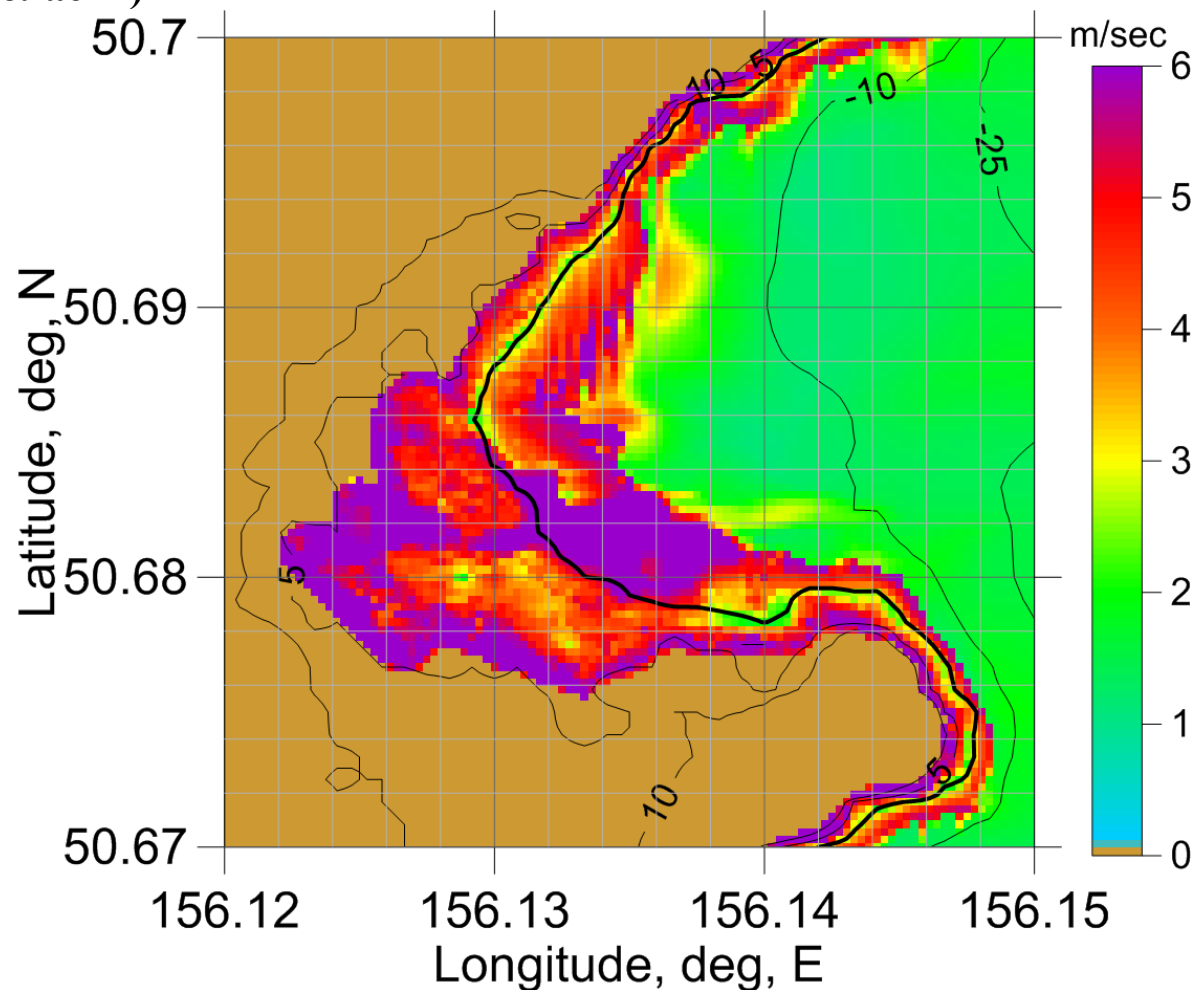


Рис. 33. Фрагмент распределения максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Изобаты проведены через значения -10 м, -25 м, изолинии рельефа суши – через значения 5 м, 10 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Северо-Курильск

Поля скоростей течения в ключевые моменты развития процесса («малая» область)

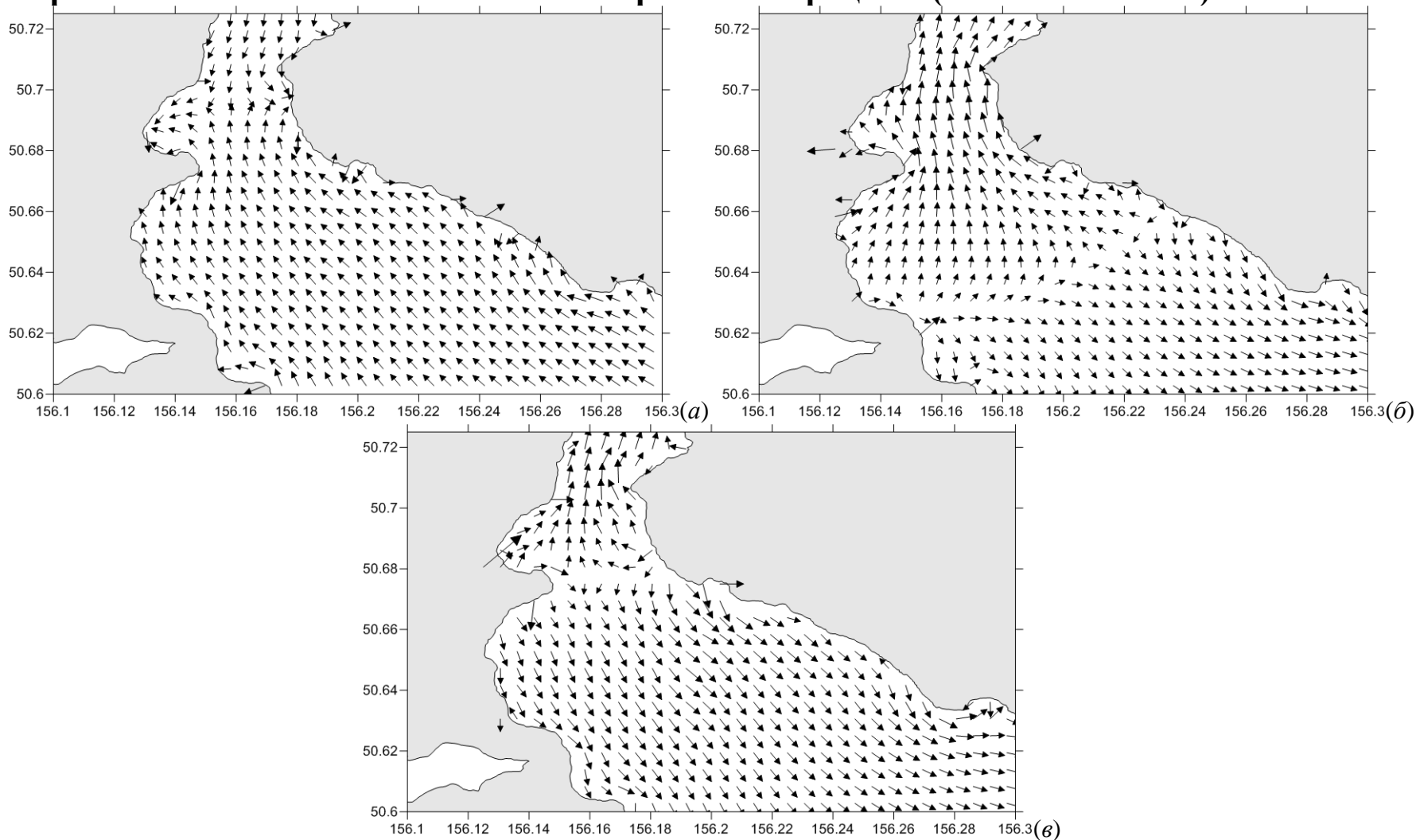


Рис. 34. Поля скоростей течения в окрестности г. Северо-Курильск в моменты начала затопления (а), его наиболее интенсивной фазы (б) и отката волны цунами (г).

Район г. Северо-Курильск

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth



Рис. 35. Зона затопления в окрестности г. Северо-Курильск, совмещенная с изображением Google Earth. Желтым прямоугольником выделена окрестность защищаемого пункта «Северо-Курильск», представленная ниже для детального анализа.

Район г. Северо-Курильск

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth (фрагмент изображения)



Рис. 36. Фрагмент зоны затопления в окрестности г. Северо-Курильск, показанной на рис. 35, совмещенный с изображением Google Earth.

Район г. Северо-Курильск

Сопоставление зон затопления во втором Курильском проливе

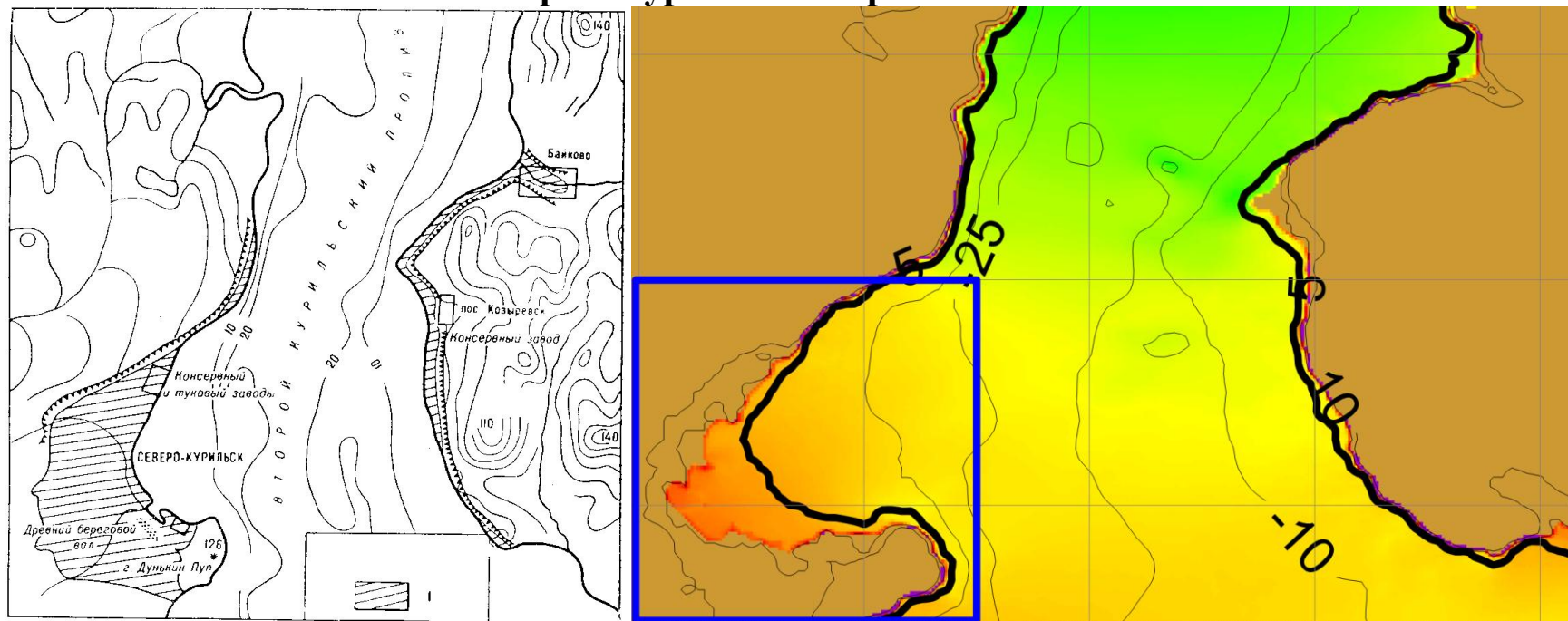


Рис. 37. Сопоставление зон затопления во втором Курильском проливе: натурные данные о цунами 4.11.1952 г. (слева) – заштрихована зона затопления берега (Саваренский и др., 1958) и результаты, рассчитанные для гипотетического цунами (справа).

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных уровней свободной поверхности («малая» область)

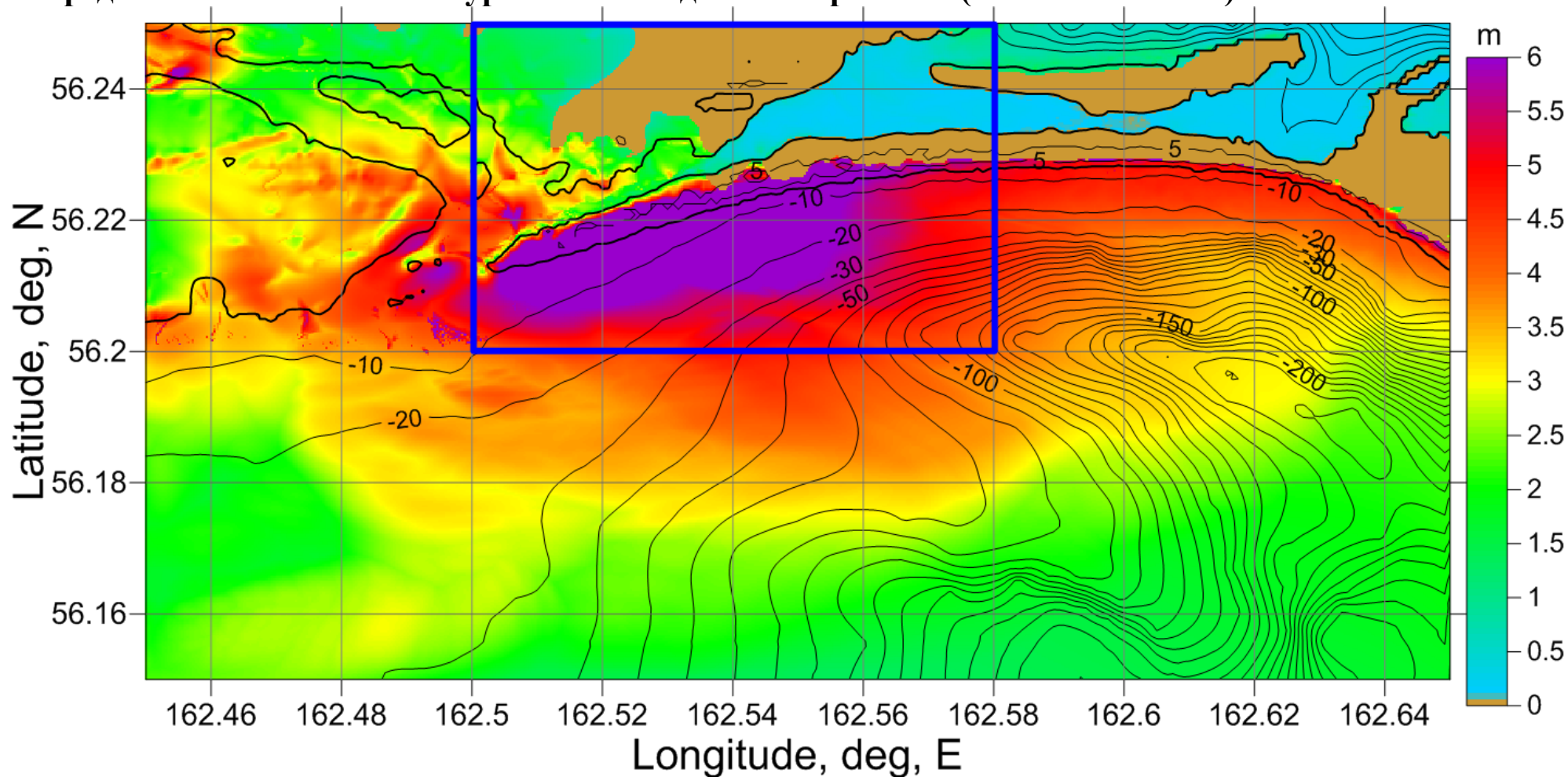


Рис. 38. Распределение максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Усть-Камчатск», представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через каждые 10 м, изолинии рельефа суши – через 5 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных уровней свободной поверхности (фрагмент «малой» области)

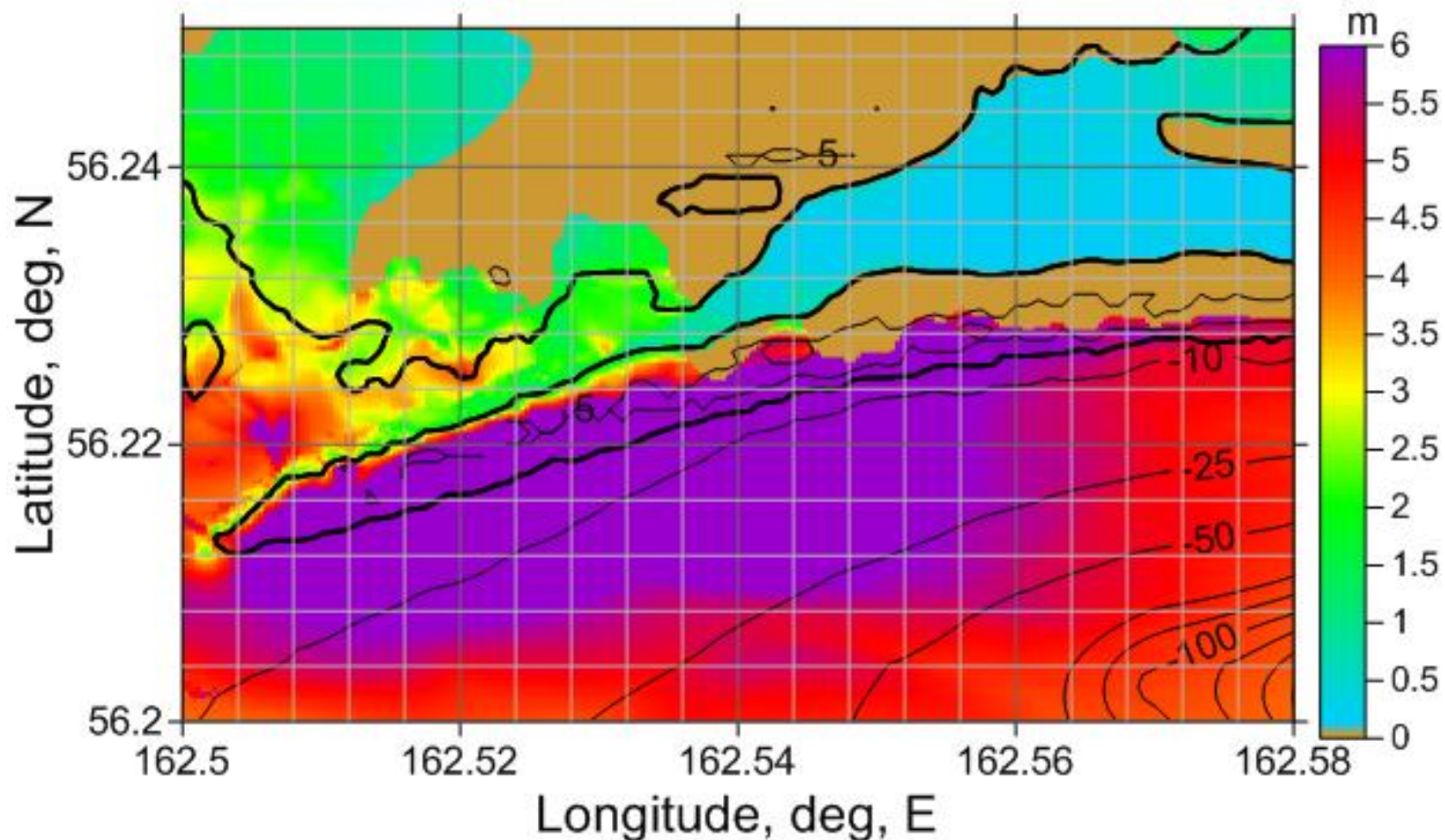


Рис. 39. Фрагмент распределения максимальных значений уровней свободной поверхности (в том числе, заплеск на сушу) в малой расчетной области. Изобаты проведены по значениям -10 м, -25 м, -50 м, -80 м и далее с шагом -10 м; изолинии рельефа суши – через 5 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных ГЛУБИИ затопления («малая» область)

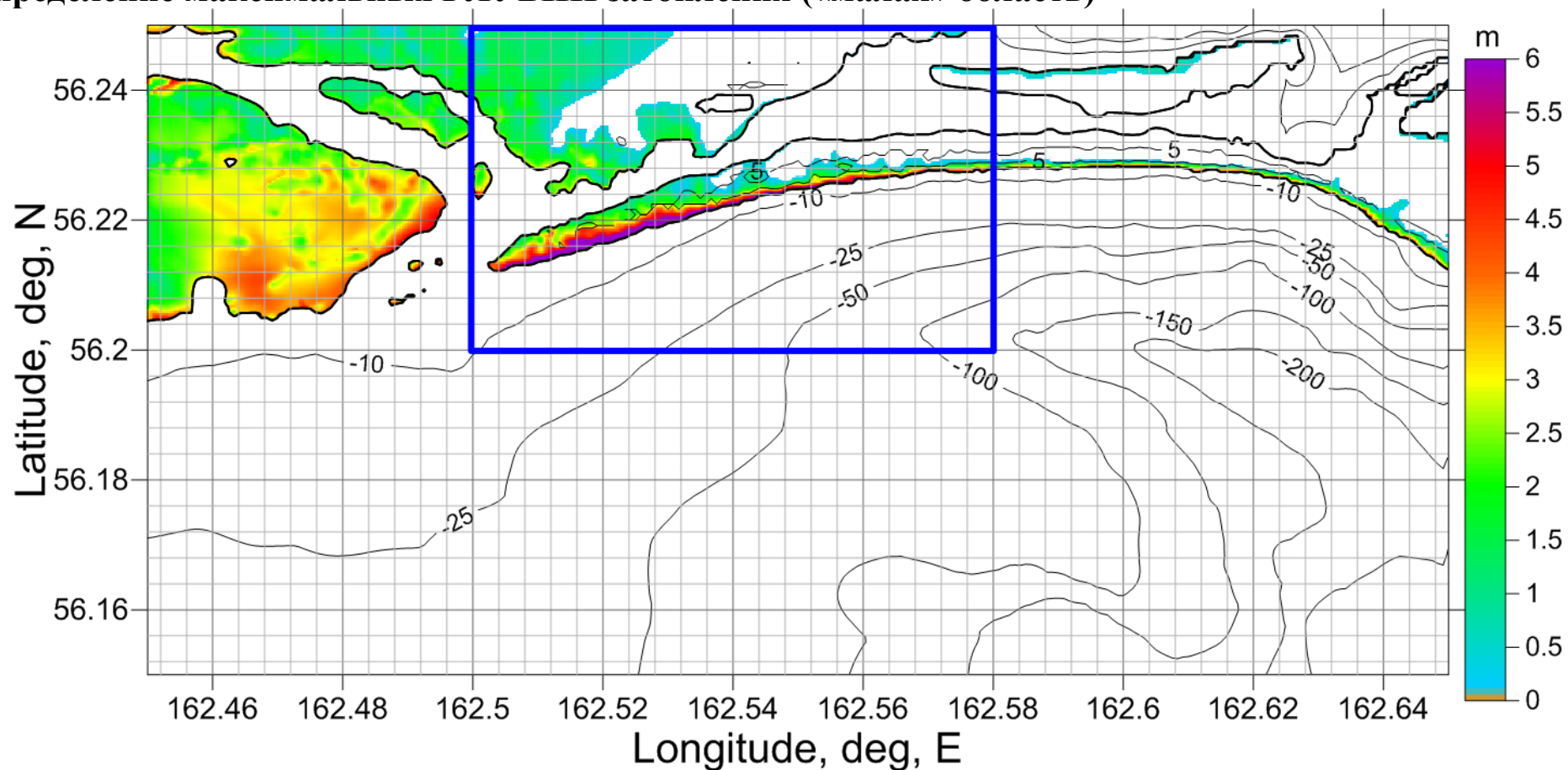


Рис. 40. Распределение максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Усть-Камчатск», представленная ниже для детального анализа. Тонкими черными линиями проведены изолинии рельефа акватории и суши, жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных ГЛУБИИ затопления (фрагмент «малой» области)

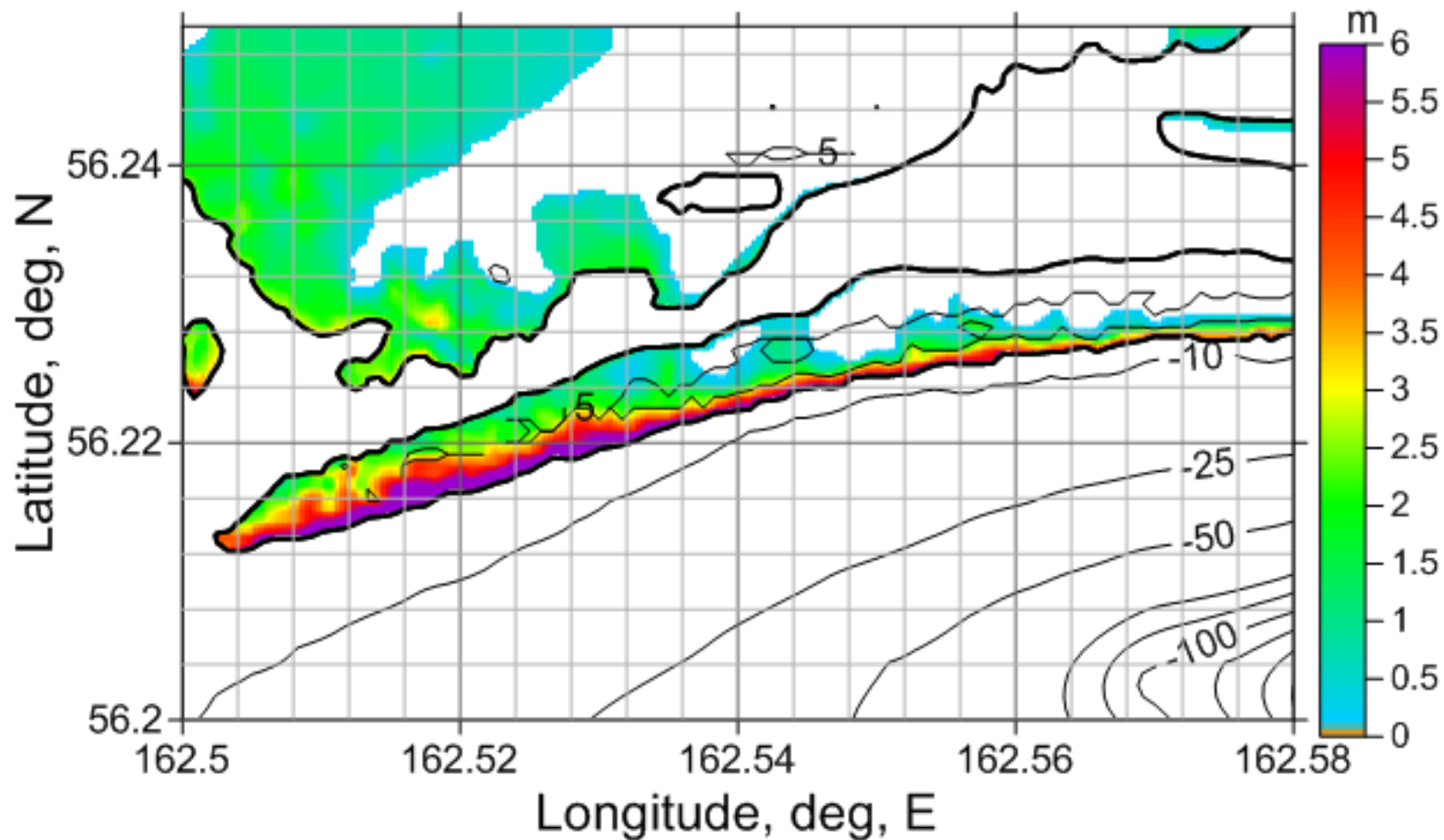


Рис. 41. Фрагмент распределения максимальных значений глубин затопления в малой расчетной области. Тонкими черными линиями проведены изолинии рельефа акватории и суши, жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления («малая» область)

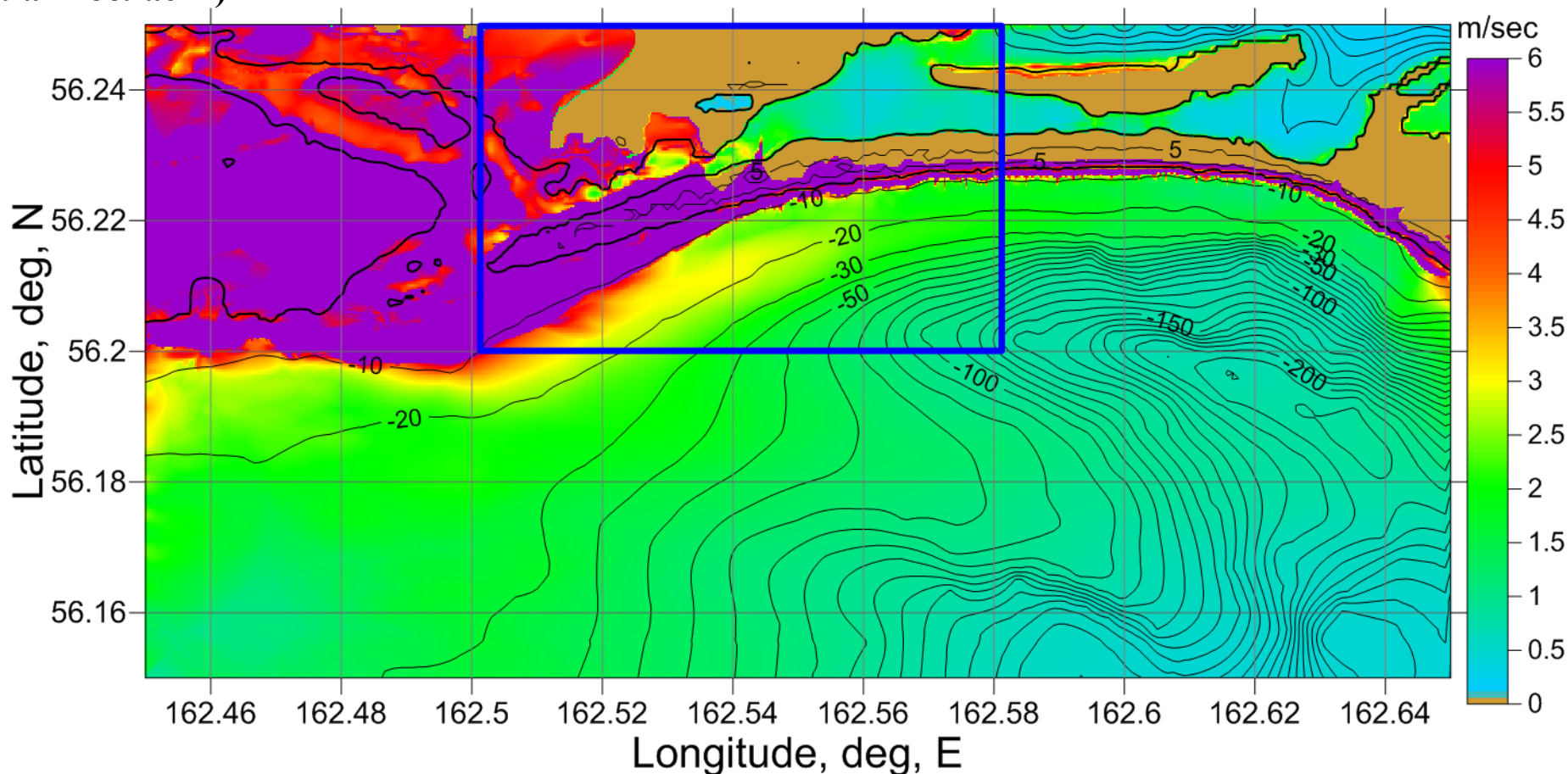


Рис. 42. Распределение максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Синим прямоугольником выделена непосредственная окрестность защищаемого пункта «Усть-Камчатск», представленная ниже для детального анализа. Изобаты проведены через каждые 10 м, изолинии рельефа суши – через 5 м. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Распределение максимальных значений МОДУЛЕЙ СКОРОСТИ, в том числе, в зоне затопления (фрагмент «малой» области)

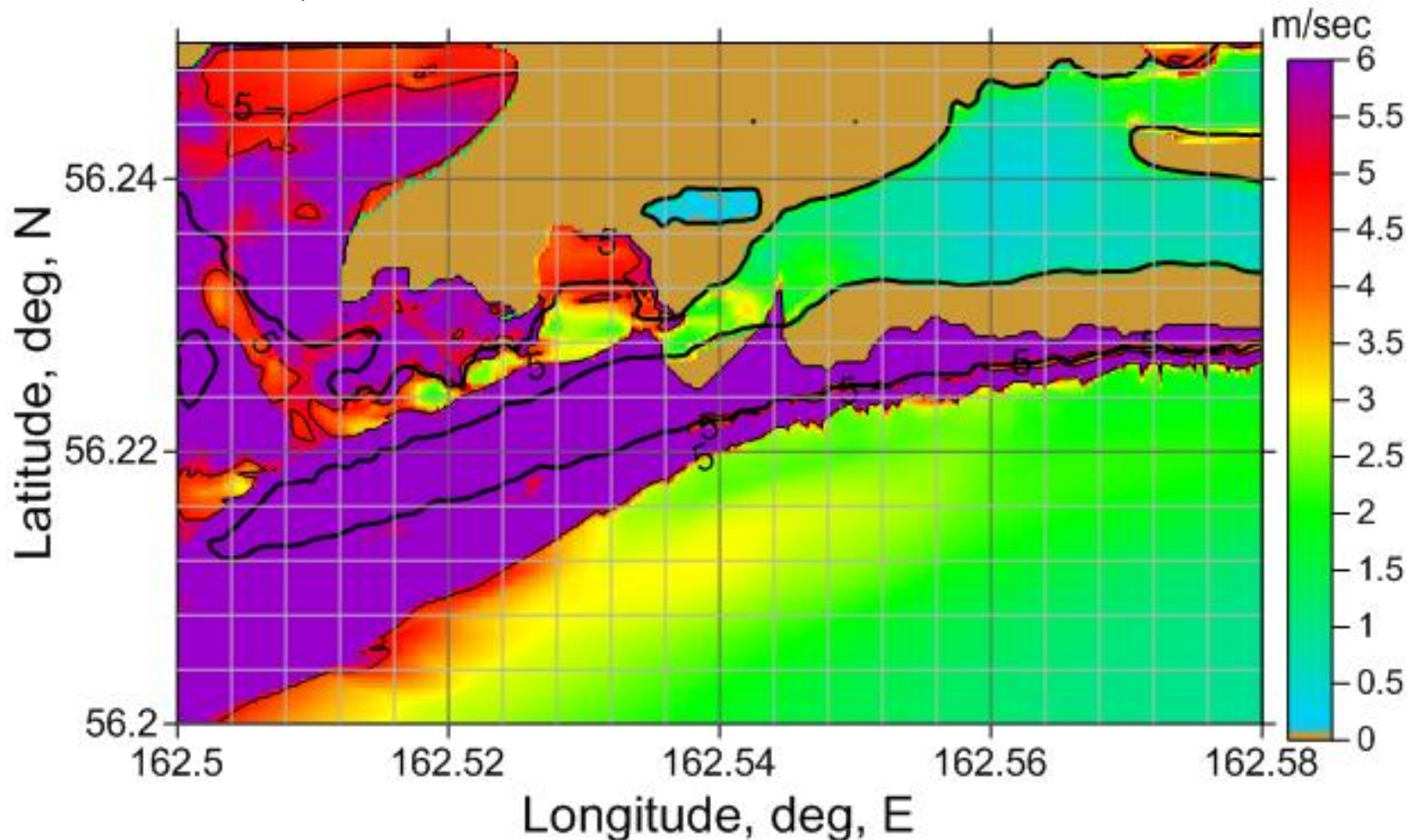


Рис. 43. Фрагмент распределения максимальных значений модулей скорости (в том числе, на суше) в малой расчетной области. Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

Район г. Усть-Камчатск

Поля скоростей течения в ключевые моменты развития процесса («малая» область)

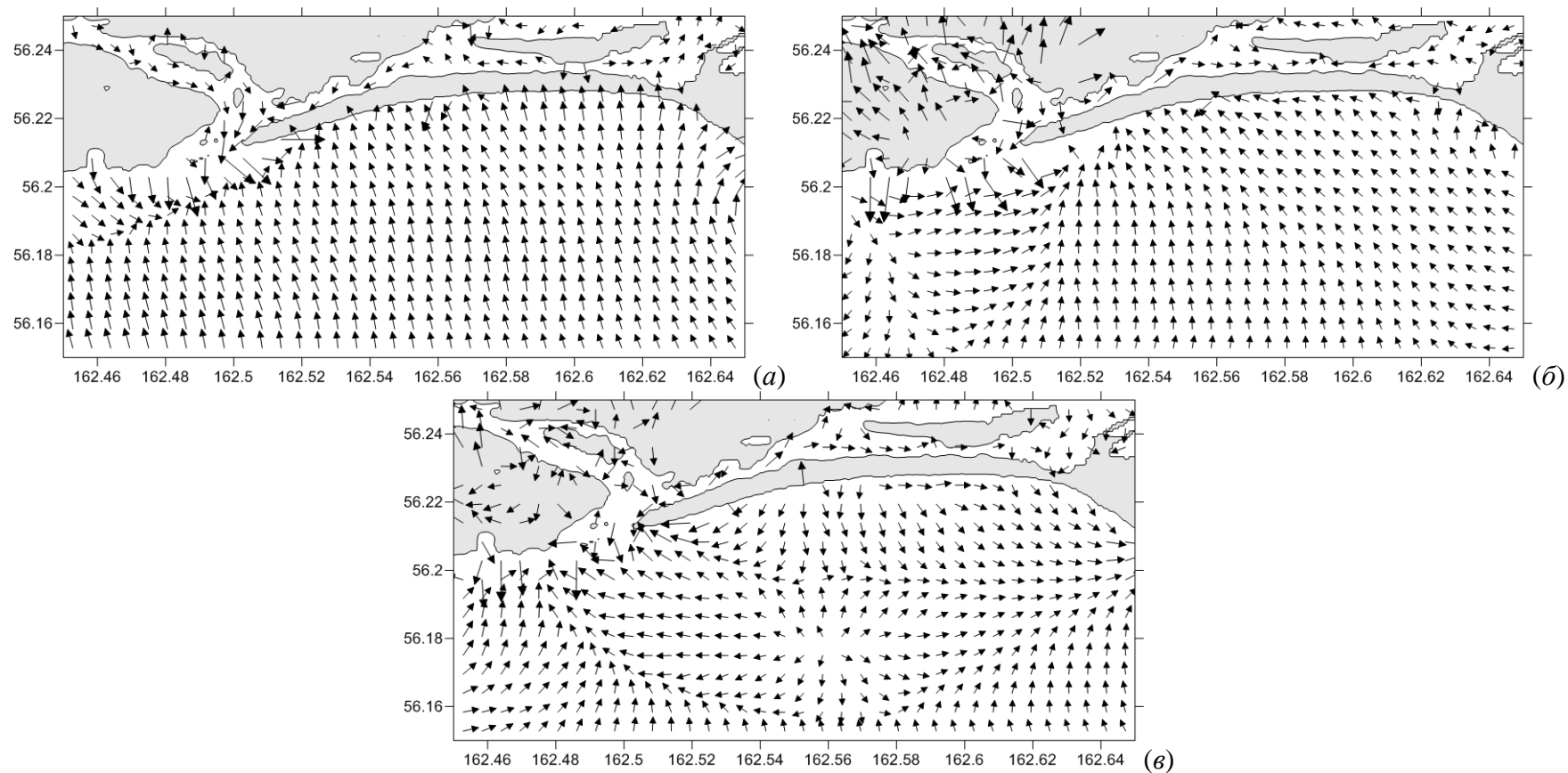


Рис. 44. Поля скоростей течения в окрестности г. Усть-Камчатск в моменты начала затопления (а), его наиболее интенсивной фазы (б) и отката волны цунами (в).

Район г. Усть-Камчатск

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth

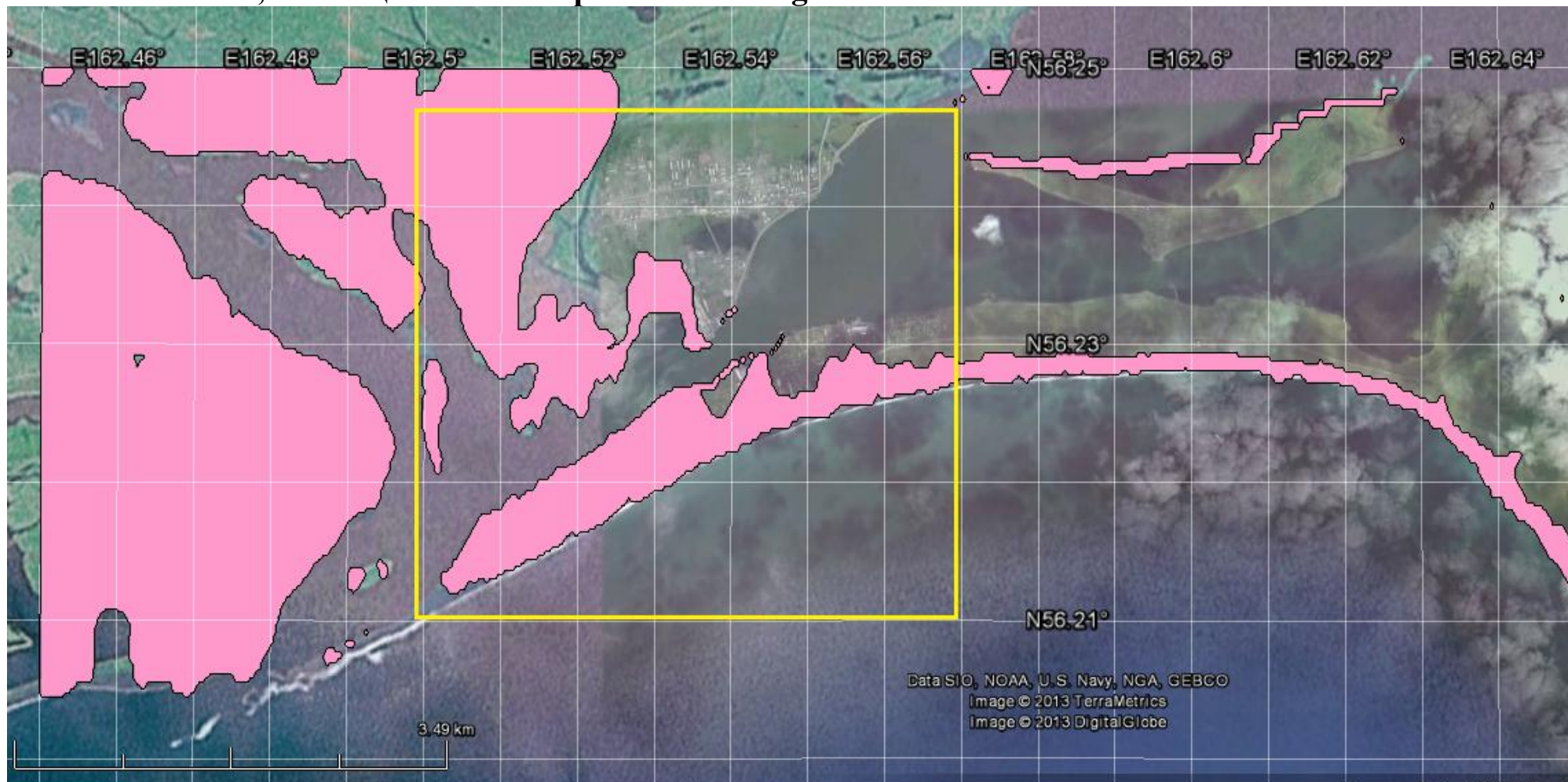


Рис. 45. Зона затопления в окрестности г. Усть-Камчатск, совмещенная с изображением Google Earth. Желтым прямоугольником выделена окрестность защищаемого пункта «Усть-Камчатск», представленная ниже для детального анализа.

Район г. Усть-Камчатск

Зона затопления, совмещенная с изображением Google Earth (фрагмент изображения)

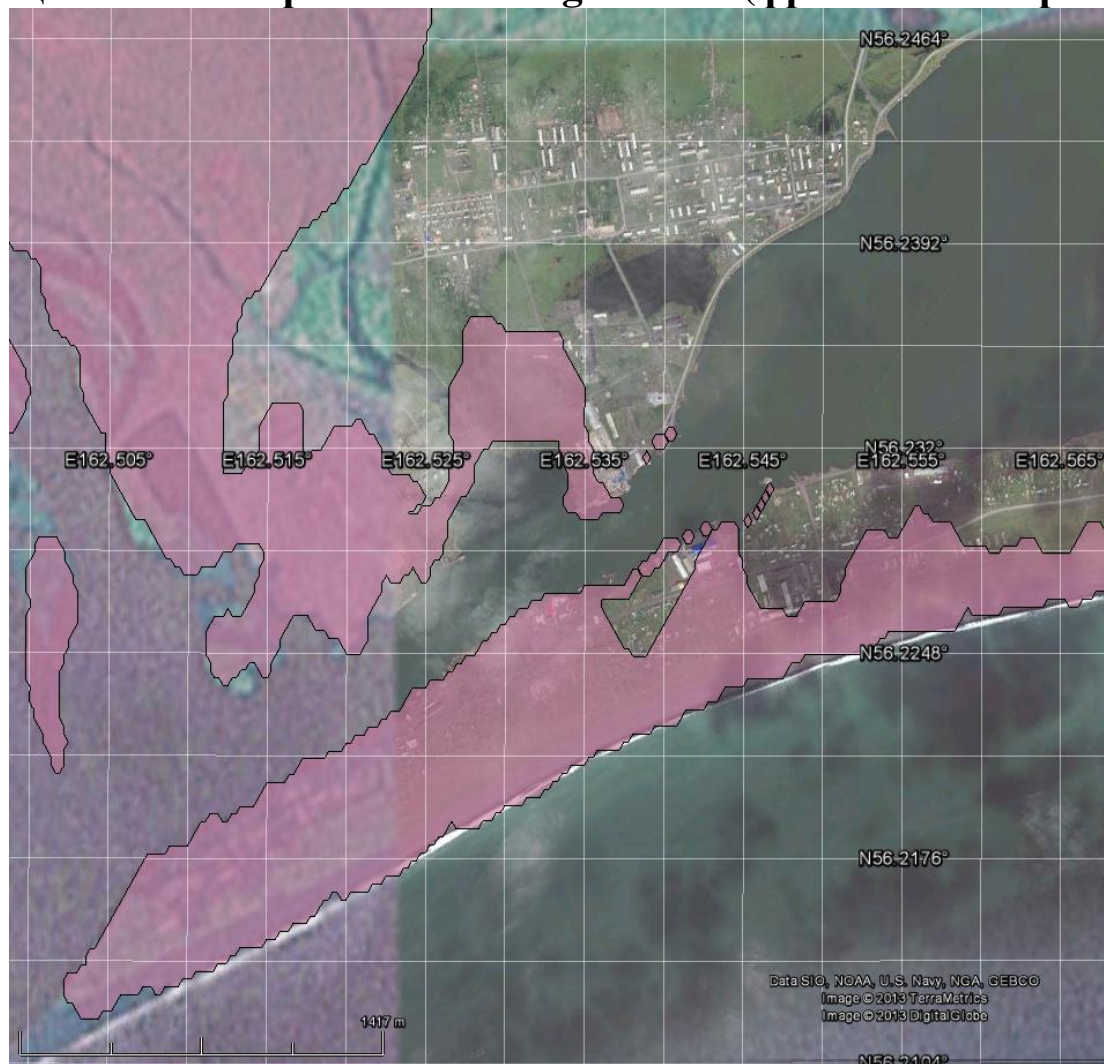


Рис. 46. Фрагмент зоны затопления в окрестности г. Усть-Камчатск, показанной на рис. 45, совмещенный с изображением Google Earth.

Распределения ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ заливания в зонах заплеска: районы г. Усть-Камчатск (а), г. Северо-Курильск (б), бухты Малокурильская (в)

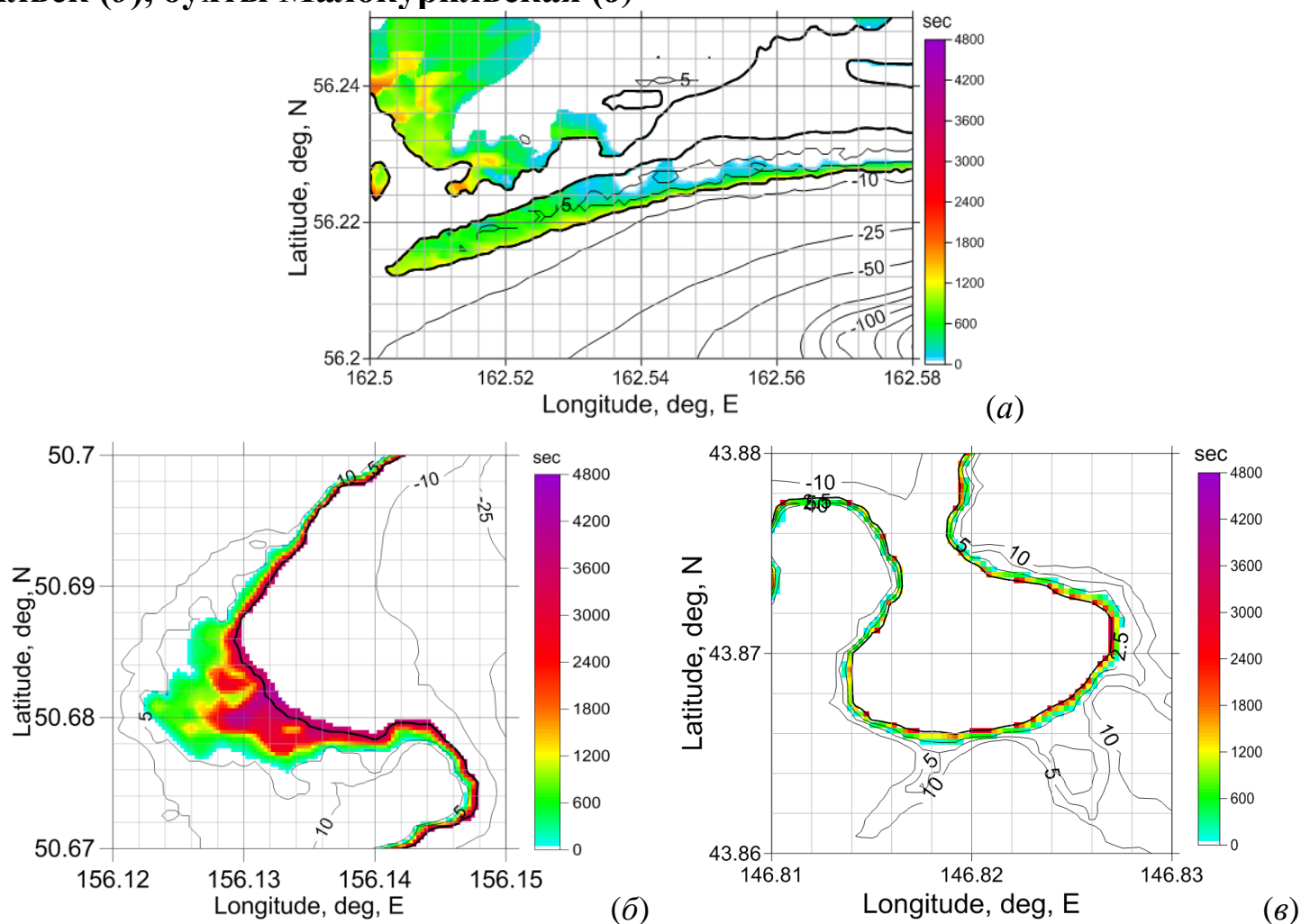


Рис. 47. Распределения продолжительности заливания в зонах заплеска: районы г. Усть-Камчатск (а), г. Северо-Курильск (б), бухты Малокурильская (в). Жирная черная линия определяет контур невозмущенного состояния линии уреза.

9 Заключение

Отчет по четвертому этапу проекта «Моделирование и анализ характеристик проявления волн цунами у защищаемых пунктов Дальневосточного побережья Российской Федерации» знаменует собой переход к принципиально новому этапу прогнозирования характеристик волны цунами в рамках оперативного режима. Его принципиальная новизна заключается в переходе от прогнозирования ожидаемых высот цунами на "стенке", установленной вблизи береговой линии на некоторой малой глубине, к прогнозированию характеристик заплеска цунами в конкретных береговых пунктах Дальневосточного побережья – высоты и дальности заплеска на сухом берегу и ожидаемых скоростей течения на всей площади заливаемой территории.

Такой переход потребовал, во-первых, создания и тестирования методики расчета наката цунами на сухой берег, применимой к большому числу разнообразных береговых ситуаций, и, во-вторых, создания и отработки методики сочленения двух расчетных блоков (распространения цунами на глубокой воде и наката на сухой берег), применимой в массовых серийных расчетах.

Основным результатом этого этапа стало создание методик расчета характеристик затопления волнами цунами побережья, прилегающего к защищаемым пунктам, а также технологии сочленения двух расчетных этапов с передачей параметров подходящей к берегу волны цунами из одного расчетного блока в другой. Проведена верификация блока расчета наката цунами на сухой берег путем сравнения результатов с тестовыми и лабораторными данными. На примерах расчета наката цунами от модельных очагов для трех выбранных береговых пунктов (Малокурильское, Северо-Курильск, Усть-Камчатск) продемонстрирована работоспособность этих методик. Полученные карты заливания находятся в разумном соответствии с данными замеров реальных исторических цунами, наблюдавшихся в этих пунктах при землетрясениях сопоставимой магнитуды. Показано, что ключевым моментом, определяющим успех решения данного класса задач, является наличие массивов детальной батиметрии (с шагом оцифровки от 15 до 30 м) прибрежной области, аналогичных по пространственному разрешению массивов цифрового рельефа прилегающих участков суши, а также информации о диссипативных характеристиках дна и берега, определяющих степень шероховатости поверхностей.

Основные результаты, полученные на данном этапе, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создана, исследована и проверена на тестовых решениях и экспериментальных (лабораторных) данных методика моделирования заплеска цунами на участки побережья с реальным рельефом суши. Эта методика основывается на использовании метода «крупных частиц» для решения системы двумерных нелинейных уравнений мелкой воды в области с подвижной линией уреза.
2. Отработана методика сочленения двух расчетных блоков моделирования цунами, первый из которых включает в себя расчет возбуждения и распространения волн в океанической расчетной области, включающей в

- себя очаг цунами, второй блок позволяет производить расчет распространения на детальной сетке в мелководной области, прилегающей к населенным пунктам, и моделировать выход волн на берег.
3. Создана модифицированная версия программного комплекса MGC, обеспечивающая сквозной расчет характеристик волн цунами на всех этапах жизни волны от генерации очагом подводного землетрясения до заплеска на побережье. Методика является достаточно экономичной и применима для массовых расчетов карт заливания конкретных береговых пунктов для различных наборов модельных очагов.
 4. Подготовлены массивы детальной цифровой батиметрии (с разрешением 30 метров) для акваторий вблизи к пос. Малокурильское, г.Северо-Курильска и г.Усть-Камчатска, а также массивы цифрового рельефа суши, прилегающей к этим акваториям.
 5. На основании анализа данных каталогов цунами и первичных публикаций составлен исторический обзор проявлений цунами в пос. Малокурильское, г.Северо-Курильск и г.Усть-Камчатск, охватывающий весь исторический период доступных наблюдений (с 1737 года по настоящее время).
 6. Выбраны параметры и положения модельных подводных землетрясений с магнитудой $M_w=8.4$, создающих непосредственную угрозу цунами для каждого из этих береговых пунктов, для них проведены расчеты распространения и наката цунами на побережье в соответствующих бухтах и заливах.
 7. Построенные карты заливания волн для каждого из рассмотренных береговых пунктов сопоставлены с имеющимися данными о проявлениях исторических цунами в этих пунктах. Установлено, что оценки максимальных высот наката и глубин заливания берега находятся в разумном соответствии с данными о высотах и заплесках реальных цунами, наблюдавшихся в этих пунктах при землетрясениях сопоставимой магнитуды

10 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.
- 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.
- 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.ssc.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.