

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт вычислительных технологий

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИВТ СО РАН

академик _____ Ю. И. Шокин

30 октября 2012 года

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

ОТЧЕТ

по третьему этапу договора на выполнение НИОКР
для государственных нужд по Федеральной целевой программе
«Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций при-
родного 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, 2012г.

Исполнители:

н.с., к.ф.-м.н.

С.А. Бейзель,

в.н.с., д.ф.-м.н.

В.К. Гусяков,

г.н.с., д.ф.-м.н.

Л. Б. Чубаров

Оглавление

1	Введение	4
2	Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от системы модельных очагов «региональных» и «удаленных» цунамигенных землетрясений	7
2.1.	Сведения об исторических цунами в Охотском море	10
2.2.	Анализ проявления удаленных цунами у берегов Охотского моря.....	24
2.3.	Анализ проявления ближних цунами у берегов Охотского моря.....	25
2.4.	Выводы.....	42
3	Уточнение южной и восточной границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России	44
3.1.	Южная граница ближней цунамигенной зоны	46
3.2.1.	Анализ исторических данных	47
3.2.2.	Анализ данных численного моделирования	50
3.2.	Восточная граница цунамигенной зоны	59
3.2.1.	Анализ исторических данных	59
3.2.2.	Анализ данных численного моделирования	64
3.3.	Выводы.....	88
4	Предложение в программу работ до 2015 г. по обоснованию новой схемы принятия решений об объявлении тревоги цунами на Дальневосточном побережье РФ с учетом особенностей географического положения защищаемых пунктов и оперативного использования данных гидрофизической подсистемы.	90
5	Заключение	90
5.1.	Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от системы модельных очагов «региональных» и «удаленных» цунамигенных землетрясений	90
5.2.	Уточнение южной и восточной границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России	92
6	Литература	93

1 Введение

В соответствии с Техническим заданием к контракту и соответствующим планом к нему работа на третьем этапе выполнялась в двух основных направлениях:

1. Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря;
2. Уточнение восточной и южной границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России.

Работы по *первому направлению* состояли в подборе и анализе исторических сведений о проявлении у защищаемого побережья волн цунами, порожденных «ближними» и «удаленными» относительно этого побережья цунамигенными землетрясениями, в численном моделировании исторических событий, воздействие которых на побережье оказалось значительным, в конструировании набора модельных очагов гипотетических цунамигенных землетрясений и в воспроизведении соответствующих волн цунами с целью определения экстремальных характеристик воздействия таких цунами на берега.

При этом под защищаемым побережьем понимались фрагменты, административно принадлежащие Хабаровской, Магаданской и Сахалинской областям, а также Камчатскому краю (западное побережье п-ва Камчатка).

Перечень защищаемых пунктов, их географические и административные характеристики приведены в следующей таблице (см. Таблица 1.1), схемы расстановки виртуальных мареографов и их соответствие защищаемым пунктам – на рисунках (Рисунок 1.1, Рисунок 1.2).

Безусловно, важная информация о реальном проявлении волн цунами у побережья, к сожалению, явно недостаточна для оценки цунамиопасности побережья в целом, так как, во-первых, касается отдельных точек, а во-вторых, порой недостаточно достоверна, в тех случаях, когда на самом деле неизвестно, какой именно физической характеристике приписывается конкретное значение.

Естественным средством восполнения недостающей информации является вычислительный эксперимент, который, несмотря на присущие ему недостатки, связанные с недостаточной информацией об источнике волны, невозможностью учета всех физических факторов, влияющих на трансформацию волны, недостаточной разрешающей способностью доступных цифровых батиметрических карт, трудностями воспроизведения наката волн на берег и их взаимодействия с береговыми объектами (растительность, геологические структуры, гидротехнические сооружения, жилье и т.п.), все-таки способен к воспроизведению множества различных сценариев катастрофических явлений, сопровождающих сильные землетрясения и сопутствующие им цунами.

В настоящем отчете в ходе постановки задач для вычислительных экспериментов были выбраны модельные землетрясения, близкие по характеру Камчатским (1737 и 1952 гг.) цунами, Чилийскому, Аляскинскому и Японскому (Тохоку) цунами (соответственно 1960, 1964 и 2011 гг.). Вместе с этими историческими цунами были рассмотрены также гипотетические цунами, очаги которых были расположены вблизи Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновых островов. Перечисленные выше события были отнесены к группе «удаленных» и моделировались на расчетной сетке с шагом 2 угловые минуты. Камчатские цунами и другие гипотетические события, рассматриваемые ниже, считались «ближними» и соответст-

вующие им сценарии воспроизводились на сетках с шагом 1 угловая минута. Ранее (см. отчет исполнителей по Контракту с НПО «Тайфун» от 2008 г.) близкие по характеру расчеты проводились на уточненной сетке с шагом 15 угловых секунд.

Таблица 1.1 Защищаемые пункты побережья Охотского моря и прилегающих акваторий, их географические и административные характеристики.

Населенный пункт	Координаты	Номер на схеме	Население	Место расположения
Хабаровский край				
г. Советская Гавань	48°58'N, 140°17'E	9	28,4 т.ч.	Советско-Гаванский муниципальный район
р.п. Лососина	48°60'N, 140°19'E	9	3,2 т.ч.	– “ –
р.п. Ванино	49°05'N, 140°16'E	9	18,3 т.ч.	Ванинский муниципальный район
с. Датта	49°16'N, 140°22'E	10	1,048 т.ч.	– “ –
с. Де-Кастри	51°28'N, 140°47'E	21	3,724 т.ч.	Ульчский муниципальный район (побережье Татарского пролива)
с. Чумикан	54°42'N, 135°18'E	185	1,344 т.ч.	Тугуро-Чумиканский муниципальный район (побережье Охотского моря)
с. Аян	55°29'N, 135°00'E	199	2,663 т.ч.	Аяно-Майский муниципальный район
с. Вострцево	59°17'24"N, 142°53'16"E	226	0,758 т.ч.	Охотский муниципальный район
п. Новое Устье	59°20'03"N, 143°03'38"E	227	0,430 т.ч.	– “ –
п. Морской	59°20,7'N, 143°08'E	227, 228	менее 0,5 т.ч.	– “ –
р.п. Охотск	59°23'N, 143°18'E	228	4,470 т.ч.	– “ –
п. Новая Иня	59°22'32"N, 144°51'44"E	235	0,626 т.ч.	– “ –
п. Иня	59°22'N, 144°52'E	235	0,9 т.ч.	– “ –
Магаданская область				
п. Балаганное	59°39'N, 149°05'E	257, 258	0,5 т.ч.	побережье Тауйской губы
п. Тауйск	59°43'N, 149°15'E	258	0,5 т.ч.	– “ –
п. Янский	59°45'.5N, 149°33'E	259	0,5 т.ч.	– “ –
п. Армань	59°40'.5N, 150°08'E	262	1 – 2 т.ч.	– “ –
г. Магадан	59°33'N ¹ , 150°47'E	265	149,8 т.ч. ²	– “ –
п. Ола	59°34'N, 151°17'E	267, 268	10 т.ч.	– “ –
п. Ямск	59°35'N, 154°09'E	301, 302	0,5 т.ч.	побережье Ямской губы, зал. Переволочный
п. Тахтоямск	– “ –	306	– “ –	– “ –
п. Эвенск	61°55'N, 159°13'E	328	1 – 2 т.ч.	зал. Шелихова
п. Гижига	61°58'N, 160°20'E	333	0,5 т.ч.	– “ –

Для определения наиболее опасных (по значениям высот волн в защищаемых пунктах и в ближайших к ним виртуальных мареографах) положений модельных очагов цунамигенных землетрясений были проведены дополнительные

¹ указаны координаты наблюдательных подразделений ГУ «Колымское УГМС»

² согласно переписи 2010 г.

вычислительные эксперименты, в которых начальные возвышения соответствовали землетрясениям с магнитудами 9,0 и 8,4.

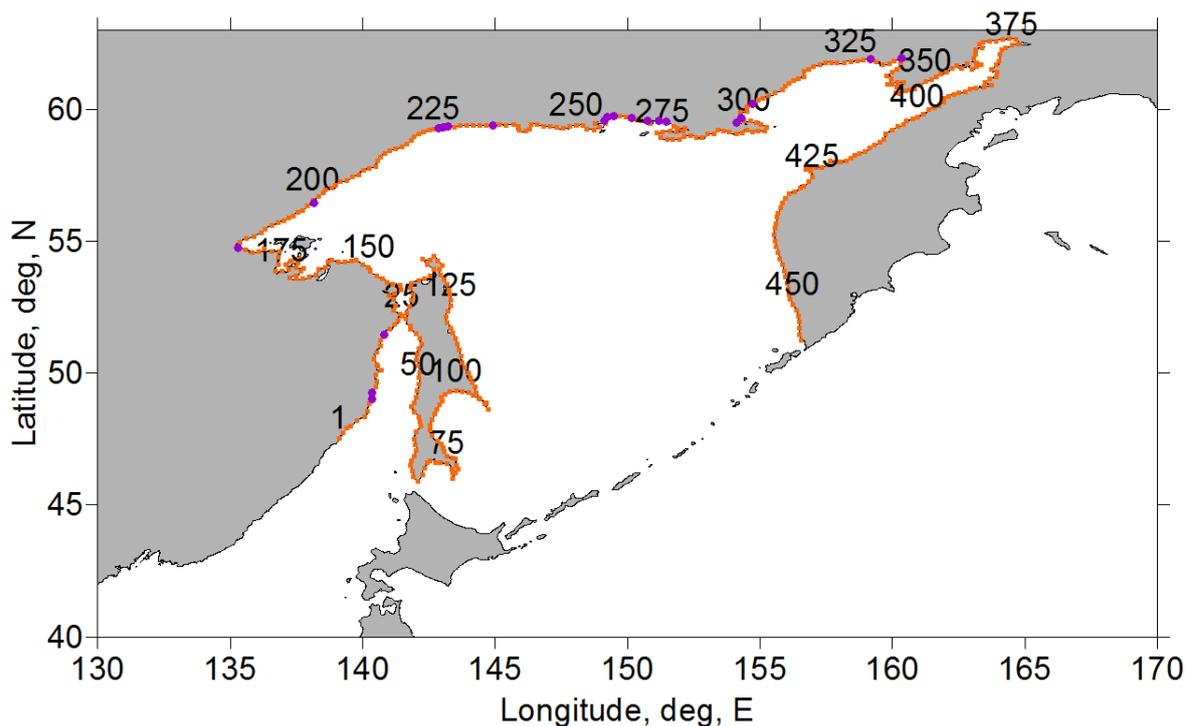


Рисунок 1.1 Схема размещения виртуальных мареографов вдоль защищаемого побережья Охотского моря и прилегающих акваторий.

Исследования по *второму направлению* были ориентированы на уточнение восточной (вдоль Алеутской дуги, в акватории Берингова моря) и южной (вдоль побережья северной Японии) границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России. Здесь также значительное внимание было уделено анализу исторических сведений, а также содержательной интерпретации специально проведенных вычислительных экспериментов, в ходе которых рассматривались гипотетические цунами от модельных землетрясений с различными механизмами.

Что касается предложений в программу работ до 2015 г. по обоснованию новой схемы принятия решений об объявлении тревоги цунами на Дальневосточном побережье РФ с учетом особенностей географического положения защищаемых пунктов и оперативного использования данных гидрофизической подсистемы, то здесь предлагается приступить к разработке плана детального исследования цунамиопасности для наиболее важных защищаемых пунктов, включая определение очередности, составление списка на ближайшие 2 – 3 года, сбор исторических данных, натурной информации, паспортизации объектов, постановок задач на математическое моделирование, проведение вычислительных экспериментов и определение экстремальных характеристик границ заплеска, высот наката, продолжительности наката и динамических воздействий (скорости, потоки) с учетом детальной батиметрии, диссипации (шероховатость), приливных компонент и т.п.

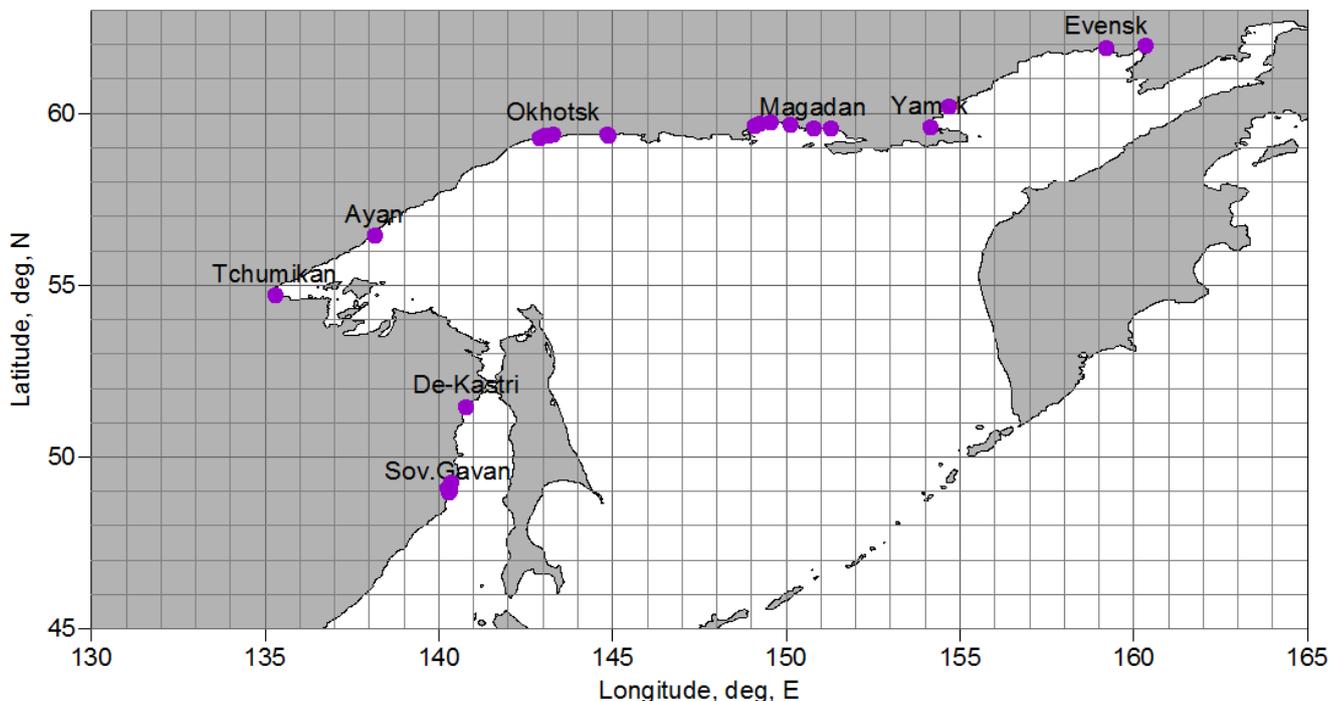


Рисунок 1.2 Схема соответствия виртуальных мареографов и защищаемых пунктов (см. Таблица 1.1)

2 Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от системы модельных очагов «региональных» и «удаленных» цунамигенных землетрясений

Охотское море (Рисунок 2.1) является одним из окраинных морей Тихоокеанского бассейна и отделяется от Тихого океана на юге островом Хоккайдо, на востоке цепочкой Курильских островов и полуостровом Камчатка. Формальная граница, разделяющая бассейны Охотского и Японского морей, проводится по наиболее узким проходам Татарского пролива и пролива Лаперуза. При таком определении площадь бассейна моря (без островов) составляет 1603 тыс. км² (по другим данным 1616,7 тыс. км²). Площадь островов в его пределах равна 13,5 тыс. км². Средняя глубина моря 821 м (по другим данным 859 м), максимальная глубина 3521 м (в северной части Курильской котловины). Суммарный объем вод Охотского моря равен 1316,9 тыс. км³. Протяженность береговой линии моря составляет 10 460 км (Национальный атлас..., 2007).

Охотское море, хотя и окружено практически со всех сторон территорией Российской Федерации, её внутренним морем не является; его акваторию составляют *внутренние морские воды, территориальное море и исключительная экономическая зона*. В центральной части моря имеется вытянутый в меридиональном направлении участок, в англоязычной литературе традиционно именуемый *Peanut Hole*, который не входит в исключительную экономическую зону России и юридически является *открытым морем*.

Проливами Амурский лиман, Невельского на севере и Лаперуза на юге Охотское море соединяется с Японским морем, а многочисленными Курильскими проливами – с Тихим океаном. Проливы Невельского и Лаперуза достаточно узки и мелководны, что является причиной относительно слабого водообмена с Японским морем. Проливы Курильской островной гряды, напротив, являются более широкими (их суммарная ширина составляет около 500 км) и глубоководными (глубины некоторых из них достигают 2000 м), что обеспечивает интенсивный

водообмен с Тихим океаном, а также *создает возможность для проникновения течений и волн цунами из Тихого океана в Охотоморский бассейн.*

Поступление поверхностных тихоокеанских вод в Охотское море происходит главным образом через северные проливы, в особенности, через Первый Курильский пролив (между Камчаткой и о-вом Шумшу). В верхних слоях южной части Курильской гряды преобладает сток охотоморских вод.

В тектоническом отношении море расположено на Охотской субплите, являющейся частью Евразийской плиты. Кора под большей частью Охотского моря континентального типа. Основными морфологическими элементами в рельефе дна Охотского моря являются шельф (глубины 0 – 200 м), материковый склон (глубины 200 – 2000 м), на котором выделяются отдельные возвышенности, впадины, острова и расположенная в его южной части Курильская глубоководная котловина (глубины более 2500 м). Дно Курильской котловины представляет из себя плоскую абиссальную равнину со средними глубинами порядка 3300 м.

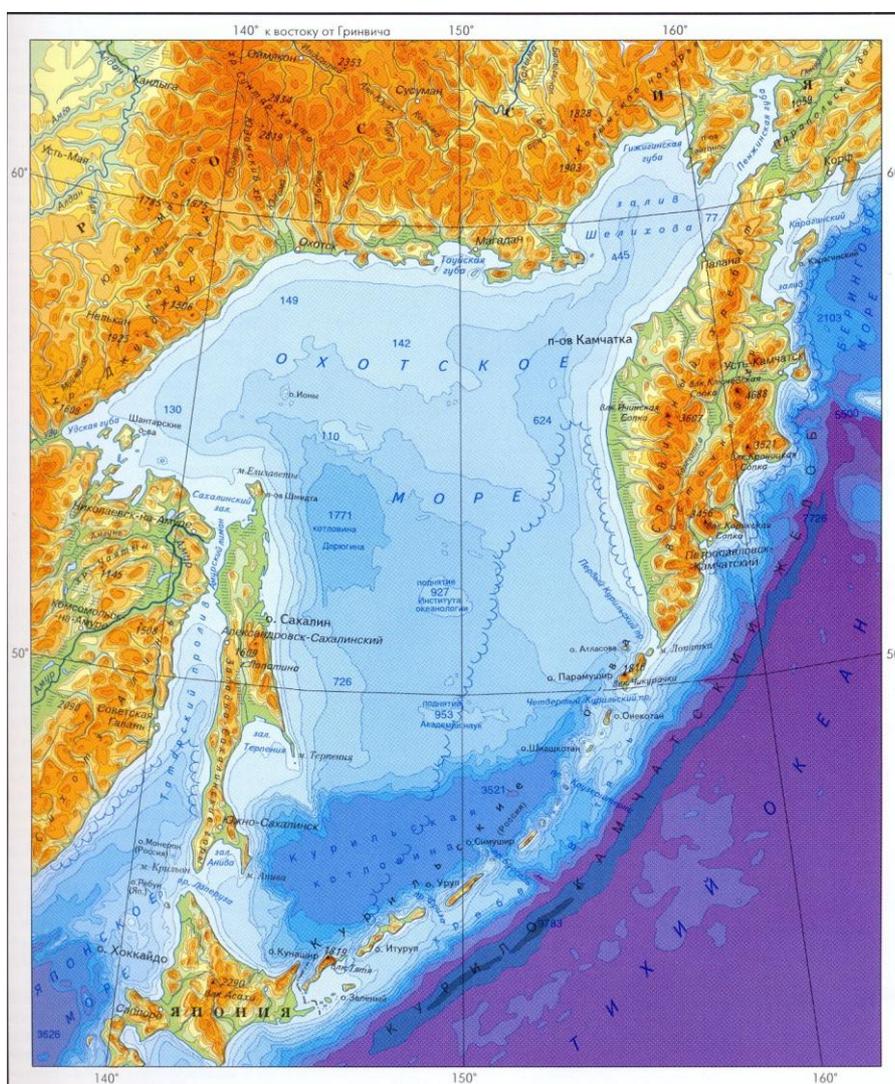


Рисунок 2.1 Охотское море. Физико-географическая карта.

Береговая линия Охотского моря имеет сложные очертания. Изгибы ее, связанные с выступами крупных мысов и полуостровов, образуют заливы и губы. Наиболее изрезана и извилиста она в юго-западной и северо-восточной частях моря. Северо-западное побережье Охотского моря практически лишено крупных заливов, а северное – значительно изрезано. В него вдается Тауйская губа, берега

которой изрезаны заливами и бухтами (заливы Мотыклейский, Ахматонский и Одян). От Охотского моря губа отделена п-вом Кони. Из более мелких заливов северного побережья Охотского моря следует отметить заливы Ушки, Шельтинга, Забияка, Бабушкина, Кекурный. Западное побережье п-ова Камчатка выровнено и практически лишено заливов. Сложны по своим очертаниям и образуют мелкие заливы берега Курильских островов. С охотоморской стороны наиболее крупные заливы находятся у о. Итуруп: Доброе Начало, Куйбышевский, Курильский, Простор, а также Львиная Пасть и др. Заливы глубоководны и имеют весьма сложно-расчлененное дно.

С октября по май северная часть моря покрыта льдом. Юго-восточная часть моря практически не замерзает. Зимой температура воды у поверхности моря почти повсеместно приближается к точке замерзания (от $-1,8^{\circ}\text{C}$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$), лишь вблизи курильских проливов под влиянием тихоокеанских вод она повышается до $+1,0^{\circ}\text{C}$ – $+2,0^{\circ}\text{C}$. Летом температура в открытом море более разнообразна, но нигде не повышается выше $+10$ – $+12^{\circ}\text{C}$. Солёность поверхностных морских вод – $32,8$ – $33,8$ промилле (‰). Глубинные воды имеют солёность $34,3$ – $34,4$ ‰. Прибрежные воды имеют солёность менее 30 ‰.

Значительные размеры и большие глубины Охотского моря, частые и сильные ветры над ним обуславливают развитие здесь крупных волн. Особенно бурным море бывает осенью, а в безледных районах и зимой. На эти сезоны приходится 55 – 70% штормового волнения, в том числе с высотами волн 4 – 6 м, а наибольшие высоты волн достигают 10 – 11 м. Самые беспокойные – южный и юго-восточный районы моря, где средняя повторяемость штормового волнения равна 35 – 50% , а в северо-западной части она уменьшается до 25 – 30% .

Важной особенностью Охотского моря является наличие на нем ледового покрова в течение большей части года. Суровые и продолжительные зимы с сильными северо-западными ветрами способствуют развитию интенсивного льдообразования. Здесь встречаются как неподвижные льды (припай), так и плавучие, представляющие собой основную форму льдов моря.

Льдообразование начинается в ноябре в заливах и губах северной части моря, в прибрежной части о. Сахалин и Камчатки. Затем лед появляется в открытой части моря. В январе и феврале льды занимают всю северную и среднюю часть бассейна, занимая до 75% поверхности моря. В обычные годы южная граница сравнительно устойчивого ледяного покрова проходит, изгибаясь к северу, от пролива Лаперуза до мыса Лопатка на южной оконечности Камчатки. Крайняя южная часть моря никогда не замерзает. Однако благодаря ветрам в нее выносятся с севера значительные массы льда, часто скапливающиеся у Курильских островов.

С апреля по июнь происходит разрушение и постепенное исчезновение ледяного покрова. В среднем лед в море исчезает в конце мая – начале июня. Северо-западная часть моря благодаря течениям и конфигурации берегов более всего забивается льдом, сохраняющимся там до июля. Следовательно, ледяной покров в Охотском море сохраняется на протяжении 6 – 9 месяцев. Толщина нарастающих в течение зимы льдов достигает $0,8$ – $1,0$ м. Сильные штормы, приливные течения взламывают ледяной покров во многих районах моря, образуя торосы и большие разводья. В открытой части моря никогда не наблюдается сплошного неподвижного льда, обычно здесь лед дрейфующий в виде обширных полей с многочис-

ленными разводьями. Часть льдов из Охотского моря выносятся в океан, где почти сразу же разрушается и тает. В суровые зимы плавучие льды северо-западными ветрами прижимаются к Курильским островам и забивают некоторые проливы.

Приливные колебания уровня в Охотском море весьма значительны и оказывают существенное влияние на его гидрологический режим. Особенно высокие приливы (более 5 м) наблюдаются в крайней западной (Удская губа) и северной (Пенжинская губа) частях моря. Высота прилива в вершине Пенжинской губы достигает рекордных для всего российского побережья отметок в 11 – 12 м. Большие амплитуды приливов способствуют развитию мощных приливных течений, особенно интенсивных в проливах, узостях и у берегов. Например, в некоторых Курильских проливах скорости приливных течений доходят до 2 – 4 м/сек. В связи с этим, эффект воздействия цунами на многих участках побережья в сильной степени зависит от состояния и фазы прилива, что *необходимо учитывать при цунамирайонировании и оперативном прогнозе.*

Кроме приливов здесь весьма обычными являются и стонно-нагонные колебания уровня, возникающие при прохождении глубоких циклонов над морем. Нагонные повышения уровня могут достигать 1,5 – 2 м. Наибольшие нагоны отмечены на западном побережье Камчатки и в заливе Терпения.

2.1. Сведения об исторических цунами в Охотском море.

Данные по проявлениям цунами в Охотском море весьма скудны, следует, однако, заметить, что их *поиском по первоисточникам до сих пор никто систематически не занимался.*

По-видимому, самым первым известным упоминанием о проявлении цунами в Охотском море следует считать сообщения С.П.Крашенинникова о катастрофическом *Камчатском землетрясении 1737 года*, с которого начинается сейсмический каталог всего Дальнего Востока. Очаг землетрясения располагался у восточного побережья Камчатки, примерно в той же области, которая спустя 215 лет была активирована очагом *Камчатского землетрясения 1952 года*³. Оба события, несомненно, относятся к классу мега-землетрясений (с магнитудой 9,0 или выше) и оба вызвали разрушительные цунами на ближайших к очагу участках побережья. Сейсмический потенциал обоих событий (Рисунок 2.2) был достаточен для возбуждения трансокеанского цунами, и в 1952 году это действительно имело место – волна высотой до 9 м наблюдалась на восточной окраине о-ва Оаху (Гавайские острова), на побережье Южной Америки (Лос Вилос, Чили) волны достигали 3-метровой высоты. По 1737 году таких данных нет, хотя при целенаправленном поиске в местных архивах свидетельства о необычной волновой активности вполне могут быть обнаружены.

Стоит напомнить, что локальные высоты цунами 1737 г. были втрое выше высот цунами 1952 года. По описаниям С.П.Крашенинникова (Крашенинников, 1994) в 1737 году максимальная высота заливания на острове Парамушир достигала 63 м (30 саженьей). В районе Авачинского залива наблюдались волны высотой до 30 м. На западной стороне Камчатки цунами было, конечно, существенно

³ Здесь и ниже изложение иллюстрируется картинками «свечений» от модельных источников с магнитудой $M_w = 9,0$

слабее. В 25 км южнее Большерецка волны свободно перекачивались в озеро, соединенное протокой с р. Большой. Возможная высота волн 2 – 5 м.

Данных о проявлениях в Охотском море второго сильнейшего *Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 года* несколько больше, но и они являются далеко не полными. На западной стороне мыса Лопатка (крайняя южная оконечность Камчатского полуострова) высота волн достигала 5 м, при этом на океанском побережье мыса наблюдались волны высотой 10 м. В пос.Озерное – от 3 до 5 м, в пос.Колпаково – 0,5 м (Исторические сведения..., 1998).

На западном побережье мыса Васильева (о.Парамушир) наблюдались волны высотой до 4,5 м (с океанической стороны при этом – до 6,6 м), в поселке Шелехово на северном побережье острова – от 3 до 6 м, на о-ве Алаид высота волн достигала 1,5 м, на Сахалине (Корсаков) – 1 м, в Магадане – 2 м (Соловьев, 1978). Последнее наблюдение является очень важным, как с точки зрения оценки возможных высот на континентальном Охотском побережье при сильнейших региональных землетрясениях, так и с точки зрения проверки адекватности численных моделей региональных цунами. К сожалению, это наблюдение является единичным, неизвестно, к какому конкретно пункту в районе Магадана оно относится, какая конкретно величина была измерена (данные мареографа, высота заплеска на берегу или максимальная амплитуда на уресе). Между тем, тщательный поиск в местных архивах, а также сообщения очевидцев события, возможно еще живущих в Магадане, могли бы дополнить и уточнить эту критически важную информацию.

Чилийское цунами 1960 года было вызвано сильнейшим ($M_w = 9,5$) за весь инструментальный период сейсмологических наблюдений землетрясением у побережья Чили (Рисунок 2.3). На самом чилийском побережье максимальные высоты волн составляли 15 – 20 м, т.е не достигали экстремальных значений 40 – 50 м, измеренных, например, на ближайших участках побережья после Индонезийского землетрясения 2004 года и землетрясения Тохоку 2011 года. Причиной этого, по-видимому, является расположение части очаговой области в пределах береговой черты. Максимальная высота наката в 25 м была измерена на расположенном в 50 км от побережья небольшом чилийском острове Моча. Землетрясение, однако, вызвало трансокеанское цунами, которое распространилось на весь Тихий океан и достигло его противоположных берегов, сохранив свой разрушительный потенциал. Средние высоты наката на всем протяжении восточного побережья Японии составляли 3 – 4 м, погибло 114 человек и 90 пропало без вести, 1 233 дома было полностью разрушено, свыше 3 500 серьезно повреждено (The Chilean Tsunami..., 1961).

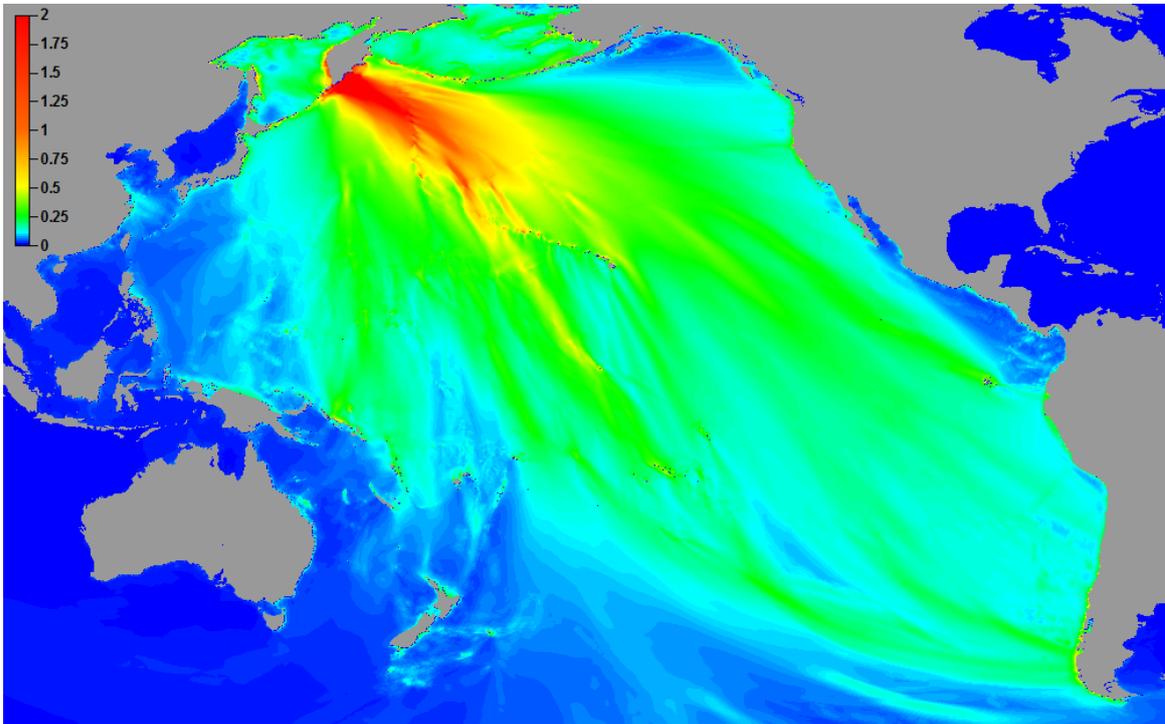


Рисунок 2.2 Распределение максимальных амплитуд (положительных), рассчитанных за 48 часов физического времени распространения волны цунами, порожденной источником модельного землетрясения с магнитудой $M_w = 9,0$, ближайшим к источникам исторических «камчатских» землетрясений 1737 и 1952 гг. Индекс модельного землетрясения в перечне «удаленных» 89, а в перечне «ближних» – 4а.

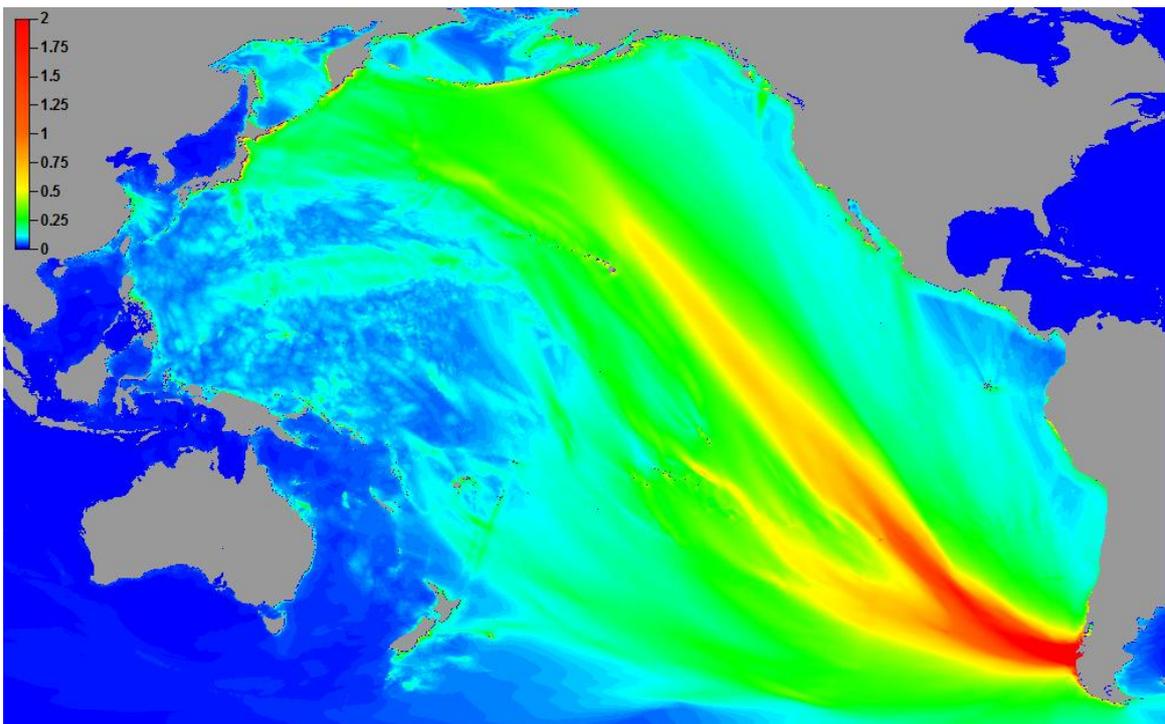


Рисунок 2.3 Распределение максимальных амплитуд (положительных), рассчитанных за 48 часов физического времени распространения волны цунами, порожденной источником модельного землетрясения с магнитудой $M_w = 9,0$ ближайшим к источнику исторического «чилийского» землетрясения 1960г. Индекс модельного землетрясения в перечне «удаленных» 45.

На Дальневосточном побережье РФ максимальные высоты заплеска, достигавшие 7 м, были измерены на восточном побережье Камчатки в бухтах Моржовая и Русская (Заякин, 1996). Наблюдатель в бухте Моржовой отметил, что максимальной по высоте была пятая волна. Перед ее приходом дно бухты обсохло на

расстояние более 300 м от уреза. Отсюда можно заключить, что размах колебаний уровня в бухте Моржовой достигал как минимум 10 м.

Сквозь курильские проливы цунами проникло в Охотское море и вызвало значительные колебание его уровня, продолжавшиеся более двух суток. Мареограф в бухте Нагаева зафиксировал пять волн высотой до 2,2 м (Важенин, 2010). Первое понижение уровня (на 50 см) было зафиксировано в 02 час 10 мин моск. времени. Затем наблюдалось резкое понижение уровня на 202 см с последующим подъемом в 04 час на 142 см. В дальнейшем в бухте Нагаева в течение двух суток (24 и 25 мая) происходили колебания уровня с периодом собственных колебаний бухты (около 1 час 10 мин) и амплитудой до 2 м. Максимальная положительная амплитуда (214 см) наблюдалась в 06 час 40 мин. 24 мая около 06 час катер, стоявший на якорю в вершине бухты, лег на грунт. Глубина в месте стоянки была 3,5 м. Стоявшие на якорях в морском порту катера и баржи поднимались и опускались на грунт. Был отмечен неестественно быстрый дрейф льда в сторону вершины бухты, несмотря на отлив и отсутствие ветра. Бухта и порт были заполнены крупнобитым льдом до 8 баллов (Исторические сведения..., 1998). На ГМС "Ушки" Колымского УГМС в 08 час 09 мин (мск) наблюдались две волны каждая амплитудой более м (Исторические сведения ..., 1998). В пос. Усть-Хайрюзово было отмечено долгое стояние воды на приливе (Заякин, 1996).

Высота волн этого цунами на побережье Сахалина оказалась существенно меньшей и составила в Корсакове 1,2 м, в Поронайске – 0,8 м, в Катангли – 0,6 м, на мысе Крильон – 0,4 м, в Холмске – 0,1 м (Соловьев, 1978).

Средние высоты чилийского цунами 1960 года по всей периферии Тихого океана были в диапазоне от 1,5 до 3 м. По сообщениям очевидцев (Моделирование и анализ ..., 2011) на побережье Корякии волны достигали высот 4 – 5 м. Учитывая, что все побережье Охотского моря находится в створе главного максимума распространения энергии этого цунами, можно полагать, что фактические высоты заливания на большом протяжении Колымского побережья могли достигать нескольких метров. Здесь также необходим целенаправленный поиск в архивах и расспросы очевидцев, находившихся в момент цунами в других точках побережья, которые могут позволить восстановить полную картину проявления на Охотоморском побережье России чилийского цунами 1960 года, крупнейшего за весь XX век во всем Тихом океане.

Второе сильнейшее трансокеанское цунами XX века – *Аляскинское 1964 года* имело слабое проявление на дальневосточном побережье России. Максимальная высота подъема уровня составила 1 м (в Подгорном, на восточном побережье о-ва Парамушир), в Северо-Курильске мареограф записал волны высотой 0,8 м, на о-ве Шумшу (Бабушкино) – 0,7 м (Соловьев, 1978). Основной причиной этого является положение и ориентация очага этого землетрясения, при которой максимум энергии цунами распространялся в южном направлении (Рисунок 2.4). На Сахалине максимальная высота волн этого цунами была зарегистрирована в Корсакове (0,4 м). По охотскому побережью данных о проявлениях этого цунами нет.

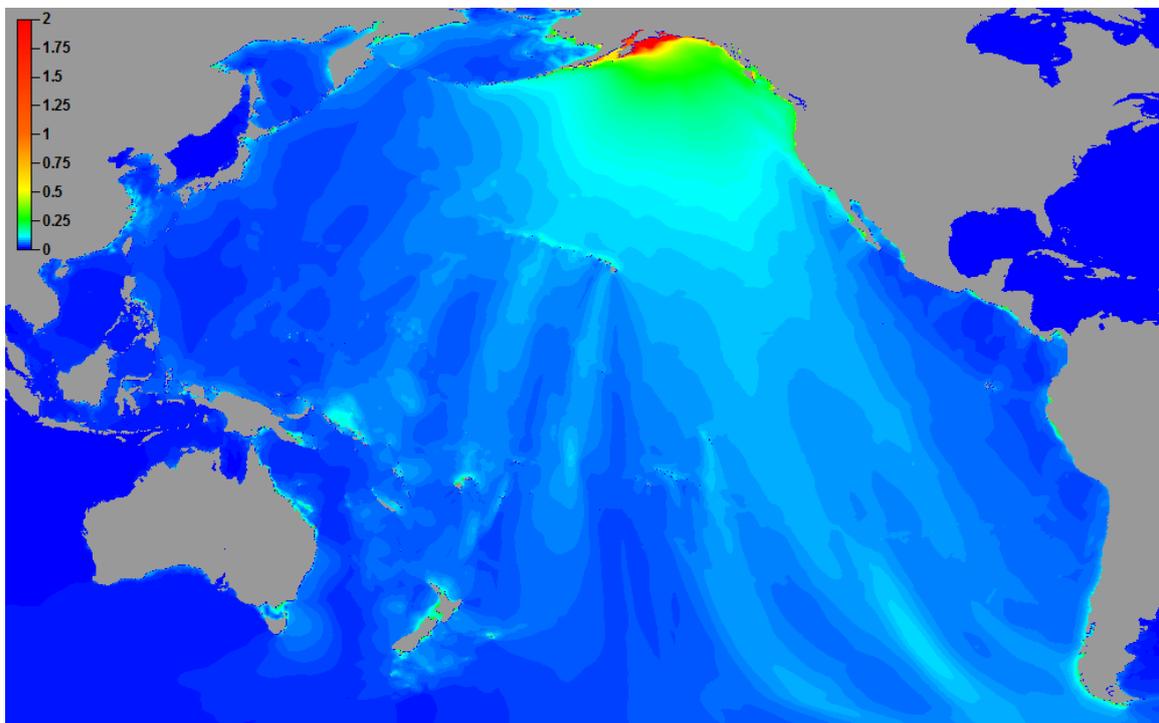


Рисунок 2.4 Распределение максимальных амплитуд (положительных), рассчитанных за 48 часов физического времени распространения волны цунами, порожденной источником модельного землетрясения с магнитудой $M_w = 9,0$, ближайшим к источникам исторического «аляскинского» землетрясения 1964 г. Индекс модельного землетрясения в перечне «удаленных» 8.

Последнее по времени трансокеанское цунами – Тохоку 2011 года (Рисунок 2.5) – вызвало опасные колебания уровня на восточном побережье Курильских островов и Камчатки, продолжавшиеся в ряде мест более суток. Максимальные высоты волн (до 3 м) отмечены в бухте Крабовая на западном берегу о-ва Шикотан, при этом на его восточном побережье уровни заливания не превышали 1,5 м. В Мало-Курильске мареограф записал колебания с размахом до 2,3 м (Кайстренко и др., 2011). Максимальное заливание в Северо-Курильске достигало 2,5 м, в Буревестнике (о-в Итуруп) – 2 м. В бассейне Охотского моря наблюдались только фоновые колебания уровня – максимальные высоты волн по записям мареографов были 0,53 м (Курильск), 0,42 м (Корсаков), 0,44 м (Поронайск). По магаданскому побережью данных нет. В этом случае также причиной малых колебаний является нахождение всего бассейна далеко в стороне от главного максимума распространения энергии этого цунами, ориентированного в юго-восточном направлении.

Таким образом, анализ проявлений в Охотском море сильнейших трансокеанских цунами показывает, что опасными для него могут быть только очаги цунамигенных землетрясений класса M_9 , расположенные непосредственно у южного побережья Камчатки и в районе Курильской гряды. Что касается удаленных очагов сильнейших землетрясений, то из всего тихоокеанского сейсмического пояса наиболее опасны южно-американские землетрясения, способные вызвать колебания уровня с размахом до 5 м по всему побережью Охотского моря (что фактически и произошло в мае 1960 года).

Результаты численного моделирования удаленных цунами (Моделирование и анализ ..., 2011) показывают, однако, что возможна еще одна зона (Новая Гвинея, Соломоновы острова), очаги в которой (Рисунок 2.6) могут быть опасны для нашего Дальневосточного побережья. В силу особенностей распространения

энергии цунами, один из боковых лепестков диаграммы направленности при этом оказывается ориентирован в сторону Курило-Камчатского побережья.

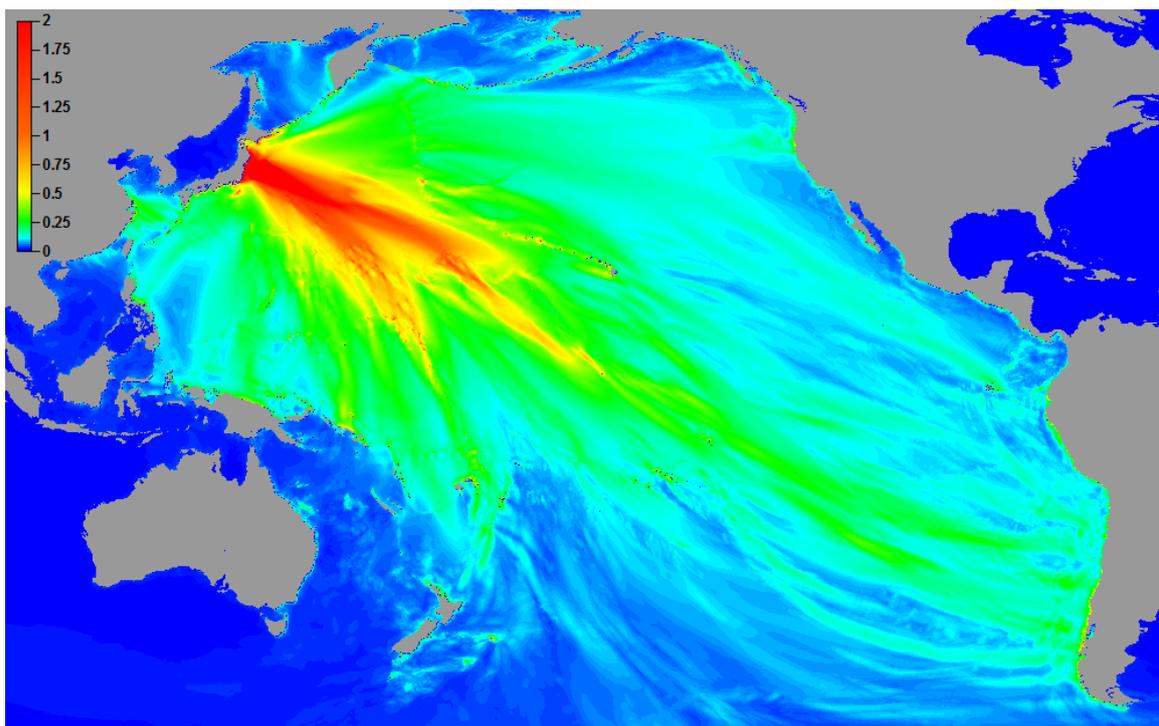


Рисунок 2.5 Распределение максимальных амплитуд (положительных), рассчитанных за 48 часов физического времени распространения волны цунами, порожденной источником модельного землетрясения с магнитудой $M_w = 9,0$, ближайшим к источнику исторического «японского» землетрясения (Тохоку) 2011 г. Индекс модельного землетрясения в перечне «удаленных» 85.

Особенностью воздействия удаленных цунами является то, что волны с примерно одинаковыми высотами заливают практически все побережье, не имея четко выраженного максимума, характерного для местных региональных землетрясений. Именно поэтому для периферийных участков побережья Тихого (и всех других океанов), не имеющих в непосредственной близости перед собой зон субдукции, основной вклад в цунамиопасность вносится удаленными трансокеанскими цунами, порождаемыми субдукционными мега-землетрясениями с магнитудой порядка 9 и выше. При этом основной задачей становится оценка периода повторяемости таких мега-землетрясений как в целом по океаническому бассейну, так и для отдельных цунамигенных зон. Выявление же относительной опасности различных удаленных зон по отношению к конкретному побережью может быть достаточно надежно сделано методами численного моделирования распространения цунами. По отношению в Дальневосточному побережью РФ в целом такая работа была выполнена в рамках договора с НПО "Тайфун" 2011 года (Моделирование и анализ ..., 2011).

Рассмотрим теперь вопрос о возможности проникновения в Охотское море волн цунами, порожденных региональными цунамигенными землетрясениями, возникающими на континентальном склоне Курильской островной дуги. Одно из сильнейших таких землетрясений произошло 7 ноября 1958 года перед островом Итуруп. Несмотря на значительную магнитуду ($M_s = 8,1$), максимальная высота заплеска на ближайшем берегу составила лишь 5 м (Соловьев, 1978). Мареограф в Корсакове записал колебания уровня с размахом до 0,2 м. По охотскому побережью данных нет.

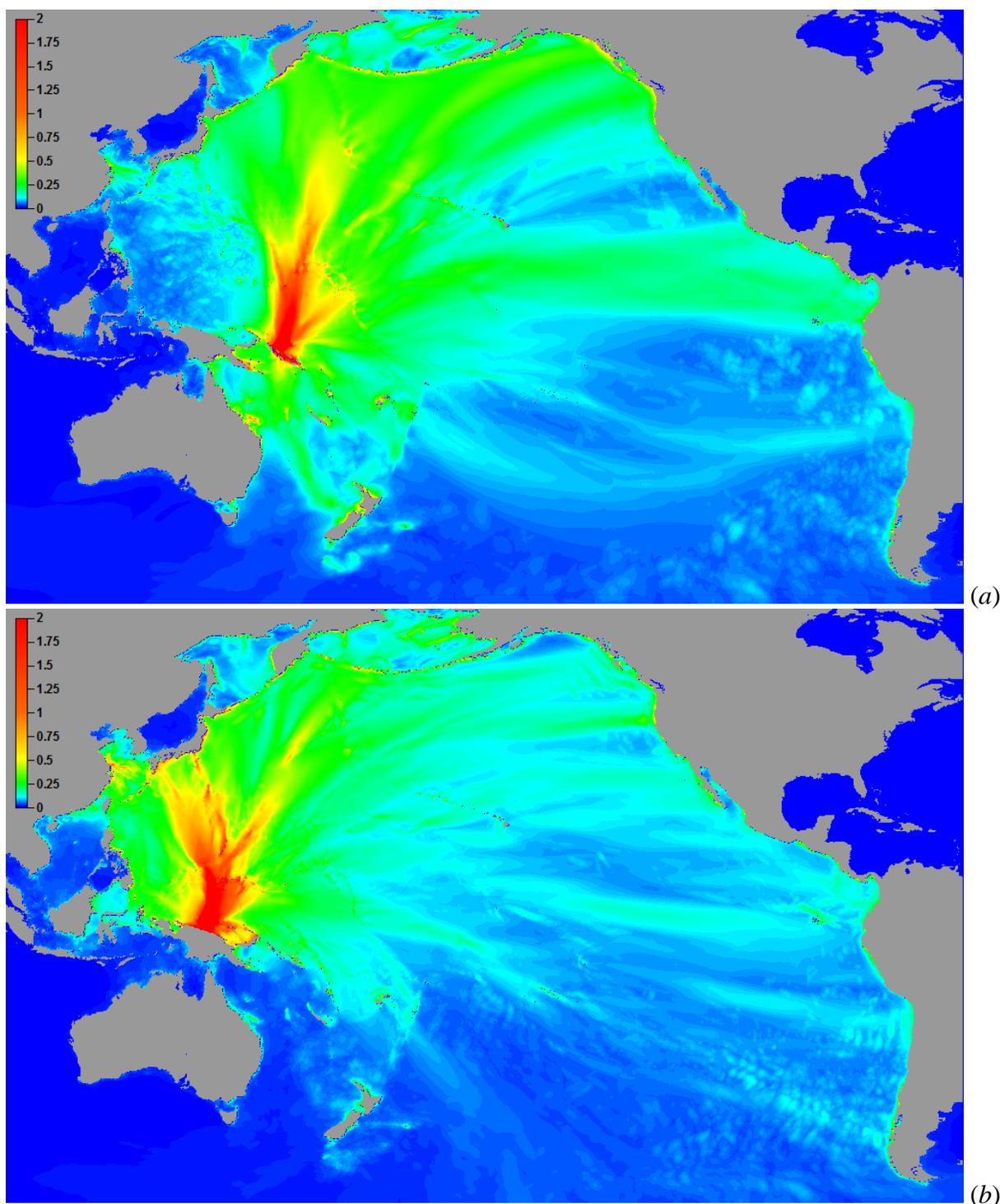


Рисунок 2.6 Распределения максимальных амплитуд (положительных), рассчитанных за 48 часов физического времени распространения волн цунами, порожденных источниками модельных землетрясений с магнитудой $M_w = 9,0$, расположенными вблизи Папуа-Новой Гвинеи (a) и Соломоновых островов (b). Индексы соответствующих модельных землетрясений в перечне «удаленных» 67 и 71.

Следующие сильные подводные землетрясения произошли возле о-ва Уруп 13 и 20 октября 1963 года. Магнитуда первого толчка оценивается величиной 8,1, оно вызвало 5-метровое цунами на ближайшем берегу. Сейсмический эффект второго землетрясения был гораздо ниже (его магнитуда 7,2), но цунами на ближайшем берегу достигло 15-метровой отметки. Позднее, второе землетрясение было идентифицировано как типичный случай *цунами-землетрясения* (Kanamori, 1972), способного вызывать аномально сильные волны цунами при умеренной

магнитуде. В Курильске от первого землетрясения мареограф зафиксировал подъем уровня до 0,7 м, на Сахалине колебания с амплитудой 0,4 м были записаны в Корсакове, Катангли, на мысе Крильон. Волны были также зафиксированы мареографами в Магадане (0,1 м) и в Аяне (0,2 м). Волны от второго землетрясения (20 октября) в тех же пунктах были существенно ниже – в Курильске 0,3 м, в Корсакове, Катангли и на мысе Крильон – 0,1 м (Соловьев, 1978). По Магадану и Аяну данных нет. Этот случай является одним из многочисленных примеров того, что максимальные волны в ближней зоне весьма слабо коррелируют с высотами цунами в дальней зоне, высота которых контролируется другими факторами (главным образом, общей энергией источника), отличными от тех, что ответственны за возникновение максимальных заплесков на ближайшем берегу.

В районе Южных Курил два сильных цунамигенных землетрясения произошли практически в одном и том же районе – на участке континентального склона, прилегающего к острову Шикотан, 11 августа 1969 года ($M_w=8,2$) и 4 октября 1994 года ($M_w=8,3$). Максимальные высоты заплеска на ближайшем побережье (восточный берег о-ва Шикотан) от них составили 5 м и 10,4 м, соответственно. Оба эти цунами также вызвали только фоновые колебания уровня Охотского моря. В 1969 году мареограф Курильска записал волну с высотой 0,6 м, мареографы Корсакова – 0,25 м, Крильона – 0,3 м. В 1994 году максимальная высота волн на записях в Курильске составила 0,2 м, в Корсакове мареограф не работал, данных по м. Крильон обнаружить не удалось. По охотскому побережью данных по этим двум событиям нет.

Наконец, последние по времени сильные цунамигенные землетрясения произошли в центральной части Курильской гряды. Это Симуширские землетрясения *15 ноября 2006 года* ($M_w=8,3$) и *11 января 2007 года* ($M_w=8,1$). В этот период постоянного населения на ближайших к очагам островах (Симушир, Кетой, Расшуа, Матуа) уже не было, поэтому данные о накатах волн были получены в результате экспедиционного обследования, выполненного летом 2007 года. Наиболее высокие заплески, достигавшие 20 м, были выявлены на восточном побережье о-ва Матуа. По ряду признаков они были ассоциированы с цунами от первого землетрясения (15 ноября 2006 года). Считается, что волны от второго землетрясения были в несколько раз слабее и на ближайших островах не превышали по высоте нескольких метров (Лобковский и др., 2009). Соотношение высот этих двух цунами, записанных мареографами в дальней зоне, не столь контрастно. На записях двух глубоководных датчиков системы DART (21414 и 46413), установленных вдоль Алеутской дуги, оно составляет 1,3 – 1,5. Для атолла Уэйк это соотношение равно 1,5 (0,12 м, и 0,08 м), для атолла Мидвэй – 2,4 (0,47 м, и 0,19 м).

Волны цунами от землетрясения 15 ноября 2006 г. были четко записаны мареографом в Магадане в виде цуга из 8 – 10 волн с плавным вступлением, имевших период около часа и максимальный размах 63 см. Второе цунами на записях мареографа Магадана идентифицировать не удалось из-за низкого соотношения сигнал/шум (Лобковский и др., 2009). Это цунами, будучи, очевидно, более слабым по сравнению с первым, хорошо прописалось только на ближайших к очагу мареографам в Мало-Курильске и Южно-Курильске (где, оно, кстати сказать, имело сравнимые с первым амплитуды).

На северо-восточном побережье Сахалина из-за отсутствия работающих мареографов инструментальных записей обоих Симуширских цунами получено не было.

Опубликованных данных о записях этого цунами на мареографах Магадана, Охотска и Аяна найти не удалось. Очевидно, однако, что цунами от первого землетрясения (15 ноября 2006 года), даже если оно и проникло в Охотское море, было там весьма слабым и не причинило какого-либо ущерба.

Из вышеприведенного анализа можно сделать вывод, что цунамигенные землетрясения с магнитудами 7,5 – 8,5, возникающие на континентальном склоне Курильской дуги, не представляют серьезной опасности для охотоморского бассейна. Возникающие цунами через проливы способны проникать в Охотское море, однако доля их энергии составляет лишь незначительную часть от общей энергии, переданной землетрясением в водную толщу. Эта энергия достаточно быстро рассеивается на обширной акватории Охотского моря. Исключением являются лишь предельно сильные (класса М9) землетрясения, подобно происшедшим в 1737 и 1952 гг. у побережья Камчатки и в 2011 году у побережья Японии. Энергия возникающих от них цунами столь велика, что она способна вызывать резонансные колебания всего бассейна окраинного моря, которые могут продолжаться несколько суток (Рисунок 2.7). Они в свою очередь, способны вызвать резонансное взаимодействие с модами собственных колебаний прилегающих участков шельфа, отдельных бухт и заливов, результатом чего могут являться сильные течения и заливания берегов на высоты до нескольких метров. Причем времена наступления максимумов таких колебаний зависят от многих факторов, в частности, погодных условий и фазы прилива, поэтому они являются труднопрогнозируемыми и могут возникнуть спустя много часов (и даже суток) после прихода первого возмущения.

Рассмотрим теперь случаи возникновения цунами от сейсмических источников, расположенных собственно в бассейне Охотского моря. Несмотря на то, что Курило-Камчатская сейсмофокальная зона продолжается далеко вглубь Охотского моря, ее наклон в горизонту приводит к тому, что уже в ближайшей задуговой части зоны глубины очагов возрастают до 80 – 100 км, что резко снижает их цунамигенный потенциал. Фактически, *достоверные случаи возникновения цунами от подводных землетрясений с очагами на западной стороне Курильской островной дуги, в Дальневосточном каталоге цунами отсутствуют.*

Единственный известный случай упомянут в японском каталоге цунами. Это землетрясение с магнитудой 6,2, происшедшее 5 марта 1956 года на глубине 20 км вблизи северного побережья о-ва Хоккайдо, от которого мареограф в Абашири записал волну высотой 0,4 м (Iida, 1984). Данных о регистрации этого цунами мареографами на Сахалине нет.

Из собственно сахалинских землетрясений, очаги которых могут быть отнесены к акватории Охотского моря, в дальневосточном каталоге цунами имеются всего два. Первое это землетрясение с $M=6,8$, случившееся 15 марта 1924 года в районе Углегорска, после которого было отмечено «сильное волнение воды в реке» (Соловьев, 1978). Второе – это разрушительное Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 года с $M_s = 7,5$, после которого мареографом были зафиксированы волны высотой до 0,1 м.

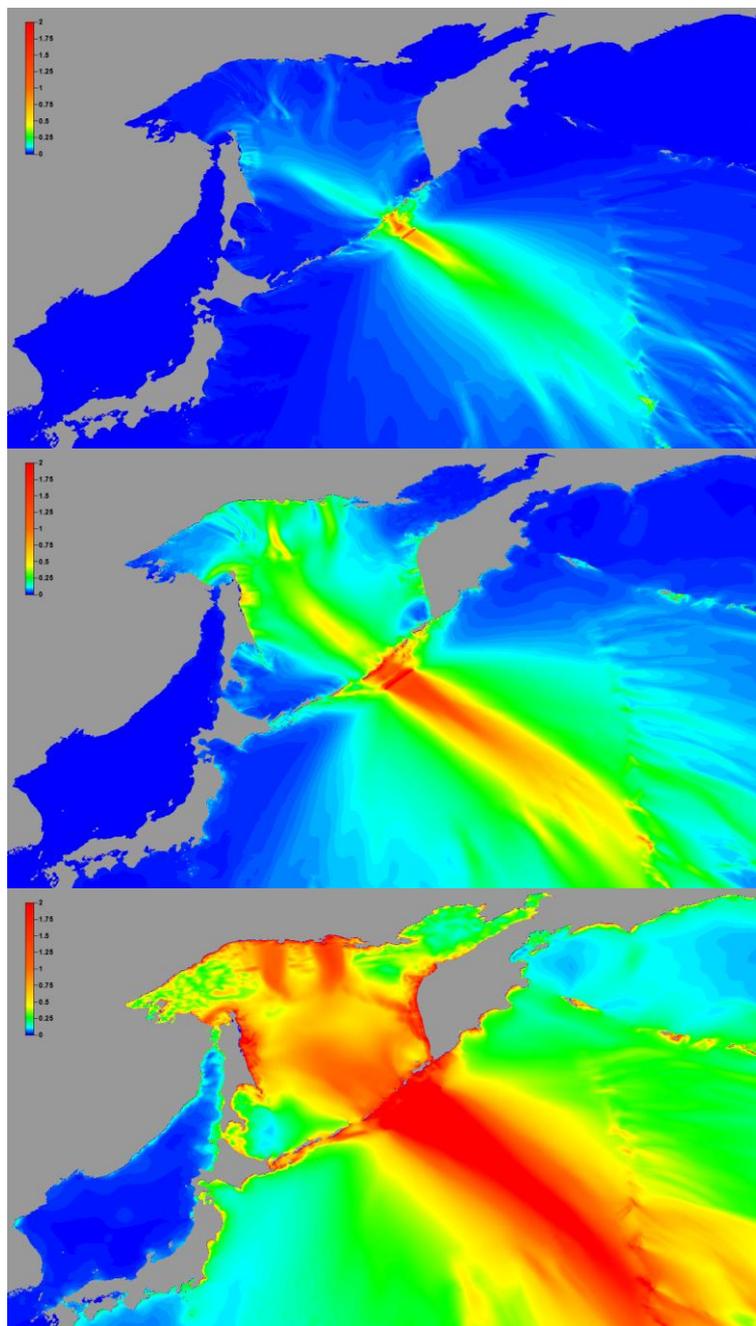


Рисунок 2.7 Диаграммы свечения для модельных очагов с магнитудой $M_w = 7,8$ (вверху), $8,4$ (в центре) и $9,0$ (внизу), расположенных в районе пролива Крузенштерна. Степень проникновения цунами в Охотское море резко возрастает с увеличением мощности источника. Усиливается также захват волновой энергии шельфами Сахалина, Камчатки и охотского побережья *в районе Магадана и Охотска).

Инструментально зарегистрированная сейсмичность собственно охотоморского шельфа является весьма слабой. Наивысшая магнитуда, зарегистрированная здесь за весь период инструментальных наблюдений не превышает $6,6$ (землетрясение 15 июля 1931 года в районе Магадана). Землетрясения такой магнитуды сами по себе не способны вызывать опасное цунами (пороговым значением магнитуды для дальневосточной СПЦ является величина $7,0$), однако, они могут инициировать подводный оползень или береговой обвал, результатом которого могут быть волны цунами практически любой высоты. В данном отчете, посвященном анализу цунами сейсмогенного происхождения, на предупреждение о которых собственно и ориентирована дальневосточная СПЦ, цунами другого происхождения не рассматриваются.

При рассмотрении сейсмичности в более широком временном интервале, основанном на макросейсмических наблюдениях, выясняется, что в прошлом в районе побережья происходили значительно более сильные землетрясения. Например, Ямское землетрясение 27 ноября 1851 года с магнитудой (согласно "Новому каталогу") равной $6,5 \pm 0,5$ (Новый каталог..., 1977), происшедшее в 150 км к востоку от Магадана. Еще более сильные голоценовые землетрясения, с магнитудой до 7,5 выявлены по палеосейсмологическим данным (Важенин, 2000).

По результатам дешифрирования космоснимков выявлена система правосторонних сдвигов (Рисунок 2.8), проходящая от Магадана до Эвенска вдоль западного побережья залива Шелехова (Ланково-Омолонская зона), способная продуцировать землетрясения с магнитудой до 7,5 (Кожурин, 2012). Сама по себе зона находится целиком в пределах суши, однако, любое сильное землетрясение в этой зоне, в силу ее близости к побережью вполне способно вызвать сейсмообвалы на побережье, которые в свою очередь могут генерировать опасные цунами. И такие обвалы действительно происходили в недавнем геологическом прошлом. По результатам геоморфологических и палеосейсмологических исследований охотоморского побережья выявлено свыше двух десятков береговых обвалов с объемами от сотен тысяч до 70 млн. куб. км (Алексеев и др., 1975; Уфимцев, 1993; Важенин, Лебединцев, 2001; Важенин, 2011). В долинах рек Дукча и Магаданка, на удалении около 1,5 км от моря, выявлены хаотичные супесчаные с включением гравия и галек, отложения, разделенные прослоями торфа, которые с большой вероятностью можно интерпретировать как цунамигенные. Источниками цунами для них могли быть древние береговые обвалы Черный-6 и Восточный-0,3 (числа в названии обвалов означают их объемы в млн. м³), возникшие на бортах бухт Гертнера и Веселая (Важенин, 2008).

Цунами, возникающие при такого рода береговых и подводных обвалах, носят, как правило, локальный характер, однако, высота заплеска при этом может быть сколь угодно большой. Широко известен случай возникновения волны высотой 525 м, возникшей при сейсмообвале объемом до 30 млн. м³ в заливе Литуйя (Аляска) 9 июля 1958 года (Miller, 1960). Обвал был инициирован землетрясением магнитудой 7,9 с эпицентром в 30 км к востоку от самой бухты. Менее известны другие случаи возникновения гигантских обвальных цунами в том же заливе, происшедших в 1936 (150 м), 1899 (60 м), 1874 (24 м) и 1853 (120 м) годах (Lander, 1976). Интересно отметить, что тогда как случаи обвалов в 1958 и 1899 гг. были связаны с сильными землетрясениями, обвальные цунами в этом же заливе 1936, 1874 и 1854 гг. произошли в сейсмически спокойные периоды.

Цунами обвального типа периодически происходят на фьордовом западном побережье Норвегии. Так, 13 сентября 1906 года при обвале участка склона фьорда Лоён, возникла волна высотой 40 м, жертвами которой стал 61 человек. 13 апреля в том же самом фьорде возник другой обвал, инициировавший волну высотой 70 м, которая убила 73 человека. 7 апреля 1934 года обвал объемом до 3 млн. м³, обрушившийся в залив Тафьорд с высоты около 700 м, вызвал волну высотой до 65 м. Волна разрушила отель, стоявший на противоположном берегу фьорда, в котором погибли 40 человек. Один из последних случаев такого типа произошел 21 апреля 2007 года на юго-западном побережье Чили, когда в результате землетрясения умеренной силы ($M=6,3$) возник береговой обвал в узком заливе Аусьен. Обвал инициировал волну высотой в эпицентре до 14 м, которая

распространилась вплоть до вершины залива, сохраняя при этом высоту до 6 м и привела к гибели 10 человек, работавших в этот момент на гидроплантациях по выращиванию лосося (Enriquez, 2007).

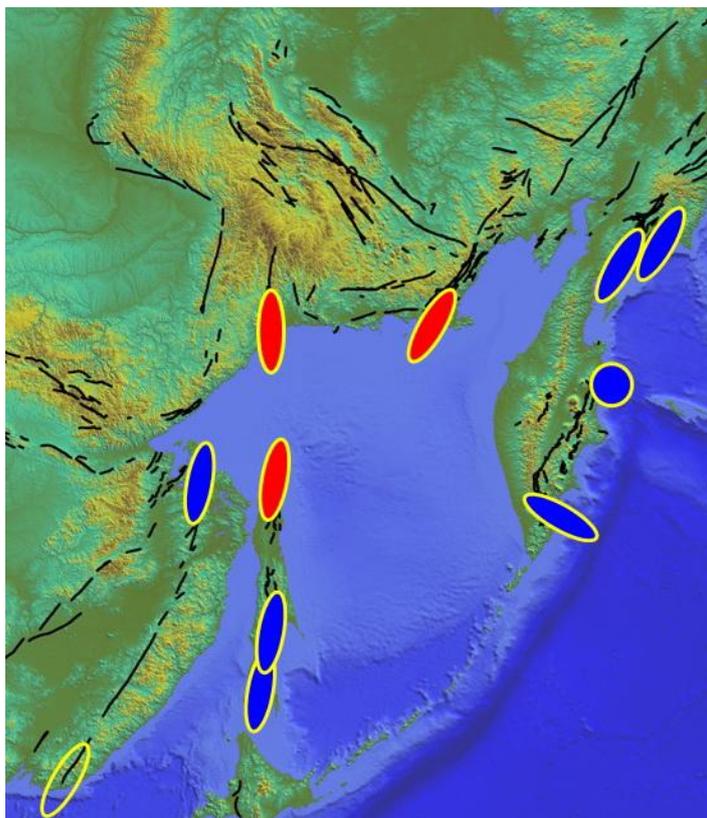


Рисунок 2.8. Активные разломы на востоке и Северо-Востоке Азии, выделяемые по данным дешифрования космоснимков. Эллипсами показаны возможные цунамигенные землетрясения с очагами по этим разломам (Кожурин, 2012)

Катастрофическая обвальная волна возникла 9 октября 1963 года в водохранилище Вайонт в северной Италии, после обвала участка крутого берегового склона, возникшего в 22:19, вызванного трехдневными сильными дождями. Объем обвала оценивается величиной в 260 млн. м³ (при объеме самого водохранилища 120 млн. м³), что вызвало гигантскую волну высотой 235 м в верхнем бьефе. Около 50 млн. м³ воды перехлестнуло через бетонную плотину (имевшую от подножия высоту 262 м и бывшую на тот момент самой высокой монолитной бетонной плотиной в мире) и устремилось вниз по долине реки Вайонт. Катастрофический водный поток полностью разрушил находившиеся ниже плотины городок Лангароне и деревни Пираго, Ривалта и Вилланова, оставив на их месте лишь ровные, залитые грязью и илом площадки. В течение нескольких минут погибло около 2 000 человек (по другим данным 2 500 человек), не успевших даже понять, что фактически произошло (Wiegel et al., 1970; Panizzo et al., 2005). Эта трагедия считается связанной с одним из крупнейших в истории человечества инженерных просчетов – с недооценкой местных геологических условий при реализации крупного гидротехнического проекта (International Year..., 2008).

Опасными являются не только береговые обвалы и обрушения скальных пород у береговой черты, но и нарушения стабильности ледников и глетчеров, спускающихся с береговых склонов к воде. Например, 50-метровая волна возникла 21 ноября 2000 года после внезапного обрушения края ледника, спускавшегося в море вблизи местечка Паатуут на западном побережье Гренландии. Ею было

повреждено десять находившихся в бухте небольших судов. В 1995 году в небольшой бухте на восточном побережье Гренландии 6-метровая волна, возникшая после обвала кромки айсберга, плававшего в море на удалении примерно полукилометра, выбросила на берег и повредила множество лодок и катеров, отшвартованных и стоявших на якоре в этой бухте.

Как отмечалось выше, значительная часть акватории Охотского моря покрыта сплошным льдом в течение большей части года (6 – 7 месяцев). Это создает дополнительные опасности как для находящихся на нем людей, так и для сооружений вблизи береговой черты. Взаимодействие цунами со льдом изучено еще недостаточно, однако известные факты заставляют отнестись к этому со всей серьезностью.

Так, например, после цунами Тохоку 2011 года в Японии появились сообщения НАСА о том, что докатившаяся до берегов Антарктиды волна оторвала от шельфового ледника множество айсбергов (Агентство ИА REX, 10 августа 2011 г.). Высота волн, преодолевших более 13 тыс. км, была всего лишь около 30 см (т.е. менее размаха прилива), однако этого оказалось достаточно, чтобы отколоть от шельфового ледника Сульцебер несколько айсбергов, один из которых по площади оказался равным площади Манхэттена (87,5 км²). Общая площадь отколовшихся кусков составляет около 175 км². Как отметили специалисты NASA, шельфовый ледник Сульцебер был стабилен, по крайней мере, последние 65 лет.

Проявление этого цунами на Курильском побережье также повсеместно сопровождалось взломом берегового припая и выносом льда на берег. Так, в поселке Крабозаводское на о-ве Шикотан вода занесла тяжелые льдины в центральную часть поселка, перегородив ими ул. Торговую. В Малокурильской бухте вынесенными на берег льдинами была загромождена территория автобазы рыбокомбината "Островной" (Кайстренко и др., 2011).

Накат волн цунами на заснеженное побережье также имеет свои особенности. Одним из таких редких случаев (подавляющее большинство цунами происходят в странах умеренного и жаркого климата) является Камчатское цунами 13 апреля 1923 года. Его особенностью была большая глубина заливания (до 4 км вглубь суши). В результате детального исследования цунамигенного осадочного слоя удалось показать, что такая глубина проникновения цунами явилась следствием наличия в тот момент снежного покрова на поверхности Усть-Камчатской равнины, на которой в это время года (середина апреля) образуется плотный фирн (Minoura et al, 1996). Этот случай явился одним из немногих примеров выхода волн цунами на заснеженное побережье, что резко изменяет условия взаимодействия волн с берегом и диссипацию волновой энергии при накате. Другим негативным эффектом при этом цунами явилось долгое (в течение суток) стояние воды залившей прибрежную равнину, что также было обусловлено наличием снега на поверхности суши.

Редкий случай возникновения цунамиподобных волн в большом, покрытом льдом заливе описан В.И.Семеновым (Семенов, 1985). В апреле 1939 года он пошел на лыжах из Петропавловска-Камчатского на противоположный берег Авачинского залива, покрытого в это время толстым слоем сплошного льда. Находясь на льду, примерно в полутора километрах от берега, он внезапно увидел впереди ледяной вал высотой около 2 м, двигавшийся с юго-западного направления и полностью скрывший собой противоположный берег бухты. Валу предшествовало

понижения уровня, так что общая высота "ледяной волны" было порядка 3 – 4 м. Во время прохождения вала было трудно стоять на ногах, так что он вынужден был снять лыжи и лечь на них. В этот день, по его воспоминаниям, не было никакого ощутимого землетрясения или вулканической активности. Возможным механизмом для возмущения водной поверхности бухты могло являться возникновение подводного оползня в дельтовом конусе выноса Авачи или другой речки, впадающей в бухту.

9 апреля 2009 г. в бухте Гертнера при безветренной штилевой погоде произошло внезапное дробление ледового припая шириной около 1 км. На битом льду оказалось 18 автомашин с рыбаками. Местами наблюдалось фонтанирование воды из лунок высотой до 2 – 3 м (по сообщениям очевидцев, аналогичный эффект на ледовом припае отмечался и при подходе цунами Тохоку 2011 года к побережью Кунашира). Каких-либо сейсмических событий, коррелирующихся по месту и времени с дроблением льда, не обнаружено (Важенин, 2010).

Другим потенциально опасным источником цунами в бассейне Охотского моря могут являться взрывы и обрушения кальдер островных и прибрежных вулканов Курило-Камчатской зоны. По современным данным в восточной части бассейна выявлено около 110 подводных вулканов, располагающихся вдоль охотоморской стороны Курильской гряды (Международный геолого-геофизический..., 2003). Там же имеется 10 вулканических островов, представляющих собой подводные вулканы, кратеры которых выступают над водной поверхностью (Важенин, 2006), на многих из них имеются следы неоднократных катастрофических взрывов и обрушений кальдер.

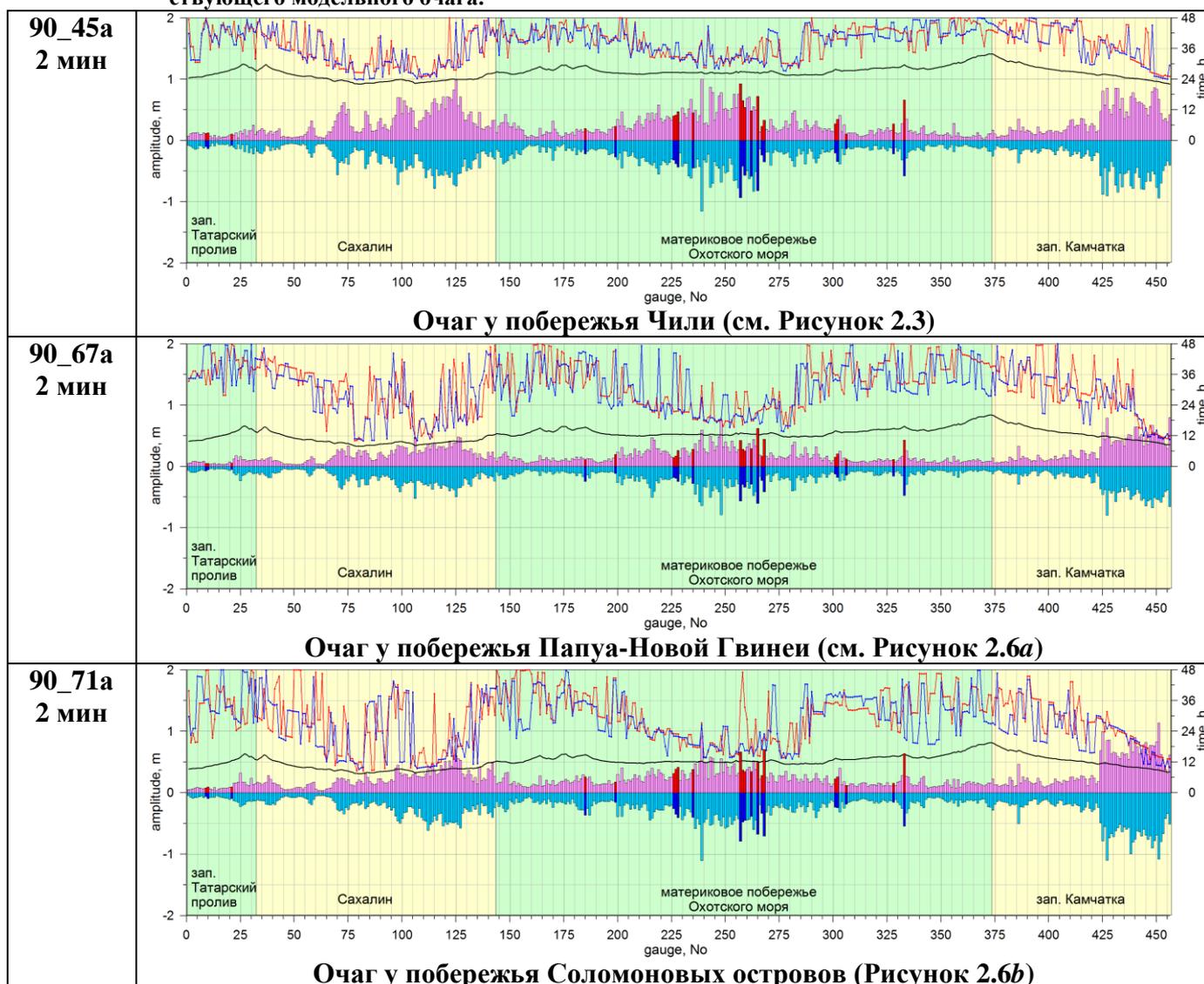
В историческое время отмечено три случая возбуждения вулканогенных цунами в Охотском море. В атласе "Тихий океан" имеется указание на сильное вулканогенное цунами, возникшее в 1918 году в средней части Курильской гряды (Тихий океан, 1974). Сильное цунами возникло при вулканическом взрыве 8 января 1933 года, который уничтожил верхнюю половину центрального конуса вулкана Севергина на о-ве Харимкотан (Важенин, 2006). Возникшее цунами на ближайших островах имело высоту до 9 м (Соловьев, 1978), наблюдалось три волны, вынесшие на берег большие глыбы льда. При извержении вулкана Сарычева на о-ве Матуа 13 ноября 1946 года возникли "гигантские волны" на северо-западном берегу острова (Соловьев, 1978). Истинная высота их остается неизвестной, т.к. в то время о каком-либо полевом обследовании следов возникшего цунами не могло быть и речи.

По сравнению с типичными сейсмогенными цунами, волны, возникающие при вулканических взрывах, обрушениях кальдер, а также береговых оползнях и обвалах, имеют совершенно другую диаграмму направленности и закон убывания высоты волны с расстоянием. Как правило, они опасны только в ближайших окрестностях очаговой области. Служба предупреждения о цунами в ее настоящем виде не имеет средств оперативного прогноза таких цунами, однако, возможность их возникновения должна учитываться при планировании защитных мероприятий для конкретных населенных пунктов.

2.2. Анализ проявления удаленных цунами у берегов Охотского моря

Анализ распределений экстремальных характеристик волн цунами, порожденных удаленными относительно защищаемого побережья цунамигенными землетрясениями, вдоль побережья Охотского моря выполнялся по результатам моделирования наиболее опасных источников с магнитудой $M_w = 9,0$ – «чилийского №45» и «гвинейского №67» очагов и очага из группы Соломоновых островов №71. Параметры соответствующих источников приведены в Приложении 1 к отчету по второму этапу настоящего контракта (Моделирование и анализ ..., 2011). Нумерация виртуальных мареографов указана вдоль горизонтальной оси гистограмм (Таблица 2.1), их соответствие точкам на побережье и защищаемым пунктам указаны на рисунках (см. Рисунок 1.1, Рисунок 1.2). Как следует из приведенных гистограмм, полученных в ходе расчетов на сетке с шагом 2 угловые минуты, наибольшую опасность представляют источники, расположенные у тихоокеанского побережья Чили вблизи очага исторического цунами 1960 г.

Таблица 2.1 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье Охотского моря и прилегающих акваторий максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденных наиболее опасными удаленными цунамигенными землетрясениями, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые и черные линии соответственно, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага.



2.3. Анализ проявления ближних цунами у берегов Охотского моря

В ходе вычислительных экспериментов воспроизводились сценарии взаимодействия с защищаемым побережьем Охотского моря (Хабаровская обл., Магаданская обл., западное побережье Камчатки, побережье Сахалина) гипотетических волн цунами, порождаемых наиболее опасными модельными землетрясениями с магнитудами 9,0 и 8,4.

Сначала будут изложены результаты, связанные с очагами модельных цунамигенных землетрясений с магнитудами 9,0. Здесь, кроме «базовых» очагов 90-1а, 90-2а, 90-3а, 90-4а (Рисунок 2.9, Таблица 2.2), рассматривались также названные «промежуточными» очаги с магнитудой 9,0 эпицентры которых более плотно (с шагом 0,5°) заполняли бреши между очагами 90-2а и 90-3а, а также 90-3а и 90-4а (Рисунок 2.10).

Таблица 2.2 Параметры источников модельных «ближних», относительно защищаемого «охотоморского» побережья цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 9,0$

ID	Latitude (N)	Longitude (E)	L (km)	W (km)	DE (grad)	LA (grad)	TE (grad)	D0 (m)	H_top (km)
9,0-1а	42,82	143,89	430	150	15	90	58	11,6	15
9,0-2а	45,48	149,22	430	150	15	90	52	11,6	15
9,0-3а	48,47	153,73	430	150	15	90	41	11,6	15
9,0-4а	51,86	157,75	430	150	15	90	36	11,6	15

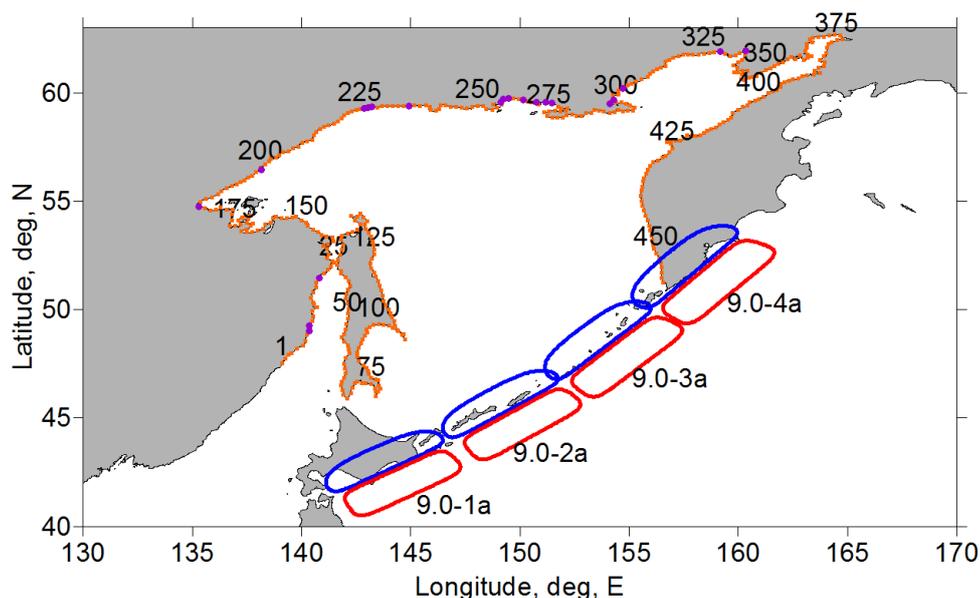
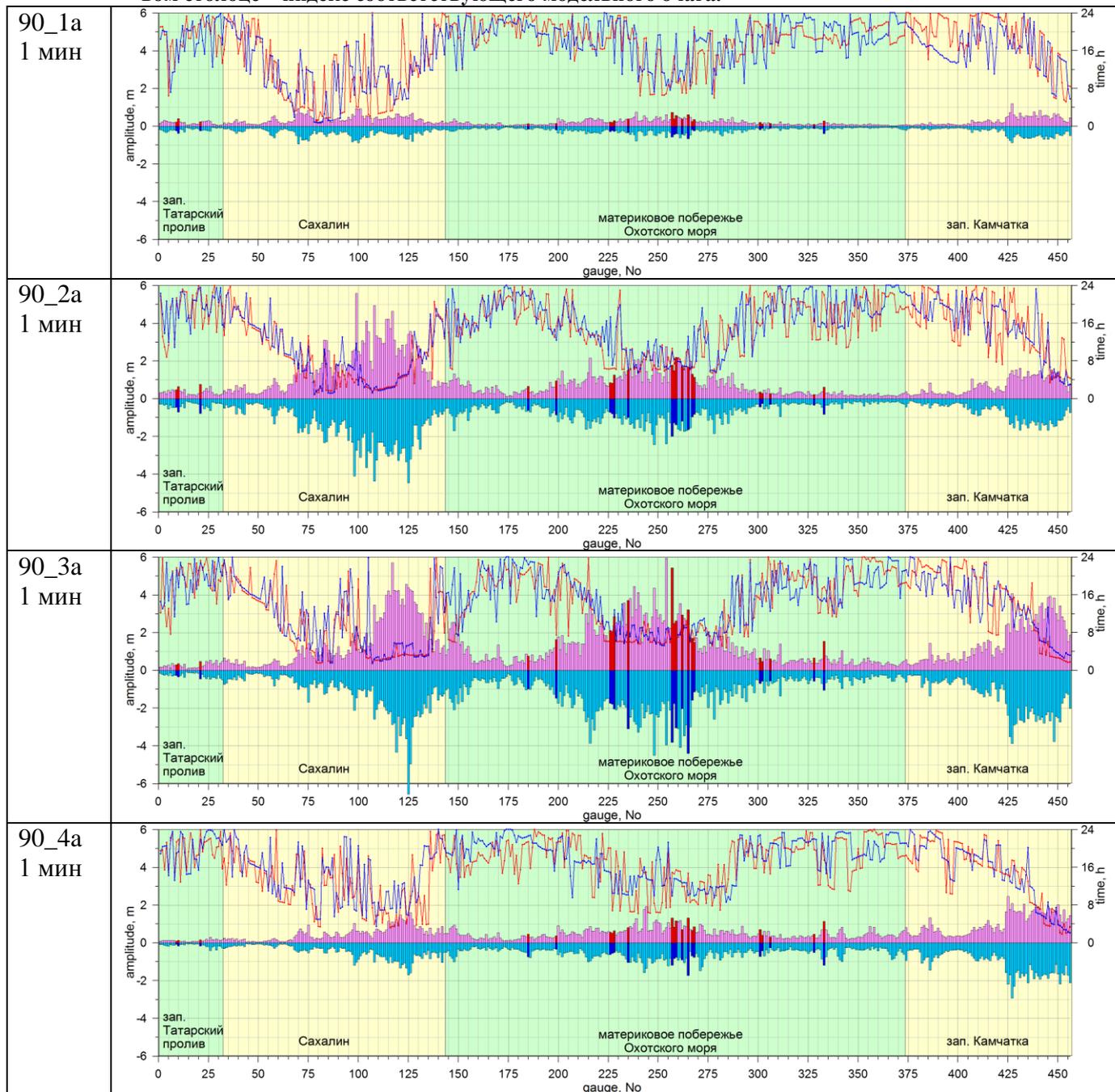


Рисунок 2.9 Схема расположения модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 9,0 в «ближней» зоне, потенциально опасных для Охотоморского побережья и размещения 456 виртуальных мареографов.

Анализ гистограмм (Таблица 2.3) показывает, что амплитуды волн, порожденных модельным очагом 90_1а, оказываются пренебрежимо малы вдоль всего рассматриваемого побережья. Эти амплитуды становятся существенными для очага 90_2а: они достигают почти 6 м (с размахом около 10 м) в центральной части о-ва Сахалин, 3 (6) м – в центральной части материкового побережья Охотского моря, 2 (4) м – на западном побережье Камчатки. Наиболее опасным из «базовых» очагов является очаг 90_3а, порождающий очень сильные волны на Сахалине и на материковом побережье Охотского моря – 6(10) м и на Камчатке – 4(8) м.

При продвижении к северо-востоку (очаг 90_4a) значимые высоты волн (2(4) м) наблюдаются, естественно, на юго-западном побережье Камчатки.

Таблица 2.3 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье Охотского моря и прилегающих акваторий максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 9,0, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые, голубые линии, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага.



Указанные результаты приводят к необходимости уточнения положения наиболее опасных для защищаемого побережья источников. Именно с этой целью и были проведены сценарные расчеты для 20 «промежуточных» очагов. Десять из них размещались от очага 9,0-3a вдоль разлома к югу с шагом $0,5^\circ$ между эпицентрами и с изменением азимута на 1° , а 10 других – к северу с тем же шагом между эпицентрами и с шагом изменения азимута $0,5^\circ$. Нумерация очагов, смещенных к югу от очага 90_3a, идет сверху вниз, то есть источник 90_3a_1 –

ближайший к 90_3а, дальше, южнее, идет 90_3а_-2 и т.д., так что очаг 90_3а_-10 оказывается ближайшим к очагу 90_2а. Нумерация «промежуточных» очагов, размещенных между очагами 90_3а и 90_4а организована зеркальным образом.

Общее представление о характере трансформации волновой энергии на трассе от области генерации к побережью дают рассчитанные «свечения» волн цунами. Количественное проявление этих волн регистрировалось в виртуальных мареографах, соответствующих защищаемым пунктам Аян, Охотск и Магадан, а также и по соседству с ними.

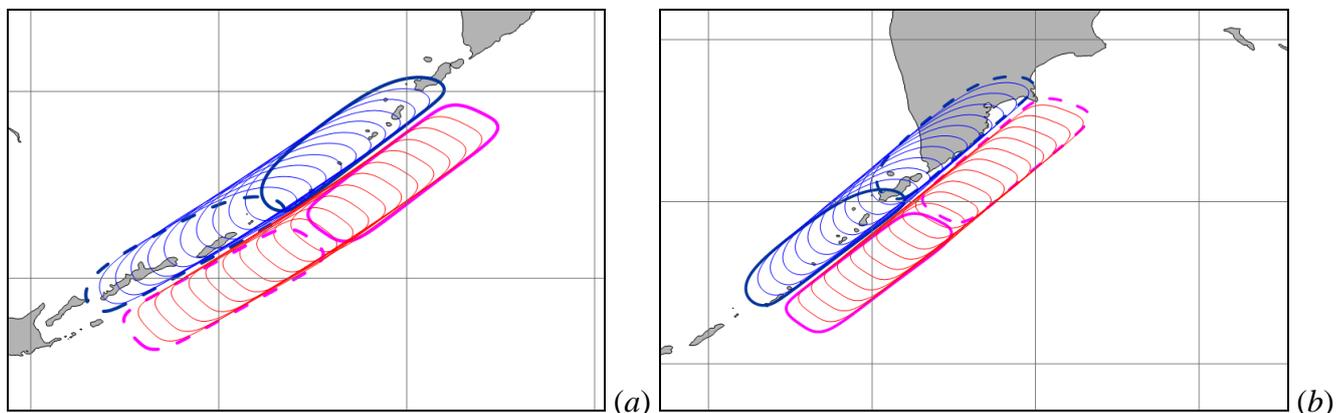


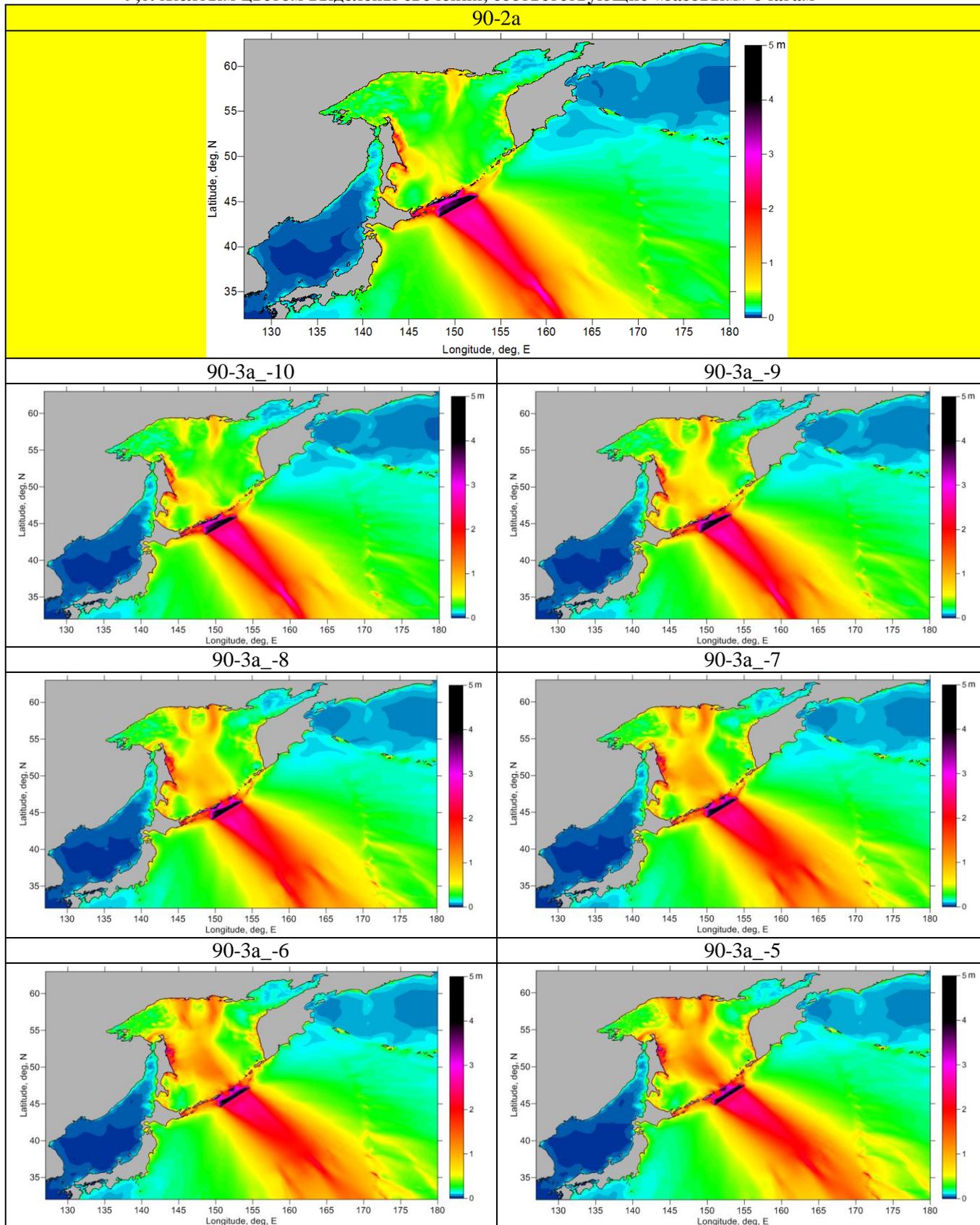
Рисунок 2.10 «Промежуточными» очаги модельных цунамигенных землетрясений с магнитудой 9,0, эпицентры которых более плотно (с шагом $0,5^\circ$) заполняют бреши между очагами 90-2а и 90-3а (а); 90-3а и 90-4а (б)

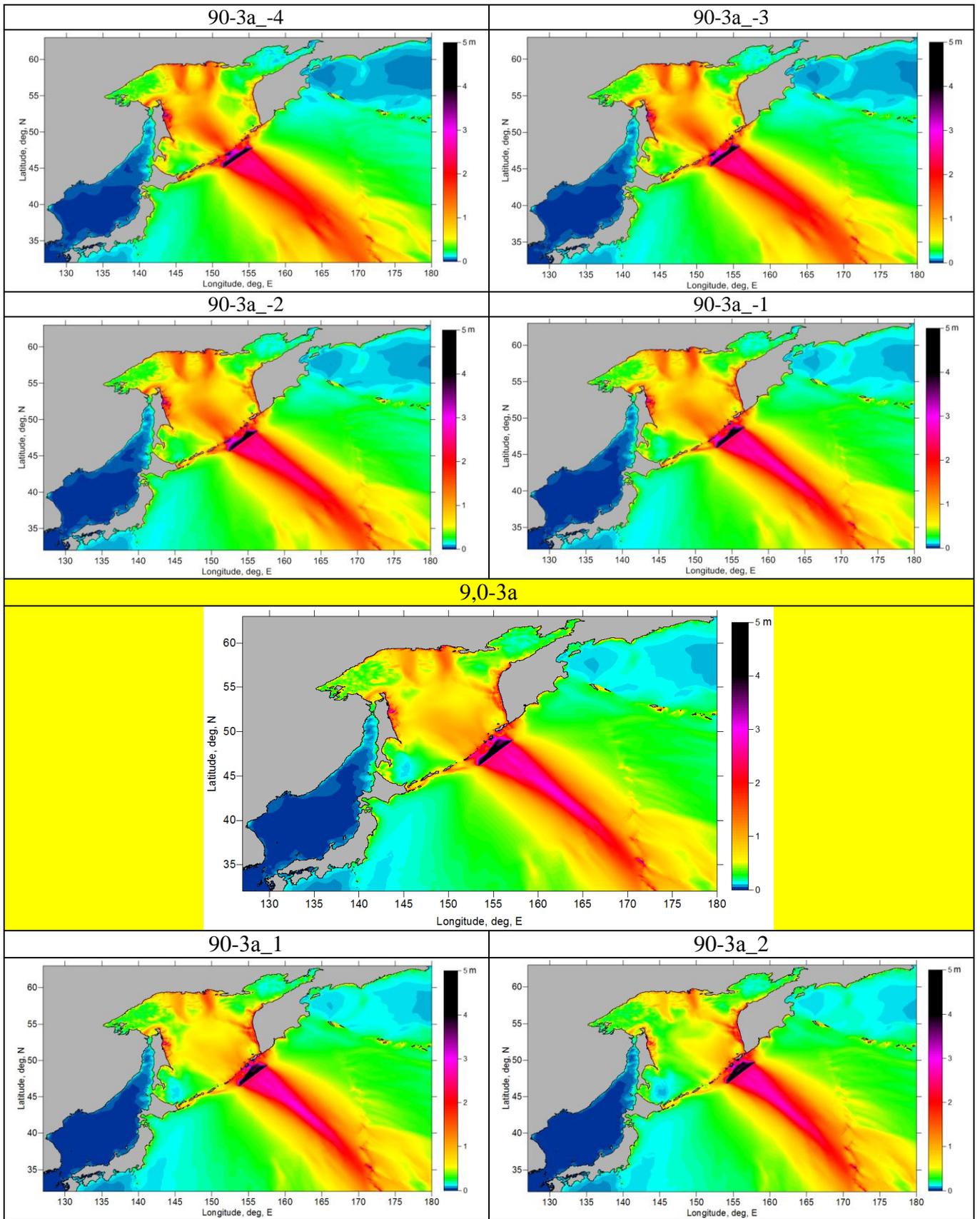
Отчетливое представление о характере распространения энергии волн от «ближних» цунами в акватории Охотского моря дают картины свечения (Таблица 2.4). Очевидно, этот характер определяется процессом прохода волн через Курильские проливы, а значит, – расположением эпицентров цунамигенных землетрясений относительно этих проливов.

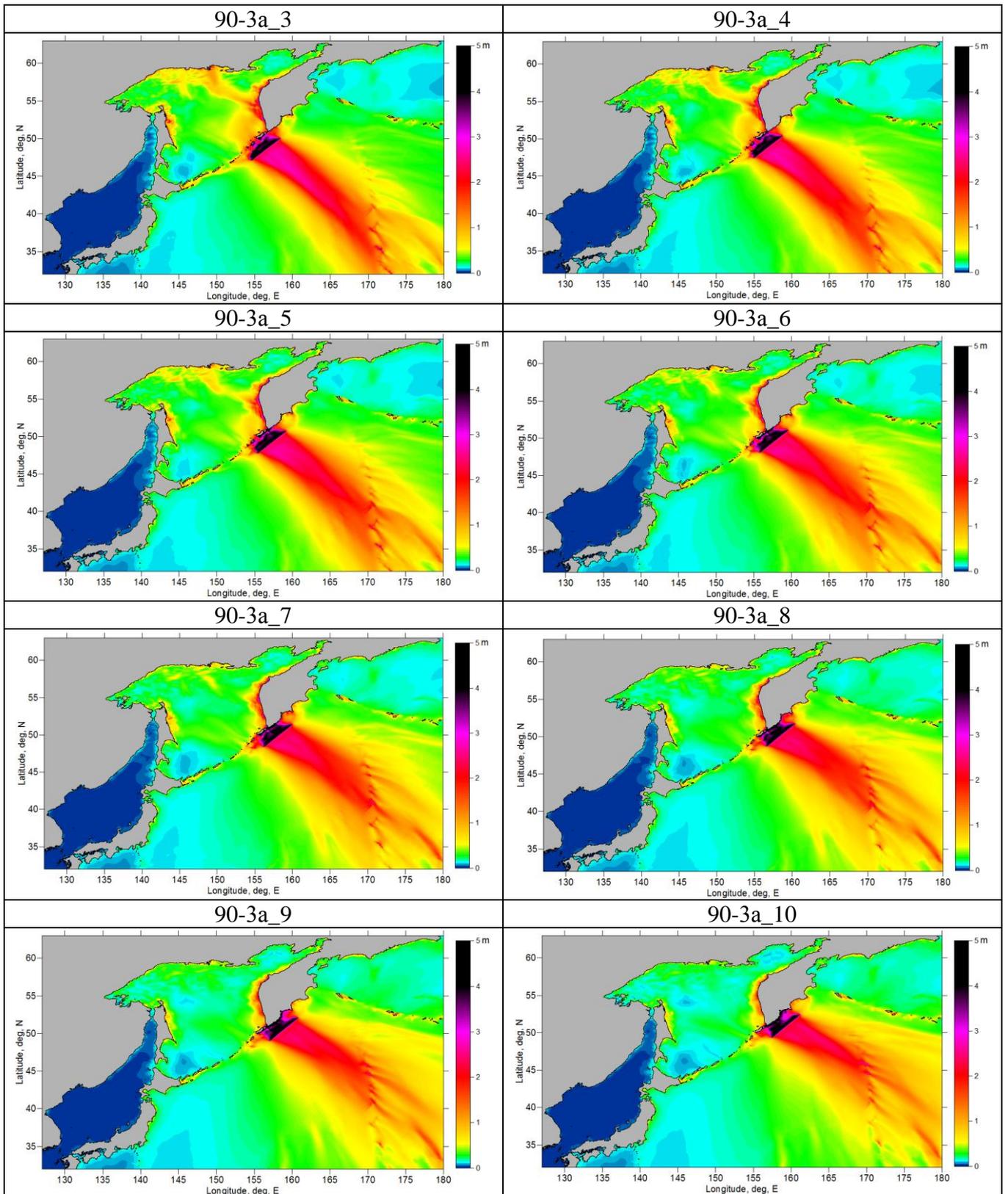
Судя по картинам свечения цунами, здесь можно выделить три основных направления – к о-ву Сахалин (его южному, восточному и северному побережьям), к материковому побережью Охотского моря и к западному побережью п-ва Камчатка. Как следует из свечений для о-ва Сахалин, наибольшую опасность представляют очаги, расположенные между базовыми очагами 90-2а и 90-3а. При смещении к северу (к очагу 90-3а) повышаются амплитуды на севере острова.

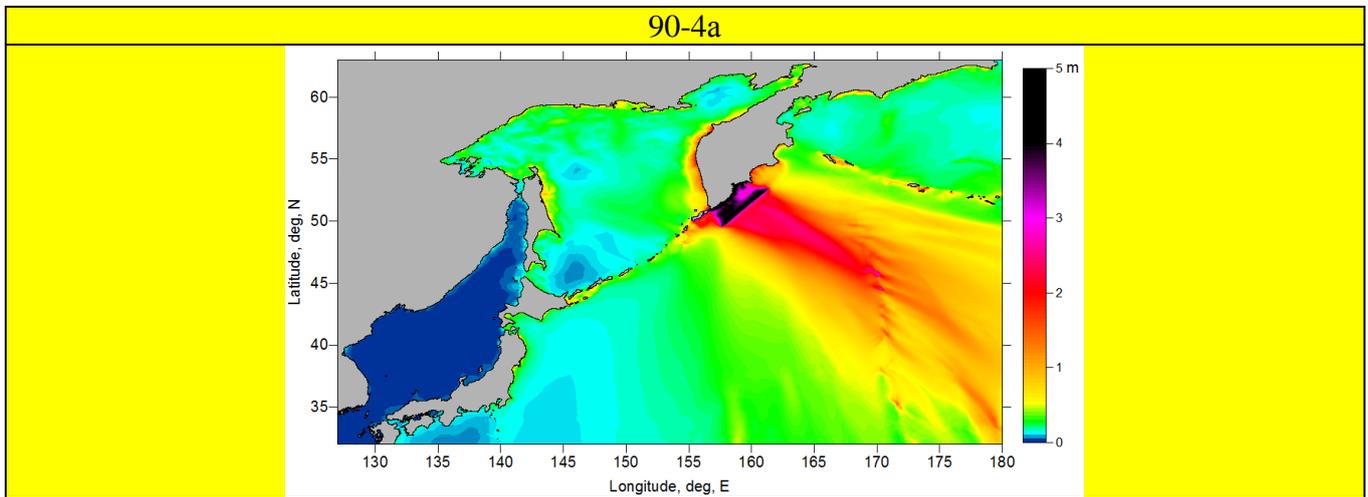
На континентальном побережье Охотского моря явно выделяются две «цунамиопасные» зоны, первая из которых включает защищаемые пункты Охотск и Иня, а вторая – Магадан и окрестности защищаемых пунктов Балаганное, Тауйск. Существование двух лучей, светящих в этих направлениях, обнаруживается уже на самом «южном» варианте, связанном с очагом 90-2а, и при продвижении к северу они становятся все мощнее и ярче, достигая своего максимума в сценарии, построенном с использованием очага 90-3а_-3. На западное побережье Камчатки, напротив, наибольшее влияние оказывают волны цунами, порожденные очагами 90-3а_3, 90-3а_4, сдвинутыми к северу от базового 90-3а.

Таблица 2.4 Свечения волн цунами, порожденных «базовыми» и «промежуточными» очагами с магнитудой 9,0. Желтым цветом выделены свечения, соответствующие «базовым» очагам



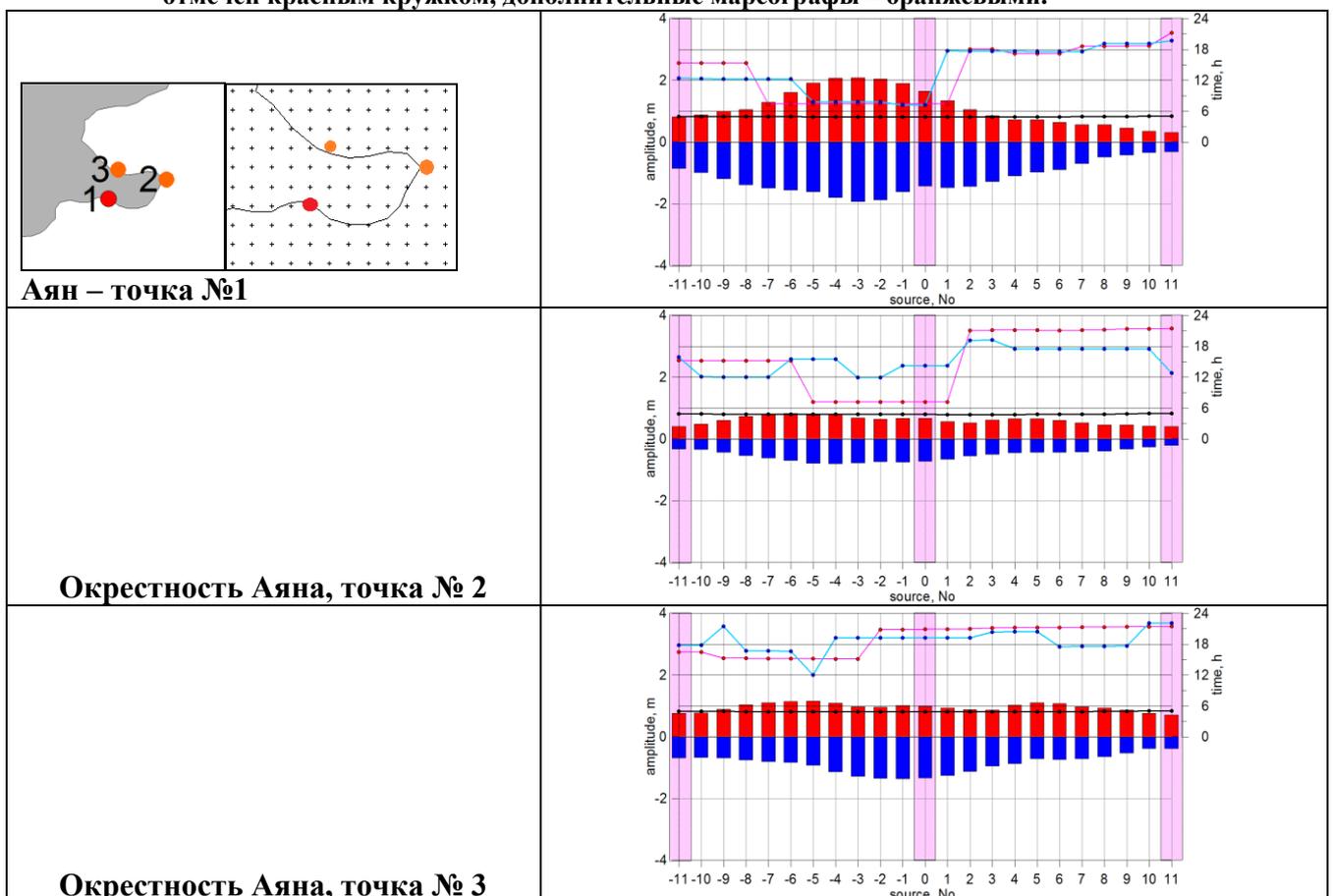






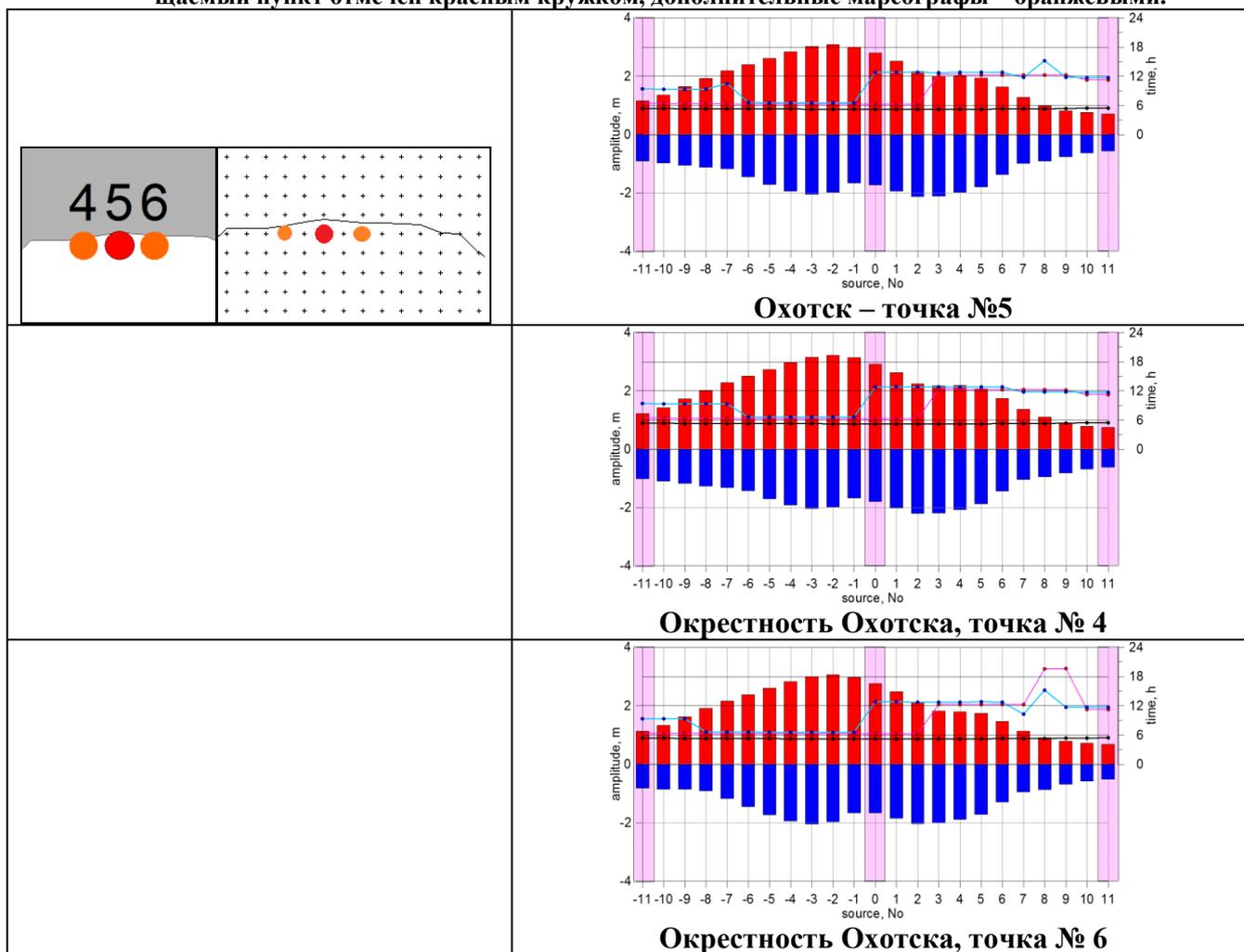
Количественные оценки исследуемого процесса были получены (см. Таблица 2.5 – Таблица 2.8) для трех защищаемых населенных пунктов Аян, Охотск, Магадан и прилегающих к ним виртуальных мареографов. Как следует из гистограмм, наибольшую опасность для п.Аян представляет источник 90-3а_3, порождающий волны с амплитудами порядка 2 м и размахом – около 4 м. Соседние с ним мареографы, расположенные на другой (северной) стороне мыса регистрируют более слабый волновой режим.

Таблица 2.5 Распределения (гистограммы) в окрестности защищаемого пункта Аян максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 9,0, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые, черные линии и маркеры, вертикальная ось справа). В первом столбце – схема расстановки виртуальных мареографов, защищаемый пункт отмечен красным кружком, дополнительные мареографы – оранжевыми.



Значительно упрощенная береговая линия вблизи Охотска приводит к практически одинаковым распределениям для каждого из рассмотренных виртуальных мареографов. Здесь максимумы положительных амплитуд ведут себя монотонно (выпукло), имея максимум, соответствующий волне цунами, порожденной очагом 90-3a_-2, однако распределение отрицательных экстремумов оказывается немонотонным с двумя локальными абсолютными максимумами, один из которых соответствует очагу 90-3a_-3, а второй – симметричному очагу 90-3a_3.

Таблица 2.6 Распределения (гистограммы) в окрестности защищаемого пункта Охотск максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 9,0, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые, черные линии и маркеры, вертикальная ось справа). В первом столбце – схема расстановки виртуальных мареографов, защищаемый пункт отмечен красным кружком, дополнительные мареографы – оранжевыми.



Наиболее сложная картина наблюдается в окрестности Магадана, и связана она с непростой конфигурацией береговой линии прилегающей акватории. Так, собственно на виртуальном мареографе «Магадан», находящемся в глубине бухты Нагаева, наблюдается немонотонность в распределениях как положительных, так и отрицательных амплитуд, при том, что максимальные значения положительной и отрицательной амплитуд (а значит и размаха) достигаются на очаге 90-3a_4 (соответствующие значения приведены в таблице (Таблица 2.8)).

Мареограф №8, размещенный на входе в бухту, регистрирует в два раза меньшие экстремальные амплитуды и монотонное их распределение, в то время

как смотрящие в открытое море мареографы №№ 9 и 10, сохраняя монотонность распределений, отмечают волны по своей величине близкие рассчитанным у Магадана.

Анонсированные ранее количественные характеристики приведены в таблице (Таблица 2.8) и подтверждают приведенное выше описание результатов моделирования.

Таблица 2.7 Распределения (гистограммы) в окрестности защищаемого пункта Магадан максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 9,0, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые, черные линии и маркеры, вертикальная ось справа). В первом столбце – схема расстановки виртуальных мареографов, защищаемый пункт отмечен красным кружком, дополнительные мареографы – оранжевыми.

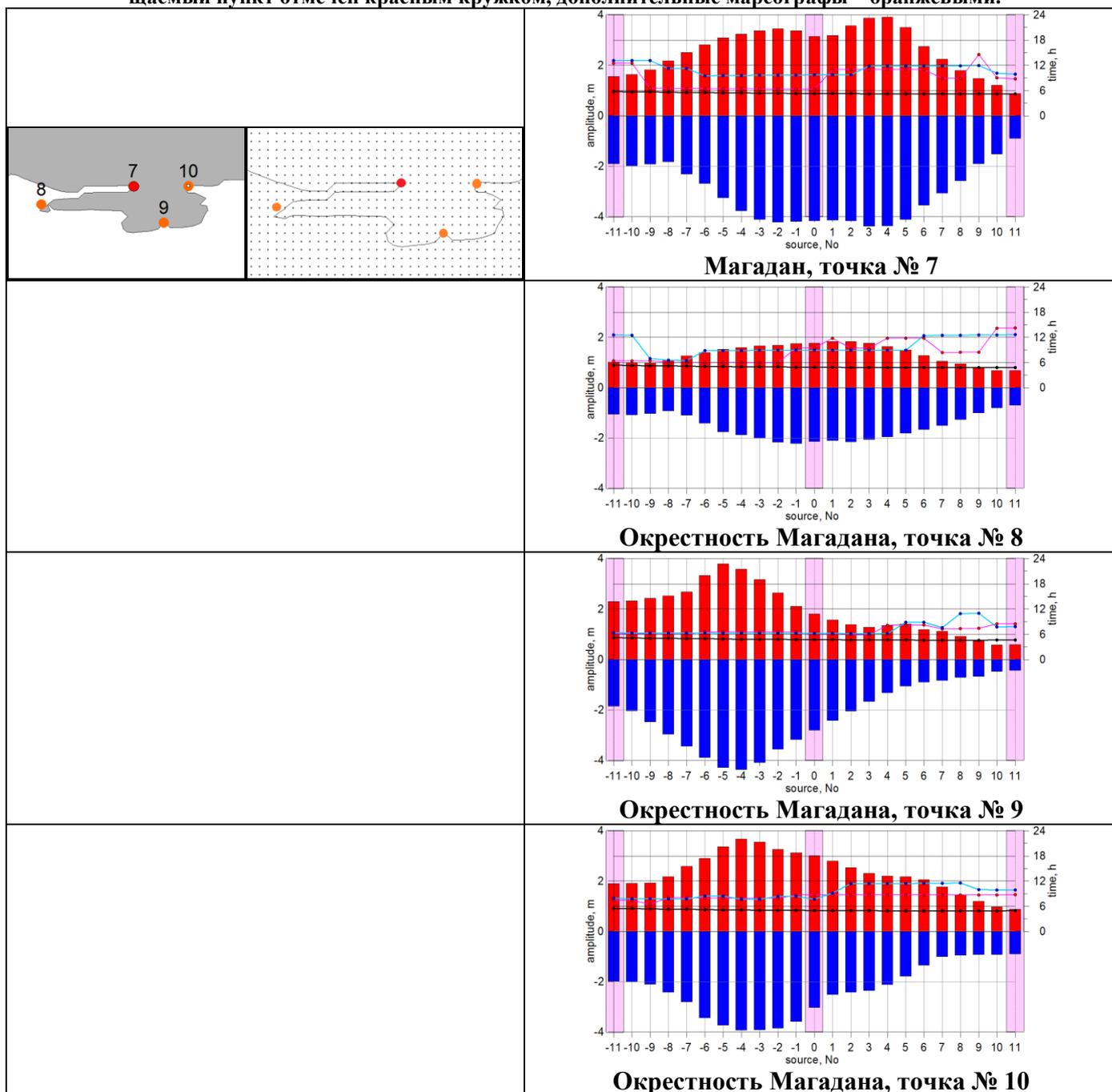
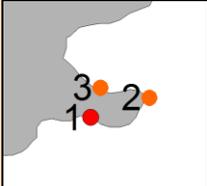
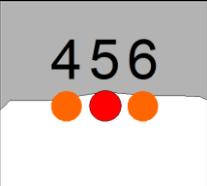
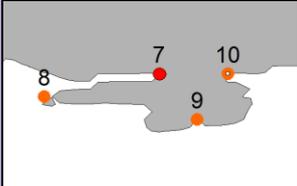


Таблица 2.8 Максимальные положительные и минимальные отрицательные высоты волн (красные и синие шрифты соответственно), а также суммы их абсолютных значений (размах, высота волн) порожденных в окрестностях защищаемых пунктов Аян, Охотск и Магадан наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 9,0. В первом столбце – индекс соответствующего землетрясения, в первой строке – схема расстановки виртуальных мареографов.

										
	Аян 1	2	3	4	Охотск 5	6	Магадан 7	8	9	10
90-2a	0,95	0,54	0,83	1,31	1,25	1,22	1,68	1,26	1,98	1,99
	-0,85	-0,31	-0,66	-1,13	-1,02	-0,92	-1,64	-1,13	-1,54	-1,95
	1,80	0,85	1,49	2,44	2,27	2,14	3,32	2,39	3,52	3,94
90-3a_-10	0,88	0,48	0,77	1,42	1,35	1,33	1,63	1,00	2,32	1,90
	-0,99	-0,34	-0,67	-1,10	-0,97	-0,85	-1,98	-1,08	-2,03	-2,00
	1,87	0,82	1,43	2,52	2,32	2,18	3,60	2,08	4,35	3,90
90-3a_-9	0,99	0,60	0,89	1,72	1,64	1,62	1,81	0,97	2,42	1,93
	-1,18	-0,43	-0,69	-1,18	-1,05	-0,86	-1,91	-1,03	-2,47	-2,10
	2,17	1,02	1,57	2,89	2,69	2,48	3,72	2,00	4,89	4,02
90-3a_-8	1,05	0,73	1,03	2,01	1,92	1,90	2,17	1,10	2,52	2,17
	-1,39	-0,54	-0,75	-1,27	-1,13	-0,90	-1,82	-0,93	-2,95	-2,41
	2,43	1,27	1,78	3,28	3,05	2,80	4,00	2,03	5,47	4,59
90-3a_-7	1,29	0,81	1,11	2,28	2,19	2,16	2,50	1,26	2,68	2,58
	-1,49	-0,62	-0,81	-1,31	-1,18	-1,17	-2,30	-1,10	-3,43	-2,80
	2,78	1,43	1,91	3,60	3,36	3,33	4,81	2,36	6,10	5,38
90-3a_-6	1,61	0,82	1,14	2,50	2,39	2,37	2,80	1,39	3,32	2,90
	-1,55	-0,69	-0,83	-1,43	-1,45	-1,45	-2,67	-1,41	-3,88	-3,44
	3,16	1,51	1,97	3,93	3,85	3,83	5,47	2,80	7,20	6,34
90-3a_-5	1,91	0,76	1,15	2,72	2,61	2,59	3,08	1,52	3,79	3,36
	-1,61	-0,79	-0,92	-1,70	-1,72	-1,73	-3,24	-1,76	-4,28	-3,72
	3,52	1,56	2,07	4,42	4,33	4,32	6,32	3,28	8,07	7,08
90-3a_-4	2,06	0,80	1,09	2,96	2,84	2,82	3,23	1,59	3,58	3,66
	-1,79	-0,80	-1,14	-1,91	-1,94	-1,94	-3,77	-1,87	-4,35	-3,92
	3,85	1,61	2,23	4,87	4,77	4,76	6,99	3,45	7,93	7,58
90-3a_-3	2,08	0,67	0,97	3,15	3,02	2,99	3,36	1,66	3,16	3,55
	-1,92	-0,78	-1,28	-2,03	-2,05	-2,04	-4,10	-2,01	-4,07	-3,91
	4,00	1,46	2,25	5,18	5,07	5,03	7,46	3,66	7,24	7,46
90-3a_-2	2,04	0,63	0,95	3,22	3,08	3,05	3,44	1,69	2,63	3,25
	-1,87	-0,74	-1,34	-1,99	-1,98	-1,97	-4,22	-2,16	-3,55	-3,85
	3,91	1,37	2,29	5,20	5,06	5,03	7,66	3,85	6,18	7,10
90-3a_-1	1,90	0,66	1,00	3,13	2,99	2,96	3,36	1,74	2,10	3,12
	-1,61	-0,75	-1,35	-1,67	-1,65	-1,66	-4,19	-2,22	-3,16	-3,57
	3,51	1,41	2,36	4,80	4,65	4,62	7,55	3,96	5,26	6,69
90-3a	1,64	0,72	1,16	2,97	2,86	2,79	3,21	2,13	1,71	3,93
	-1,48	-0,66	-1,42	-2,17	-2,04	-1,89	-4,40	-1,99	-3,01	-2,98
	3,12	1,38	2,58	5,14	4,9	4,68	7,61	4,12	4,72	6,91
90-3a_1	1,33	0,56	0,93	2,62	2,51	2,48	3,18	1,83	1,56	2,80
	-1,48	-0,66	-1,26	-2,02	-1,94	-1,85	-4,14	-2,10	-2,41	-2,51
	2,81	1,22	2,18	4,63	4,45	4,33	7,32	3,93	3,97	5,31
90-3a_2	1,05	0,52	0,88	2,24	2,16	2,11	3,56	1,82	1,38	2,53
	-1,43	-0,55	-1,12	-2,21	-2,13	-2,03	-4,16	-2,15	-2,05	-2,42
	2,48	1,07	1,99	4,44	4,29	4,14	7,72	3,97	3,43	4,95
90-3a_3	0,85	0,60	0,87	2,17	1,99	1,81	3,86	1,76	1,27	2,30
	-1,27	-0,49	-0,95	-2,19	-2,10	-2,00	-4,37	-2,06	-1,66	-2,34
	2,12	1,10	1,82	4,36	4,10	3,82	8,23	3,82	2,93	4,64

90-3a_4	0,71	0,64	1,02	2,18	2,01	1,79	3,90	1,63	1,34	2,20
	-1,09	-0,45	-0,87	-2,07	-1,98	-1,89	-4,36	-1,95	-1,32	-2,11
	1,80	1,09	1,89	4,26	3,98	3,68	8,26	3,58	2,66	4,31
90-3a_5	0,71	0,64	1,10	2,06	1,93	1,74	3,50	1,49	1,41	2,16
	-0,97	-0,44	-0,72	-1,87	-1,79	-1,71	-4,11	-1,81	-1,05	-1,78
	1,69	1,08	1,81	3,94	3,72	3,45	7,60	3,30	2,46	3,94
90-3a_6	0,64	0,60	1,08	1,73	1,62	1,45	2,74	1,28	1,18	2,05
	-0,90	-0,43	-0,73	-1,44	-1,37	-1,30	-3,54	-1,66	-0,90	-1,35
	1,54	1,03	1,81	3,16	2,99	2,75	6,29	2,94	2,08	3,39
90-3a_7	0,56	0,52	0,97	1,37	1,27	1,12	2,23	1,05	1,11	1,76
	-0,69	-0,42	-0,71	-1,05	-0,99	-0,95	-3,06	-1,50	-0,83	-0,99
	1,25	0,94	1,68	2,41	2,25	2,08	5,29	2,56	1,95	2,76
90-3a_8	0,56	0,45	0,93	1,10	0,98	0,90	1,79	0,95	0,91	1,45
	-0,49	-0,39	-0,64	-0,94	-0,91	-0,87	-2,57	-1,26	-0,72	-0,94
	1,04	0,84	1,57	2,04	1,90	1,77	4,36	2,21	1,63	2,40
90-3a_9	0,45	0,45	0,86	0,87	0,80	0,79	1,46	0,79	0,73	1,19
	-0,41	-0,33	-0,52	-0,82	-0,76	-0,69	-1,90	-1,00	-0,67	-0,92
	0,87	0,78	1,39	1,69	1,56	1,47	3,36	1,79	1,41	2,11
90-3a_10	0,35	0,42	0,76	0,79	0,75	0,72	1,21	0,68	0,57	0,97
	-0,35	-0,26	-0,38	-0,69	-0,64	-0,58	-1,52	-0,80	-0,47	-0,92
	0,69	0,68	1,13	1,47	1,39	1,30	2,73	1,48	1,05	1,89

90-4a	0,37	0,45	0,78	0,67	0,64	0,62	1,32	0,75	0,73	0,99
	-0,34	-0,20	-0,50	-0,53	-0,51	-0,51	-1,73	-0,71	-0,45	-0,79
	0,71	0,65	1,28	1,2	1,15	1,13	3,05	1,46	1,18	1,78

При рассмотрении сценариев наиболее опасных для побережья Охотского моря гипотетических цунами, порожденных землетрясениями с магнитудой 8,4, рассматривались «базовые» и «дополнительные» очаги. В число базовых были включены очаги 84-1b, 84-2b, 84-3b, 84-4b, 84-5b, 84-6b, 84-7b (см. таблицу (Таблица 2.9) и Рисунок 2.11).

Таблица 2.9 Параметры источников модельных «ближних», относительно защищаемого «охотоморского» побережья цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 8,4$

ID	Latitude (N)	Longitude (E)	L (km)	W (km)	DE (grad)	LA (grad)	TE (grad)	D0 (m)	H_top (km)
8,4-1b	42,08	142,63	215	75	15	90	58	5,5	25
8,4-2b	43,38	145,23	215	75	15	90	57	5,5	25
8,4-3b	44,8	148,01	215	75	15	90	54	5,5	25
8,4-4b	46,11	150,48	215	75	15	90	51	5,5	25
8,4-5b	47,61	152,75	215	75	15	90	43	5,5	25
8,4-6b	49,28	154,72	215	75	15	90	40	5,5	25
8,4-7b	50,98	156,75	215	75	15	90	38	5,5	25

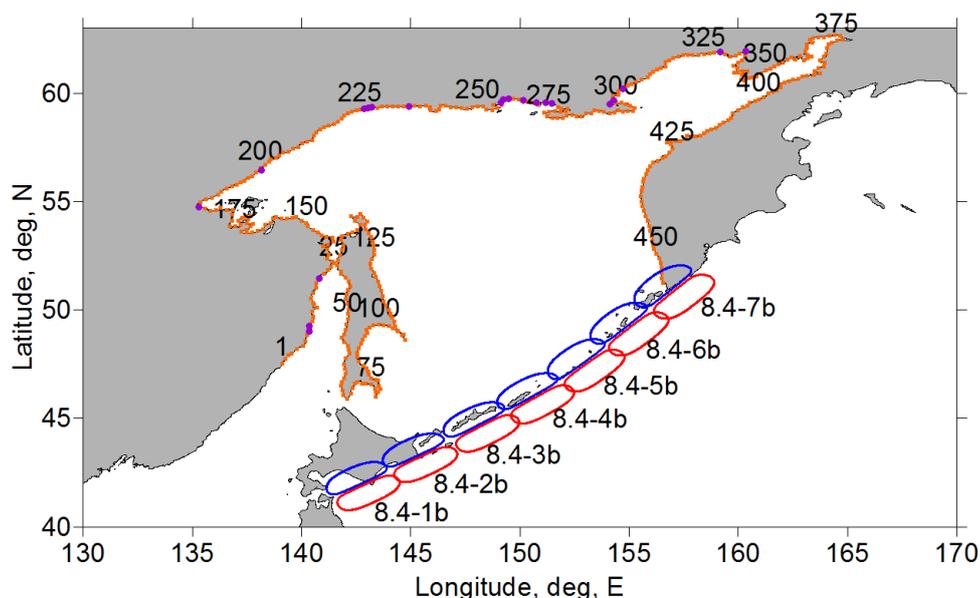
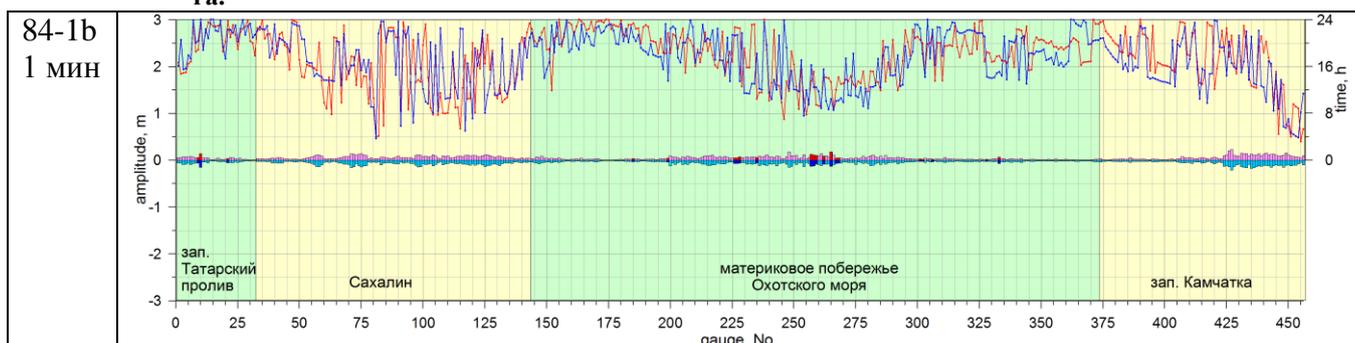
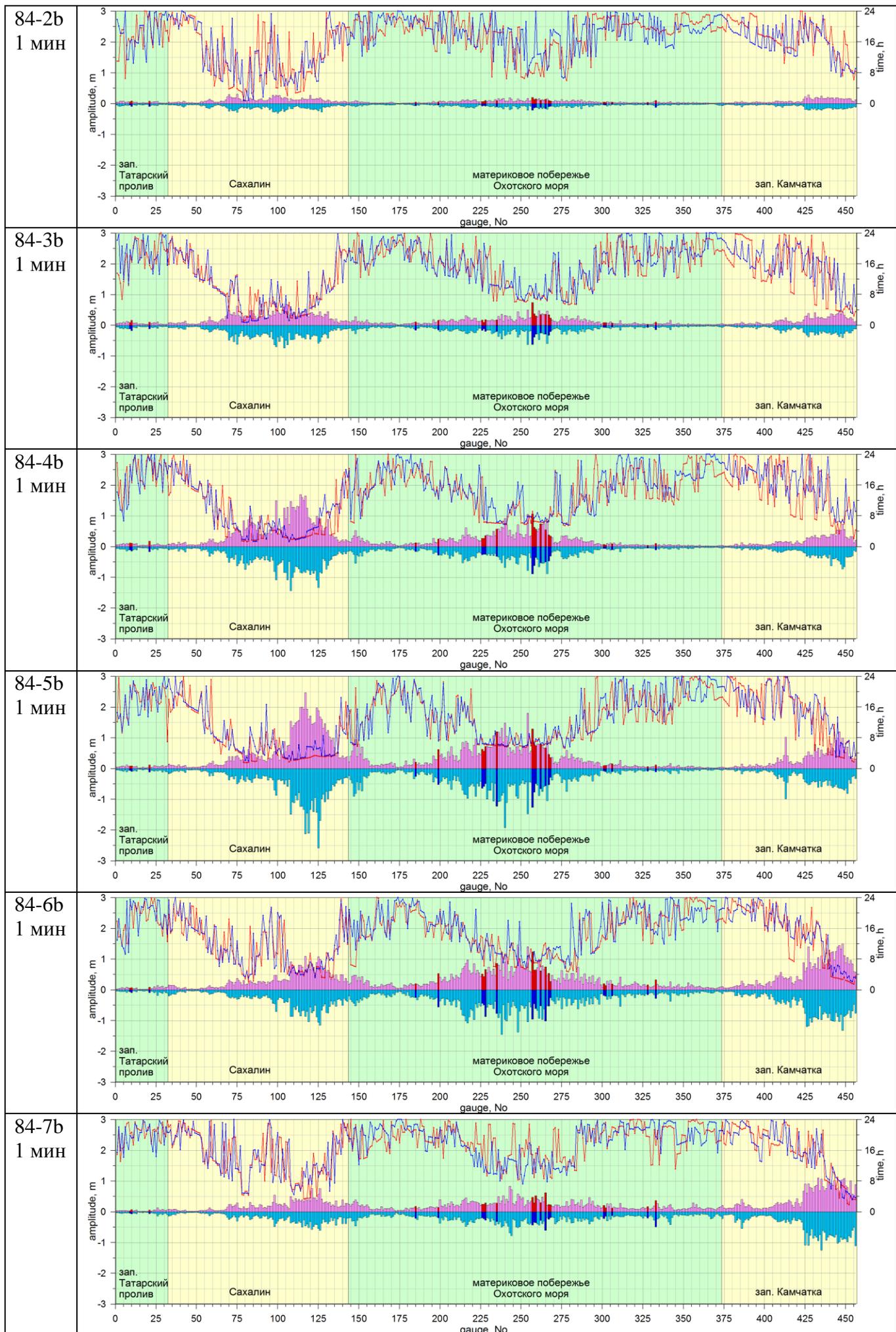


Рисунок 2.11 Схема расположения модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8,4 в «ближней» зоне, потенциально опасных для Охотоморского побережья и размещения 456 виртуальных мареографов

Анализ соответствующих гистограмм (Таблица 2.10) показывает, что амплитуды волн, порожденных модельными очагами 84_1b и 84_2b, оказываются пренебрежимо малыми вдоль всего защищаемого побережья. Амплитуды становятся несколько более заметными и почти достигают 1 м в центральной части материкового побережья Охотского моря в рамках сценария цунами от очага 84-3b. Волна цунами, порожденная очагом 84-4b, приближается по своей амплитуде к полутора метрам на восточном побережье о-ва Сахалин, несколько возрастает по сравнению с более южными источниками на материковом побережье Охотского моря и становится ощутимой на западном побережье Камчатки. Максимальных значений обсуждаемые характеристики достигают в сценарии, основанном на очаге 84-5b, – здесь на Сахалине возникают волны с амплитудами порядка 2,5 м, на материковом побережье Охотского моря амплитуды приближаются к отметке 2 м, а на западном побережье Камчатки – к 1 м.

Таблица 2.10 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье Охотского моря и прилегающих акваторий максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 8,4, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн и регистрации первых возмущений (розовые, голубые, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага.





Для выяснения вопроса о влиянии на характеристики волн цунами у побережья смещения эпицентров землетрясений, порождающих эти волны, были проведены дополнительные вычислительные эксперименты, для которых были рассмотрены «дополнительные» очаги с магнитудой 8,4, построенные на основе «базового» очага между очагами 84-5b и 84-6b.

Эпицентры этих модельных землетрясений размещались по нормали к линии разлома в сторону Охотоморского побережья и в сторону Тихого океана с шагом $0,3^\circ$ (Рисунок 2.12). Нумерация «дополнительных» источников устроена так, что в сторону Охотского моря их номера уменьшаются от 0 до -8, а в сторону Тихого океана – увеличиваются от 0 до 3. Таким образом, очаг с номером «-8» является самым дальним от начального положения («0») в Охотском море, а с номером «3» – самым дальним в Тихом океане.

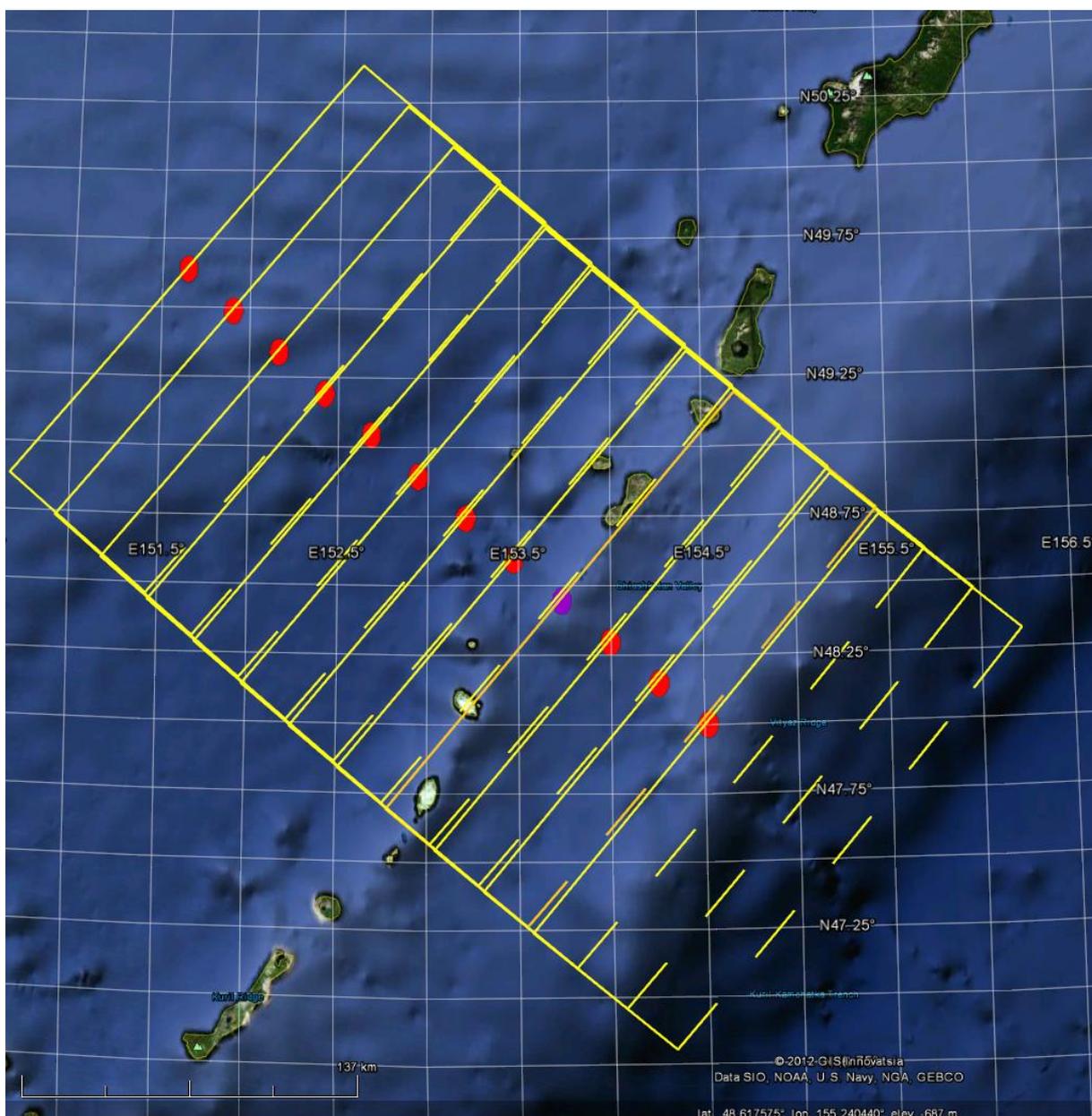
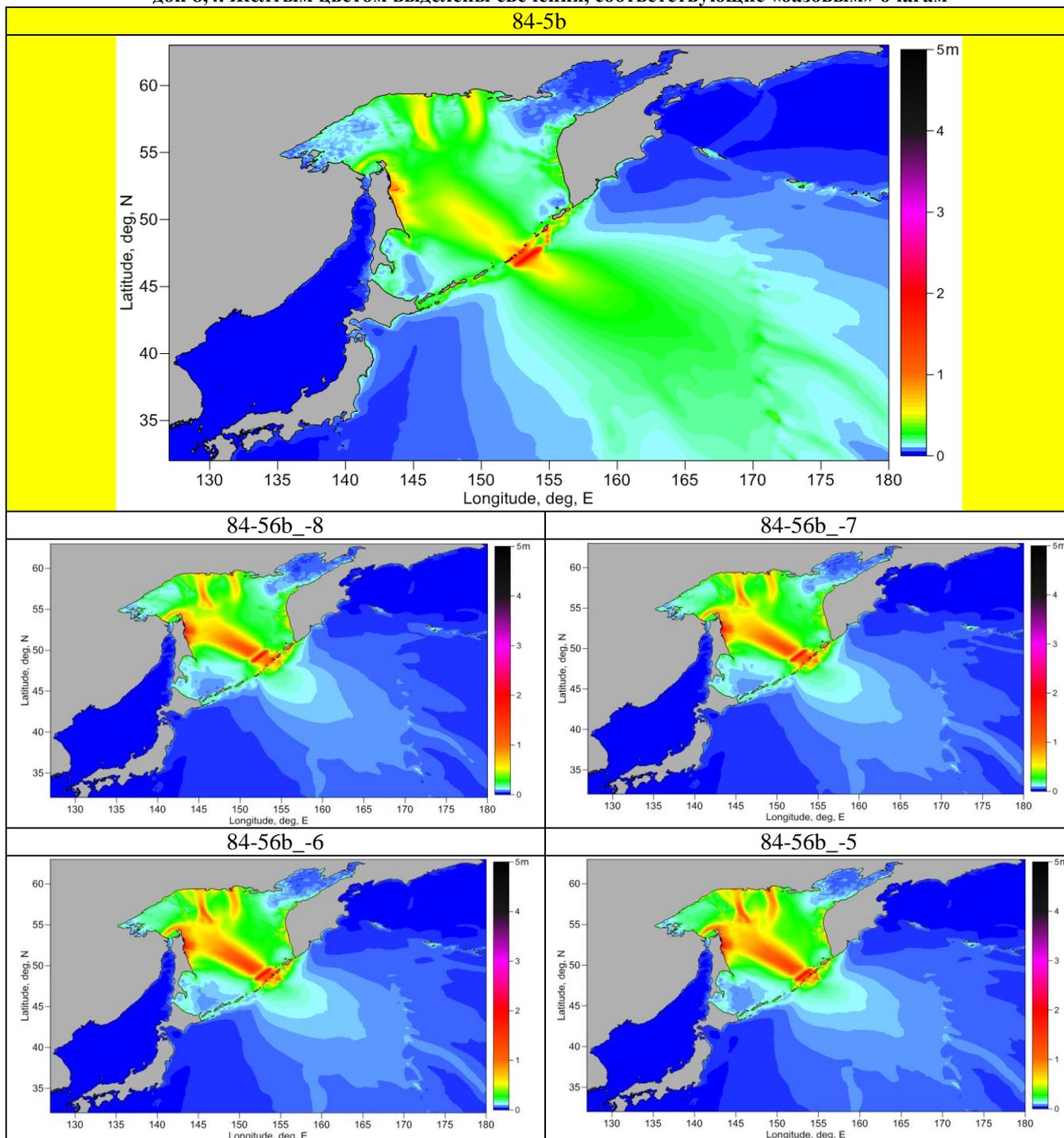
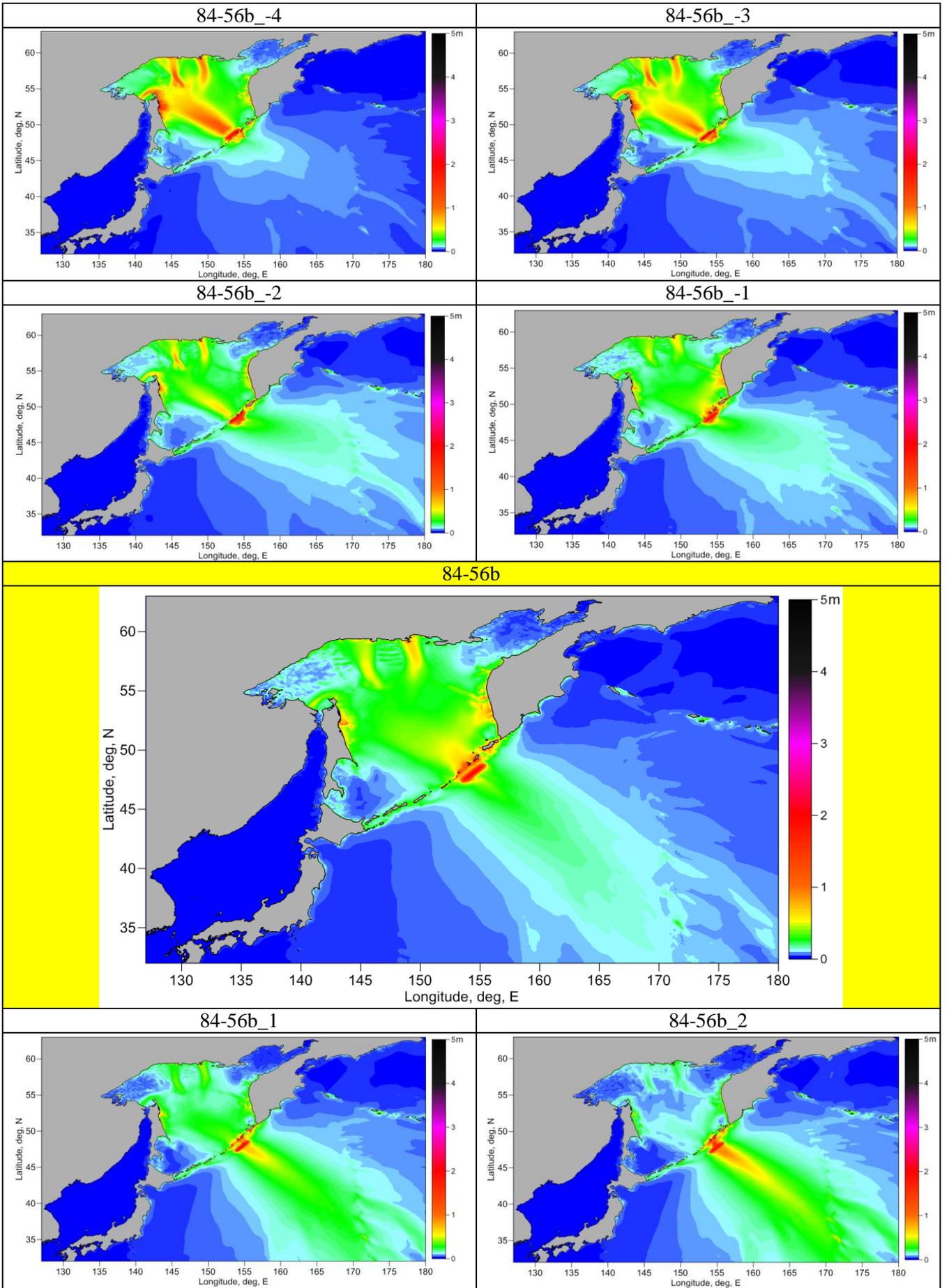


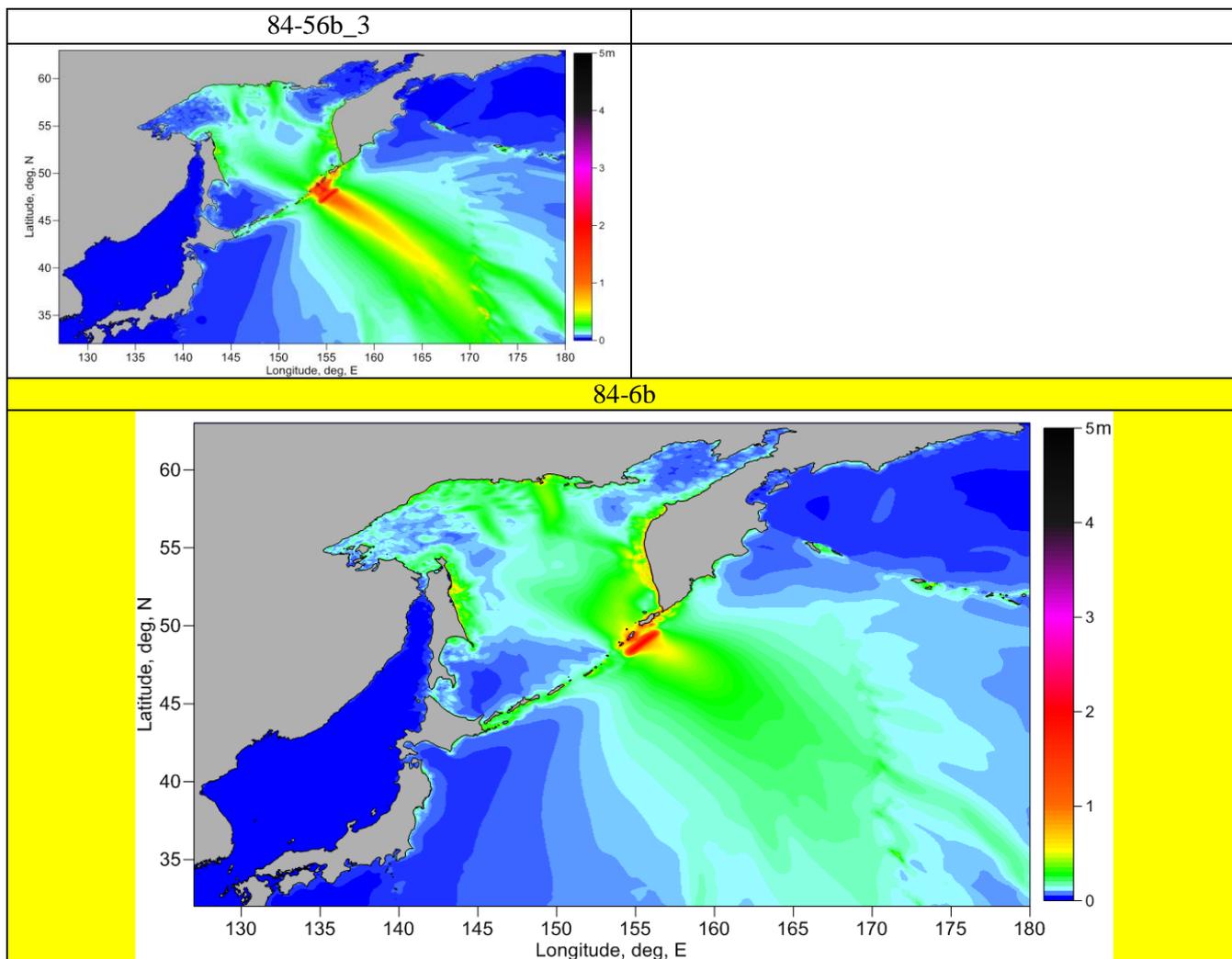
Рисунок 2.12 Схема расположения «дополнительных» модельных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой 8,4 кружочками отмечены положения соответствующих эпицентров, желтыми прямоугольниками – площадки разломов. Лиловым кружком отмечен «исходный» очаг, эпицентр которого размещался строго между эпицентрами очагов 84-5b и 84-6b. Штриховыми линиями отрисованы верхние края разломов.

Анализируя свечения соответствующих волн цунами, можно заметить идентичность основных направлений распространения энергии сценариям цунами с магнитудами 9,0 – в сторону восточного побережья Сахалина, западного побережья Камчатки (впрочем, совсем незначительно) и два луча в сторону материкового побережья Охотского моря. Наибольшие, но, конечно, с меньшими значениями, чем для очагов с магнитудами 9,0, амплитуды волн наблюдаются от источников, лежащих в акватории Охотского моря (84-56b_-8 – 84-56b_-3) самый опасный из которых – 84-56b_-5. При перемещении очагов в сторону Тихого океана их цунамиопасность резко снижается, и по своим размахам волны перестают превышать 1 м (Таблица 2.12). Опасность, однако, сохраняется для окрестностей Магадана.

Таблица 2.11 Свечения волн цунами, порожденных «базовыми» и «промежуточными» очагами с магнитудой 8,4. Желтым цветом выделены свечения, соответствующие «базовым» очагам







Следующая таблица (Таблица 2.12) по своей структуре и назначению аналогична размещенной выше (Таблица 2.8) и содержит количественные характеристики, необходимые для адекватного понимания и толкования свечений.

Таблица 2.12 Максимальные положительные и минимальные отрицательные высоты волн (красные и синие шрифты соответственно), а также суммы их абсолютных значений (размах, высота волн) порожденных в окрестностях защищаемых пунктов Аян, Охотск и Магадан наиболее опасными «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 8,0. В первом столбце – индекс соответствующего землетрясения, в первой строке – схема расстановки виртуальных мареографов.

	Аян 1	2	3	4	Охотск 5	6	Магадан 7	8	9	10
8,4-5b	0,62	0,35	0,28	0,74	0,72	0,71	0,68	0,41	0,89	1,01
	-0,52	-0,33	-0,31	-0,51	-0,49	-0,51	-0,56	-0,35	-1,04	-0,89
	1,15	0,68	0,59	1,25	1,21	1,22	1,23	0,76	1,93	1,90

8,4-56b_	0,72	0,64	0,52	0,94	0,91	0,90	0,96	0,47	0,87	0,90
-8	-0,60	-0,48	-0,54	-0,59	-0,55	-0,57	-0,95	-0,52	-1,00	-0,91
	1,32	1,12	1,06	1,53	1,46	1,47	1,92	0,99	1,87	1,81
8,4-56b_	0,53	0,65	0,54	0,97	0,94	0,93	0,92	0,58	0,86	1,12
	-0,56	-0,45	-0,50	-0,69	-0,65	-0,60	-1,02	-0,59	-1,08	-1,19

-7	1,08	1,11	1,04	1,66	1,59	1,52	1,94	1,17	1,94	2,32
8,4-	0,58	0,66	0,51	1,02	0,99	0,98	0,88	0,64	0,81	1,19
56b_	-0,60	-0,53	-0,50	-0,83	-0,78	-0,72	-1,17	-0,63	-1,09	-1,48
-6	1,17	1,19	1,02	1,85	1,78	1,70	2,05	1,27	1,89	2,67
8,4-	0,75	0,66	0,48	1,04	1,01	1,00	0,88	0,59	0,75	1,12
56b_	-0,69	-0,51	-0,50	-0,89	-0,83	-0,84	-1,20	-0,65	-0,87	-1,53
-5	1,43	1,17	0,98	1,94	1,84	1,84	2,08	1,24	1,63	2,65
8,4-	0,80	0,65	0,49	0,97	0,94	0,93	0,86	0,53	1,26	0,89
56b_	-0,72	-0,53	-0,54	-1,00	-0,93	-0,94	-1,08	-0,57	-1,01	-1,29
-4	1,52	1,18	1,03	1,97	1,87	1,87	1,94	1,10	2,27	2,18
8,4-	0,59	0,62	0,48	0,81	0,78	0,77	0,76	0,46	1,09	0,52
56b_	-0,49	-0,49	-0,50	-0,73	-0,66	-0,68	-0,91	-0,43	-1,12	-0,78
-3	1,08	1,10	0,98	1,54	1,44	1,45	1,67	0,89	2,21	1,30
8,4-	0,35	0,38	0,41	0,71	0,68	0,67	0,84	0,57	0,45	0,86
56b_	-0,34	-0,34	-0,37	-0,66	-0,61	-0,57	-0,98	-0,63	-0,74	-0,82
-2	0,69	0,72	0,78	1,37	1,29	1,24	1,82	1,20	1,19	1,68
8,4-	0,47	0,20	0,47	0,92	0,81	0,76	0,90	0,60	0,76	1,14
56b_	-0,53	-0,27	-0,36	-0,90	-0,85	-0,79	-0,92	-0,69	-0,73	-1,20
-1	1,00	0,47	0,83	1,82	1,67	1,55	1,82	1,29	1,48	2,34
8,4-	0,47	0,21	0,33	0,78	0,75	0,74	0,70	0,44	0,83	0,86
56b	-0,50	-0,27	-0,29	-0,69	-0,68	-0,65	-0,80	-0,45	-0,82	-0,95
	0,97	0,48	0,61	1,47	1,43	1,39	1,50	0,89	1,65	1,81
8,4-	0,25	0,18	0,14	0,50	0,48	0,48	0,46	0,33	0,42	0,40
56b_	-0,28	-0,19	-0,21	-0,35	-0,33	-0,32	-0,70	-0,34	-0,49	-0,43
1	0,53	0,38	0,36	0,85	0,81	0,79	1,16	0,67	0,90	0,83
8,4-	0,19	0,09	0,17	0,32	0,31	0,30	0,47	0,29	0,33	0,44
56b_	-0,22	-0,10	-0,20	-0,39	-0,36	-0,32	-0,72	-0,34	-0,35	-0,52
2	0,41	0,20	0,37	0,71	0,67	0,62	1,18	0,63	0,68	0,96
8,4-	0,23	0,10	0,17	0,36	0,35	0,34	0,44	0,32	0,29	0,48
56b_	-0,22	-0,10	-0,20	-0,46	-0,42	-0,38	-0,66	-0,32	-0,39	-0,56
3	0,44	0,21	0,37	0,82	0,77	0,72	1,10	0,63	0,69	1,04

8,4-	0,53	0,18	0,29	0,75	0,67	0,61	0,75	0,50	0,46	1,09
6b	-0,56	-0,12	-0,27	-0,92	-0,87	-0,81	-1,01	-0,45	-0,51	-1,01
	1,09	0,30	0,56	1,67	1,54	1,42	1,76	0,95	0,97	2,10

2.4. Выводы

Охотское море не имеет собственных цунамигенных зон, способных породить сильные сейсмогенные цунами непосредственно внутри акватории моря. Однако оно открыто к воздействию региональных цунами, порождаемых сильными ($M > 8$) подводными землетрясениями Курило-Камчатской зоны, а также проникновению сильнейших трансокеанских цунами, порождаемых мегаземлетрясениями ($M9$) в других цунамигенных зонах Тихого океана, в первую очередь, в Южно-американской.

Результаты выполненного в рамках настоящей работы численного моделирования показывают, что опасные (с высотой более 0,5 м) колебания уровня в западной части охотоморского побережья от Курило-Камчатских землетрясений могут начинаться уже при магнитуде $M_w = 8,0$. При магнитуде $M_w = 8,4$ размах колебаний уровня в районе Магадана может достигать 2 м, а при магнитуде $M_w = 9,0$ – превышать 8 м. Такое цунами, несомненно, окажет разрушительное воздействие на все прибрежные населенные пункты колымского побережья.

Изучение вариаций колебания уровня Охотского моря в зависимости от положения очага вдоль Курильской гряды показывает, что какие-то выраженные максимумы (или минимумы) по положению очага вдоль гряды отсутствуют. Для достаточно протяженных (при $M > 8$) очагов даже крупные острова (Парамушир, Симушир, Итуруп) не являются значительным барьером. Через проливы волновая энергия протекает в Охотское море и далее распределяется по всему его бассейну, при этом вариации колебаний уровня в конкретных точках определяются почти исключительно локальными условиями (батиметрией прилегающих участков шельфа, резонансными свойствами бухт и заливов).

При вариациях положения модельных очагов вкрест простираения островной дуги общей тенденцией является рост амплитуд волн на колымском побережье при приближении очага к островной дуге, который происходит даже несмотря на уменьшение средних глубин воды в очаговой области. При выходе очаговой области в задуговую часть островной дуги, амплитуды колебаний достигают максимума (размах 1,2 м для Аяна, 1,9 м для Охотска, 2,0 м для Магадана).

При приближении очага к Камчатскому полуострову происходит захват волной энергии (западным) камчатским шельфом и ее вторичное излучение в сторону Магадана, при этом амплитуды колебаний уровня в районе Магадана достигают максимума для очага, закрытого на треть полуостровом Камчатка.

Отдельную проблему для охотоморского побережья представляют вулканогенные цунами, порождаемые оползнями и обвалами, возникающими на вулканических постройках подводных и островных вулканов. Такие обвалы могут как возникать вследствие сейсмического воздействия, связанного с общим сеймотектоническим процессом данной зоны, так и порождаться непосредственно вулканическим извержением, причем необязательно происходящим на данном вулкане.

В силу морфологических особенностей значительной части охотского побережья особую опасность для него представляют обвальные цунами, возникающие при подводных и береговых оползнях и обвалах. Такие обвалы совсем необязательно связаны с сейсмической деятельностью, они могут возникать при потере стабильности склонов, возникающей по целому ряду причин (инженерные воздействия, изменения погоды, влагонасыщенности грунтов и т.д.), возникающие при этом волны цунами могут быть локально-разрушительными, хотя, как правило, не способны распространяться на большие расстояния от источника.

Наличие ледяного покрова может усиливать эффект воздействия цунами на берег (увеличение дальности заливания, вынос тяжелого льда на берег). Дополнительные опасности возникают при взломе берегового припая в периоды нахождения там людей (подледный лов рыбы). Этот эффект может иметь место при очень незначительной высоте самого цунами (первые десятки сантиметров).

Самые высокие (по всему охотоморскому побережью) волны цунами были зарегистрированы в Магадане в 1952 году (2 м) и в 1960 году (2,2 м). Одной из причин увеличенных колебаний уровня здесь могло быть резонансное усиление путем взаимодействия проходящей волны с модами собственных колебаний бухты Нагаева.

Редкость (малая повторяемость) цунамигенных явлений в Охотском море (сравнительно с соседней Курило-Камчатской зоной) порождает недооценку реальной опасности цунами в этом регионе. Следствием этого является беспечность населения при нахождении в береговой зоне и нежелание местных властей зани-

маться разработкой превентивных мероприятий по защите от цунами. Для получения оценок реальной угрозы цунами в Охотском море необходимо выполнение целенаправленных исследований по поиску и систематизации исторических сведений о проявлениях цунами, полевых экспедиционных работ по поиску следов палеоцунами на охотоморском побережье, идентификации и оценке сейсмогенного потенциала активных разломов в прибрежной зоне, а также численное моделирование распространения цунами в бассейне Охотского моря, порождаемого сейсмогенными, вулканогенными и обвальными источниками.

3 Уточнение южной и восточной границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России

В настоящем разделе обсуждаются вопросы уточнения положения южной (вдоль побережья северной и центральной Японии) и восточной (вдоль Алеутской дуги, в акватории Берингова моря) границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья РФ.

Использованные в исследовании результаты численного моделирования были получены в ходе вычислительных экспериментов, выполнявшихся для группы ближних и группы удаленных модельных цунамигенных землетрясений. Порожденные этими землетрясениями волны цунами будут далее также называться «ближними» и «удаленными».

Численное моделирование группы «ближних» цунами проводилось на сетке с шагом 1 угловая минута на 24 часа физического времени в расчетной области, простиравшейся по долготе от 127°E до 180°E и по широте от 32°N до 63°N, а группы «удаленных» цунами – на двухминутной сетке, на 48 часов физического времени в расчетной области, простирающейся в долготном направлении от 100°E до 300°E и в широтном – от 60°S до 65°N). Некоторые из рассмотренных гипотетических цунами с магнитудой 9,0 входят в обе группы, и тогда индекс соответствующего «удаленного» модельного землетрясения на рисунке заключен в скобки (см. Рисунок 3.1, Рисунок 3.2). Модельные землетрясения с меньшими магнитудами входят только в группу «ближних».

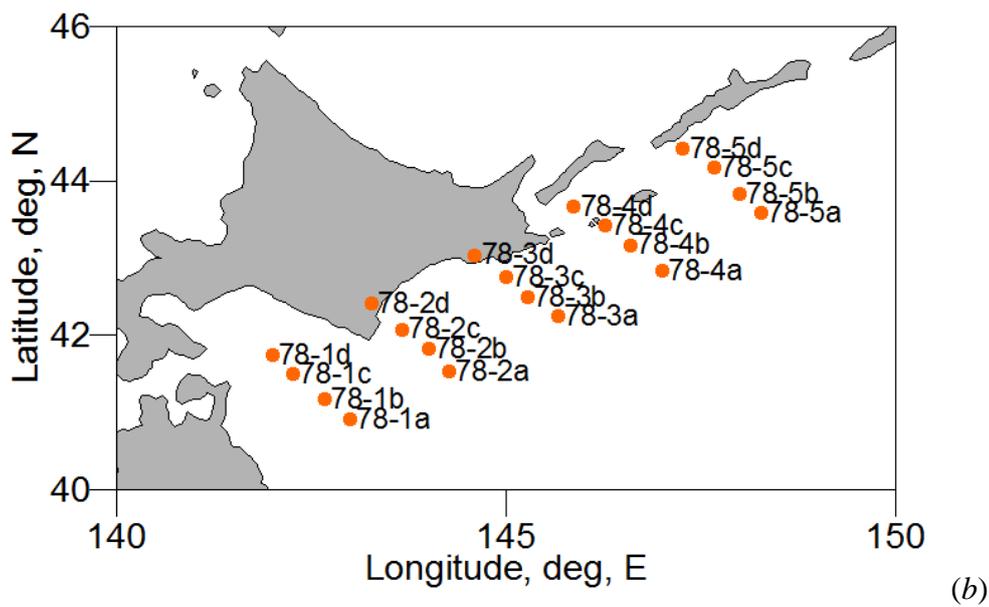
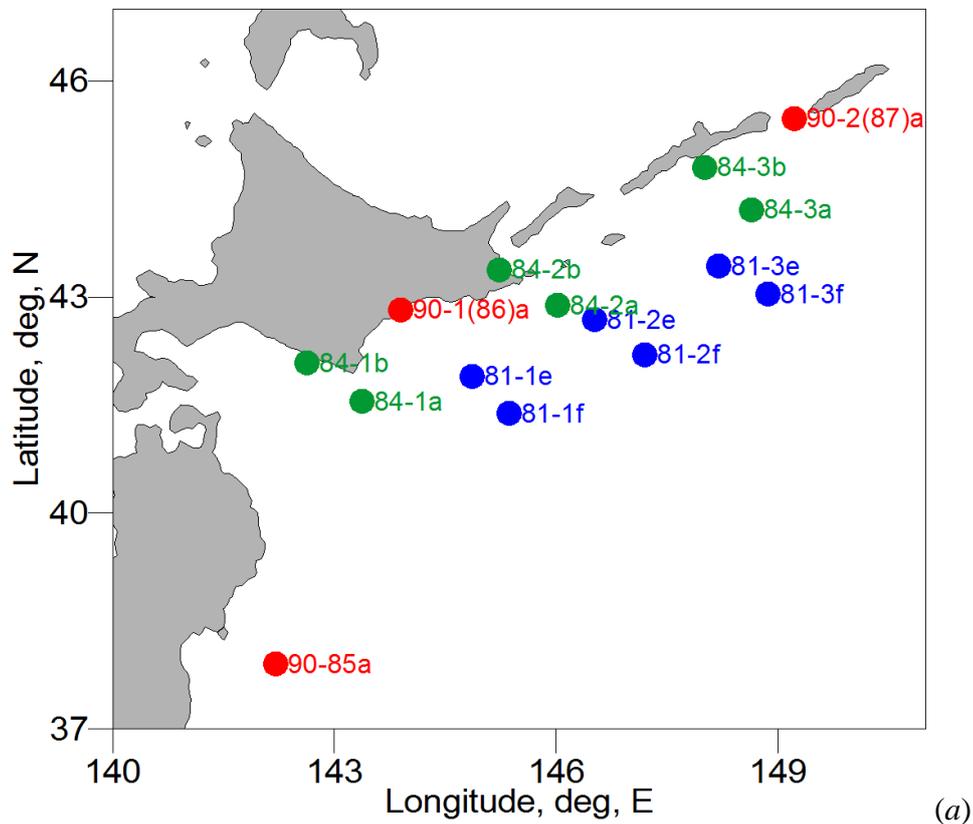


Рисунок 3.1 Схемы расположения модельных очагов гипотетических цунамигенных землетрясений, рассмотренных при уточнении южной границы ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России. Разноцветными кружочками указаны положения эпицентров землетрясений с различной магнитудой.

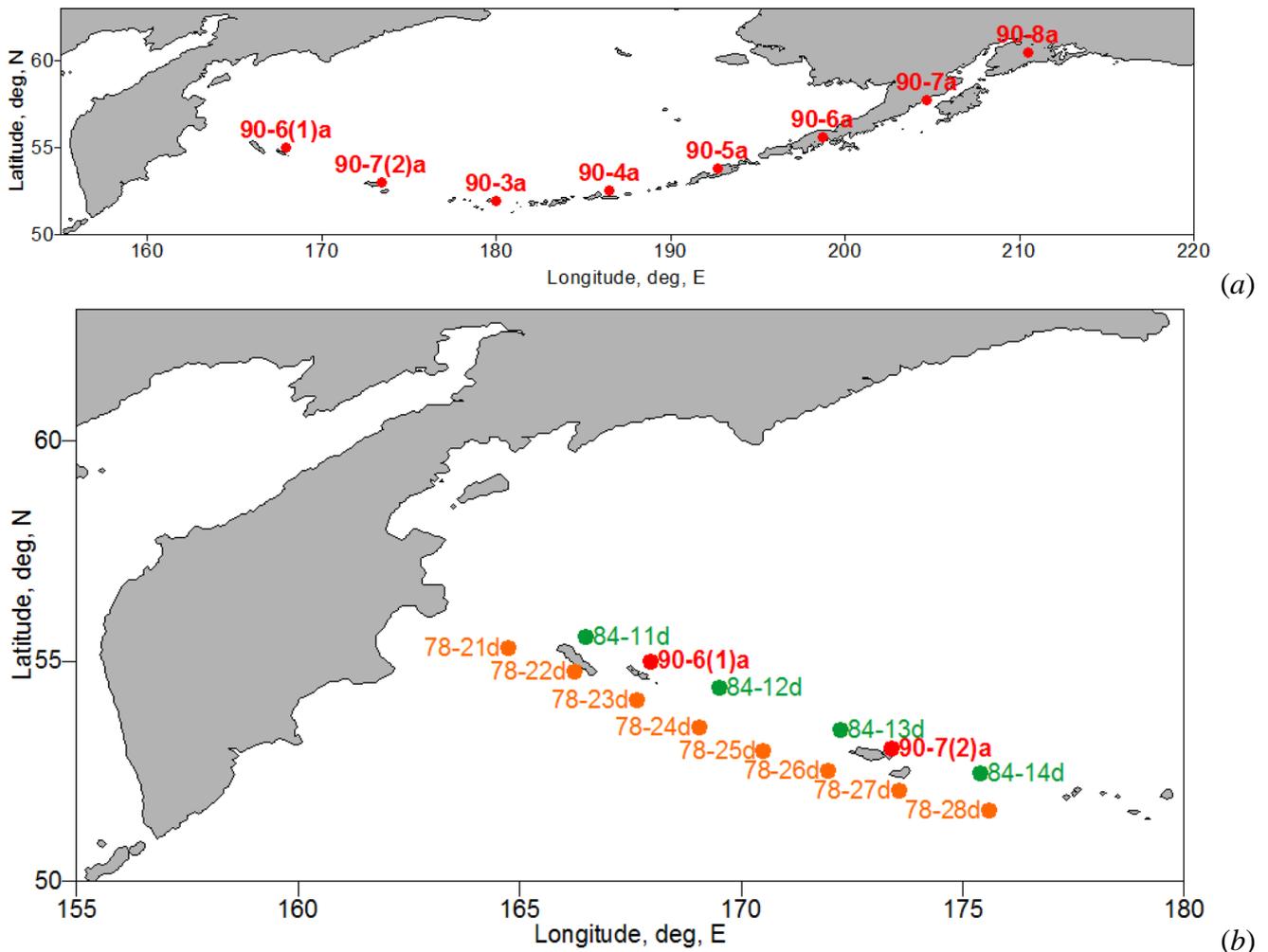


Рисунок 3.2 Схемы расположения модельных очагов гипотетических цунамигенных землетрясений, рассмотренных при уточнении восточной границы ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России. Разноцветными кружочками указаны положения эпицентров землетрясений с различной магнитудой.

3.1. Южная граница ближней цунамигенной зоны

Курило-Камчатская сейсмогенная зона продолжается на юг до сочленения с Японской зоной, которое имеет место в районе пролива Цугару (пролив между островами Хоккайдо и Хонсю). Обе эти зоны маркируют восточный край тихоокеанской плиты, которая подвигается под азиатскую плиту. Сочленение происходит достаточно плавно и непрерывно, с изменением лишь направления простирания зон, которое в районе сочленения меняется примерно на 45° .

Мелкофокусная сейсмичность, в отношении как слабых (Рисунок 3.3), так и сильных землетрясений (Рисунок 3.4), достаточно равномерно заполняет всю полосу между осью глубоководной впадины и островной дугой. Поэтому вопрос об установлении положения южной границы зоны ответственности сейсмической подсистемы СПЦ должен решаться главным образом на основе рассмотрения особенностей распространения цунами в этом районе. Материалом для решения этого вопроса являются данные о проявлении исторических цунами из этого района на побережье РФ и результаты численного моделирования распространения цунами от модельных очагов подводных землетрясений.

Южная граница территориальных вод Российской Федерации в этом районе проходит примерно по широте $43,2^\circ\text{N}$, все очаги южнее этой линии формально принадлежат акватории, находящейся под юрисдикцией Японии, однако, порож-

даемые ими волны цунами в большинстве случаев достигают российского побережья в районе Южных Курил и нередко оказываются там опасными.

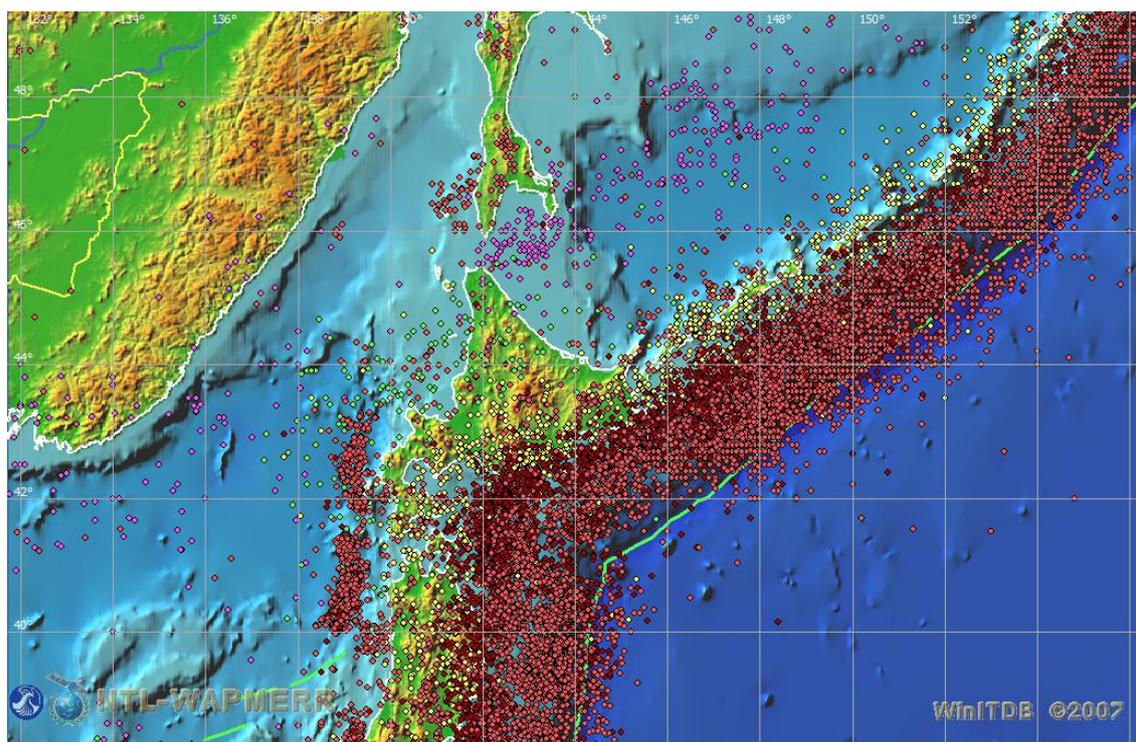


Рисунок 3.3 Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Японской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M>5$ за период с 1900 по 2011 гг.

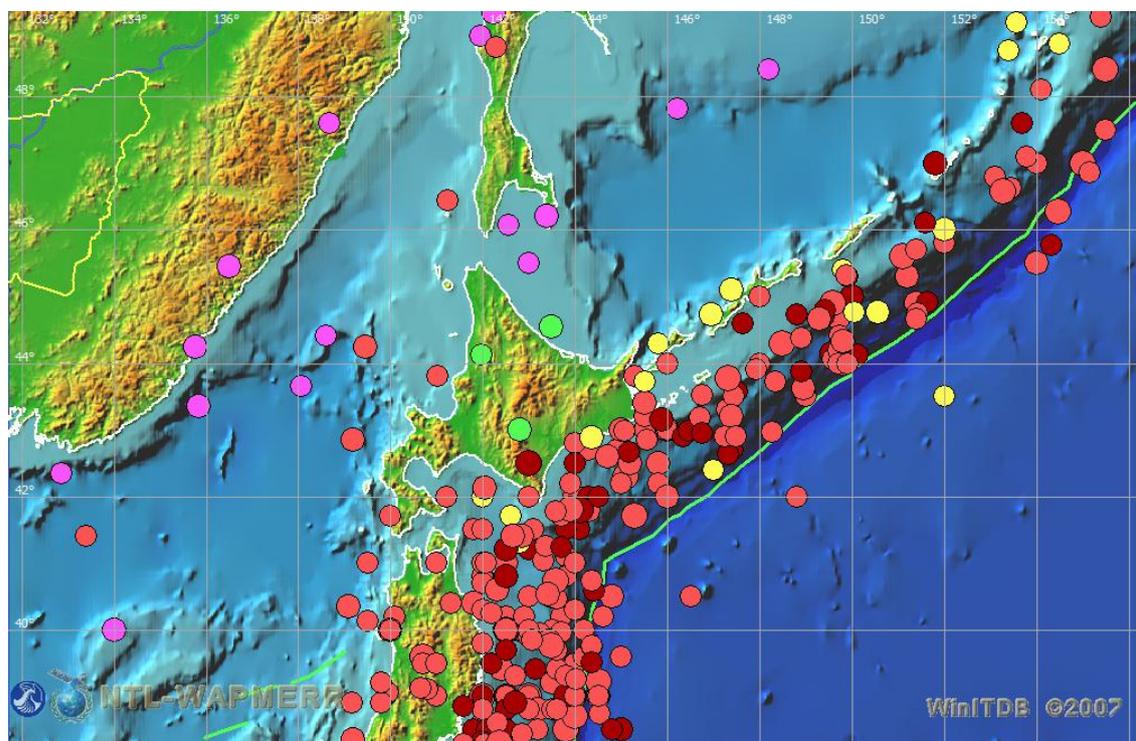


Рисунок 3.4 Карта очагов сильных (с $M>7$) очагов землетрясений для района сочленения Курило-Камчатской и Японской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M>5$ за период с 1900 по 2011 гг.

3.2.1. Анализ исторических данных

Разрушительное землетрясение 22 марта 1894 года с магнитудой 7,9 (по другим оценкам 8,1) произошло в 19:23 местного времени на северо-восточном побережье Хоккайдо (координаты эпицентра $42,5^{\circ}\text{N}$, $146,0^{\circ}\text{E}$, по другим данным

42,3°N, 145,1°E), нохватило также юг Курильских островов. Максимальные сотрясения наблюдались в местечке Аккеша (Akkeshi, 43,033°N, 144,85°E) на восточном побережье Хоккайдо, но высота цунами там была всего 2 м.

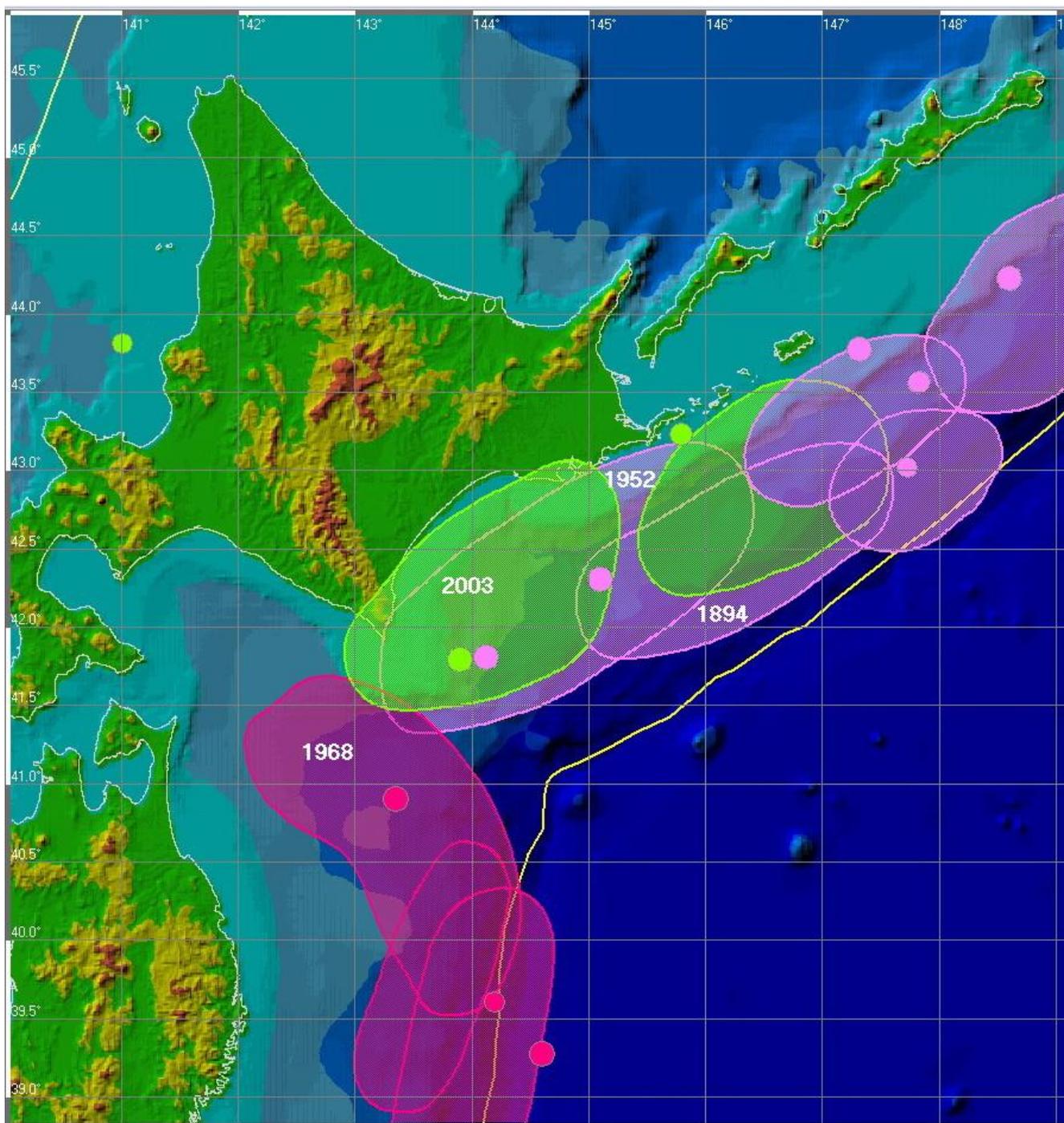


Рисунок 3.5 Карта очагов сильнейших цунамигенных землетрясений в зоне сочленения курило-камчатской и японской сейсмогенных зон.

Возникшее цунами оказалось слабым (максимальные высоты в ближайших к очагу точках побережья были в пределах 1,2 – 1,5 м), но затронуло обширную область от южных Курил до центральной части побережья Санрику. База данных (NGDC Database, 2010) приводит со ссылкой на каталог (Соловьев, Го, 1974) высоты на Шикотане (без указания места) – 3 м, на Кунашире (Южно-Курильск) – 1,2 м. На Кунашире цунами повредило 12 домов, унесло четыре и потопило три лодки. При этом максимальная высота (4 м) на японском побережье приводится для Мияко (Miyako, 39,65°N, 141,983°E), расположенном в префектуре Ивате на

о-ве Хонсю. Такое распределение высот цунами вдоль берега является нетипичным и достаточно странным, однако, делать на этом основании какие-то выводы об очаге цунами сложно, поскольку землетрясение произошло в доинструментальную эру, поэтому оценки его магнитуды и положения получены только на основании анализа макросейсмических наблюдений и могут быть весьма недостоверными.

Очень сильное землетрясение **4 марта 1952 года** на юго-востоке о-ва Хоккайдо произошло в 10:23 местного времени с очагом на шельфе вблизи мыса Эримо (в точке **42,15°N, 143,85°E**). Это было сильнейшее ($M_s = 8,3$, $M_w = 8,1$) землетрясение с момента начала инструментальных наблюдений в этом районе, оно ощущалось на всей территории Хоккайдо. Землетрясение, однако, вызвало достаточно умеренное цунами с высотами на ближайшем побережье, не превышавшими 4 – 6 м. Максимальная волна с высотой 6,5 м наблюдалась в местечке Аккеша (Akkeshi, 43,033°N, 144,85°E). Данные о проявлении этого цунами на Южных Курильских островах отсутствуют, как в отечественных каталогах (Соловьев, Ферчев, 1961; Соловьев, 1978; Заякин, 1996), так и в базе данных NGDC (NGDC Database, 2010). Отсюда можно сделать вывод о том, что, по крайней мере, разрушений и заметного ущерба оно там не вызвало.

Сильное землетрясение **16 мая 1968 года** с магнитудой $M_s = 8,1$, $M_w = 8,2$ произошло в 9:49 местного времени непосредственно в зоне сочленения Курило-Камчатской и Японской зон (**40,9°N, 143,35°E, $H_{top} = 7$ км**). Средние высоты заливания по северо-восточному побережью Хонсю были в пределах 3 – 5 м, по южному побережью Хоккайдо – в пределах 3 – 4 м (максимальная высота 5,0 м была измерена в порту Уракава). Максимальный заплеск (5,0 м) на Хонсю был измерен в местечке Танеити. По данным каталога С.Л.Соловьева (Соловьев, 1978) высоты волн на Итуруп (Буревестник) – 0,5 м, на Кунашире (Южно-Курильск) – 0,5 м. На Шикотане в бухте Мало-Курильской наблюдались нерегулярные приливы и отливы с размахом в пределах 1 м.

Последнее по времени сильное цунамигенное землетрясение (магнитуды $M_s = 8,1$, $M_w = 8,3$) в этом районе произошло **25 сентября 2003 года**. Инструментальные координаты его эпицентра (**41,79°N, 143,90°E, $H_{top} = 27$ км**) определены с высокой точностью по данным как наземных, так и подводных кабельных станций. Оно также вызвало достаточно умеренное цунами на побережье Хоккайдо с высотами 2,5 – 3 м. Максимальная высота волн на побережье Хоккайдо составила 4,0 м (в местечке Хьякунинхама (Hyakuninhama, 41,96°N, 143,242°E)). Данные о наблюдениях этого цунами на российском побережье отсутствуют.

Цунамигенные землетрясения с очагами южнее 41°N, расположенными вдоль восточного побережья о-ва Хонсю, и давшие максимальные заплески на побережье Санрику 15 июня 1896 года ($M_s = 7,6$, $H_{max} = 38$ м) и 2 марта 1933 года ($M_s = 8,1$, $H_{max} = 29$ м), по имеющимся данным не вызвали каких-либо ощутимых колебаний уровня в районе Южных Курильских островов. Отсюда можно заключить, что цунамигенные очаги с расположением южнее зоны сочленения Курило-Камчатской и Японской островных дуг, не представляют реальной угрозы для российского побережья. Исключением здесь могут быть только предельно возможные по силе мега-землетрясения с магнитудой 9,0 и выше. Как известно (Кайстренко и др., 2011), цунами Тохоку 11 марта 2011 года вызвало колебания

уровня с размахом до 2,2 м на всех Южных Курилах и наблюдалось на северных Курилах с высотами до 2 м.

3.2.2. Анализ данных численного моделирования

Предложенные к рассмотрению в этом разделе гистограммы отражают распределения вдоль защищаемого побережья максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн, а также времен их прихода. Эти значения рассчитывались в 693 виртуальных мареографах (Рисунок 3.6).

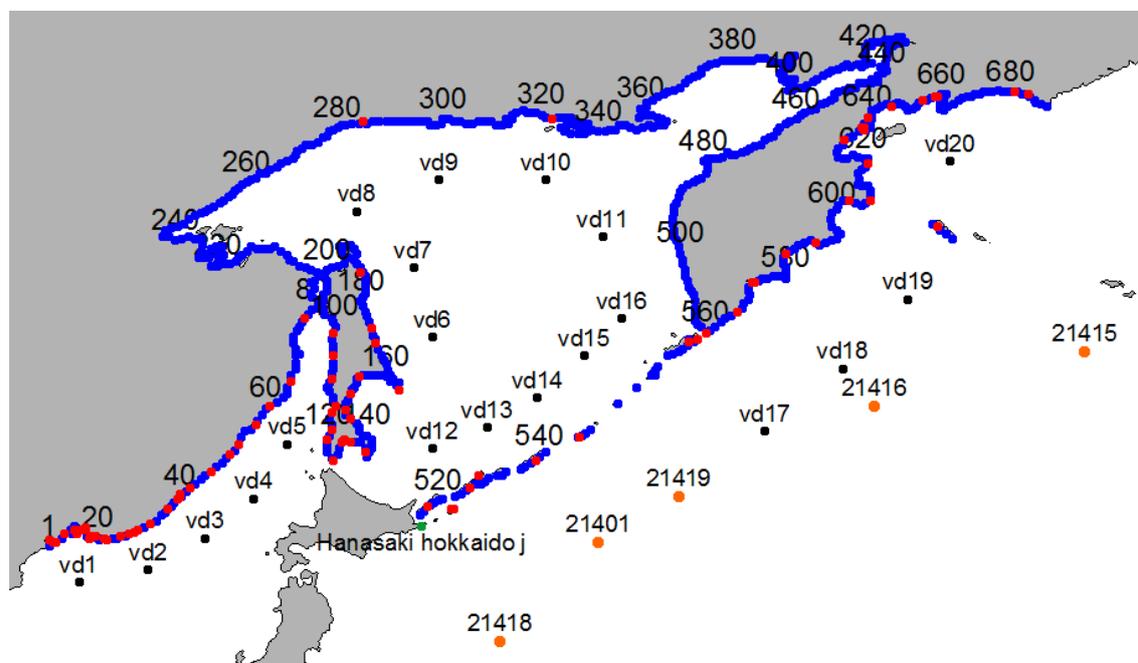


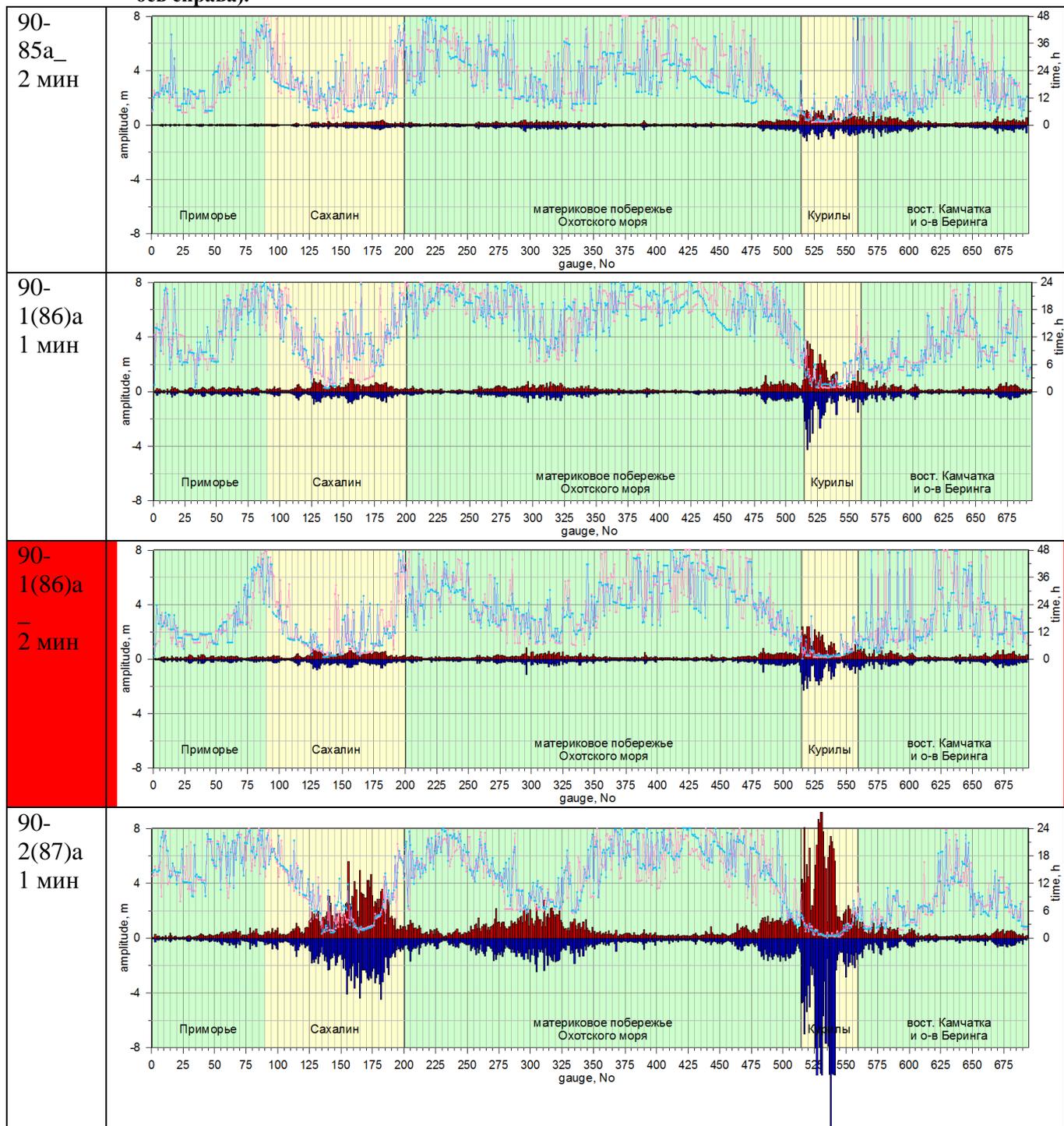
Рисунок 3.6 Схема расположения 693 виртуальных мареографов, в которых рассчитывались характеристики волн цунами при уточнении южной границы ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России. Красные точки – «защищаемые» пункты, синие – дополнительные виртуальные мареографы на защищаемом побережье, зеленые – прибрежные датчики PTWS, оранжевые – виртуальные датчики DART, черные – дополнительные виртуальные датчики DART.

Анализируя гистограммы, построенные по результатам моделирования волн цунами, порожденных модельными землетрясениями с магнитудой 9,0 (Таблица 3.1), эпицентры которых расположены вблизи южной оконечности Курильской гряды (Рисунок 3.1(a)), заметим, что амплитуды волн, порожденных очагом 90-85а, не превышают 1 м, а соответствующие высоты – 2 м. По своим параметрам этот очаг очень близок к очагу японского (Тохоку) цунами 2011 г., и рассчитанные с его использованием характеристики гипотетического цунами близки к наблюдавшимся. Очаг 90-1(86)а является безусловно опасным для Дальневосточного побережья России, в особенности – для Южных Курил (размах амплитуд – до 8 м), а очаг 90-2(87)а представляет серьезную опасность не только для Курильских островов, но и для Сахалина и материкового побережья Охотского моря (размахи до 9 и 5 м соответственно).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для источников этого региона с магнитудой 9,0 южную границу ближней цунамигенной зоны для Дальневосточного побережья России можно провести между источниками 90-85а и 90-1(86)а.

Для сравнения и оценки влияния разрешающей способности используемой расчетной сетки в таблицу включена также гистограмма, соответствующая очагу 90-1(86)а, но рассчитанная на двухминутной сетке (строка, выделенная красным цветом), что в этом случае приводит к изменению амплитуд волн в 1,5–2 раза.

Таблица 3.1 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 9,0, расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).



Анализ ситуации, возникающей для очагов с магнитудой 8,4 выполнялся для «ближних» региональных очагов двух типов ((a) – Таблица 3.2 и (b) – Таблица 3.3), отличающихся помимо положения своих эпицентров также и двумя дру-

гими параметрами механизмов – глубиной залегания ((a) – $H_{top} = 5$ км, (b) – $H_{top} = 25$ км) и вертикальной подвижкой ((a) – $D_0 = 6,1$ м, (b) – $D_0 = 5,5$ м).

Рассматриваемые гистограммы показывают, что очаги, расположенные вблизи южной части острова Хоккайдо (84-1a и 84-1b), опасности не представляют, однако при смещении эпицентров к северной части острова (очаги 84-2a и 84-2b) соответствующие размахи волн на южных Курилах достигают 4 м. При дальнейшем смещении к северу (очаги 84-3a и 84-3b) размахи волн у защищаемого побережья, естественно, увеличиваются, и на юге Курил составляют 10 – 12 м, оставаясь, однако, практически безопасными для северной части архипелага и остального Дальневосточного побережья России. На примере очагов 84-3a и 84-3b ясно видно, что уменьшение глубины залегания источника приводит к росту амплитуд генерируемых им волн цунами.

Таким образом, для землетрясений с магнитудами 8,4 южную границу ближней цунамигенной зоны для Дальневосточного побережья России можно провести между источниками (84-1x и 84-2x).

Таблица 3.2 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 8,4 (типа (a)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).

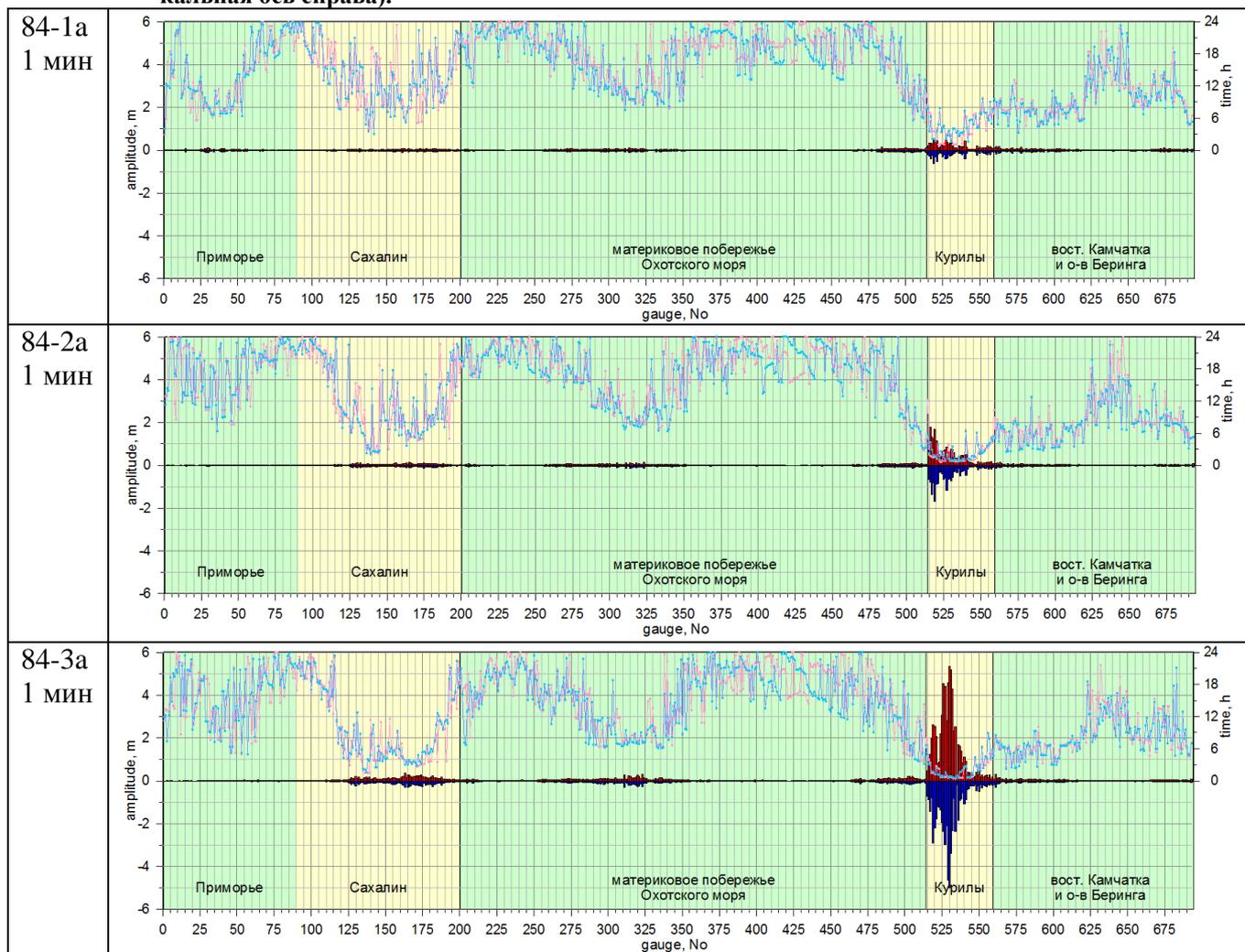
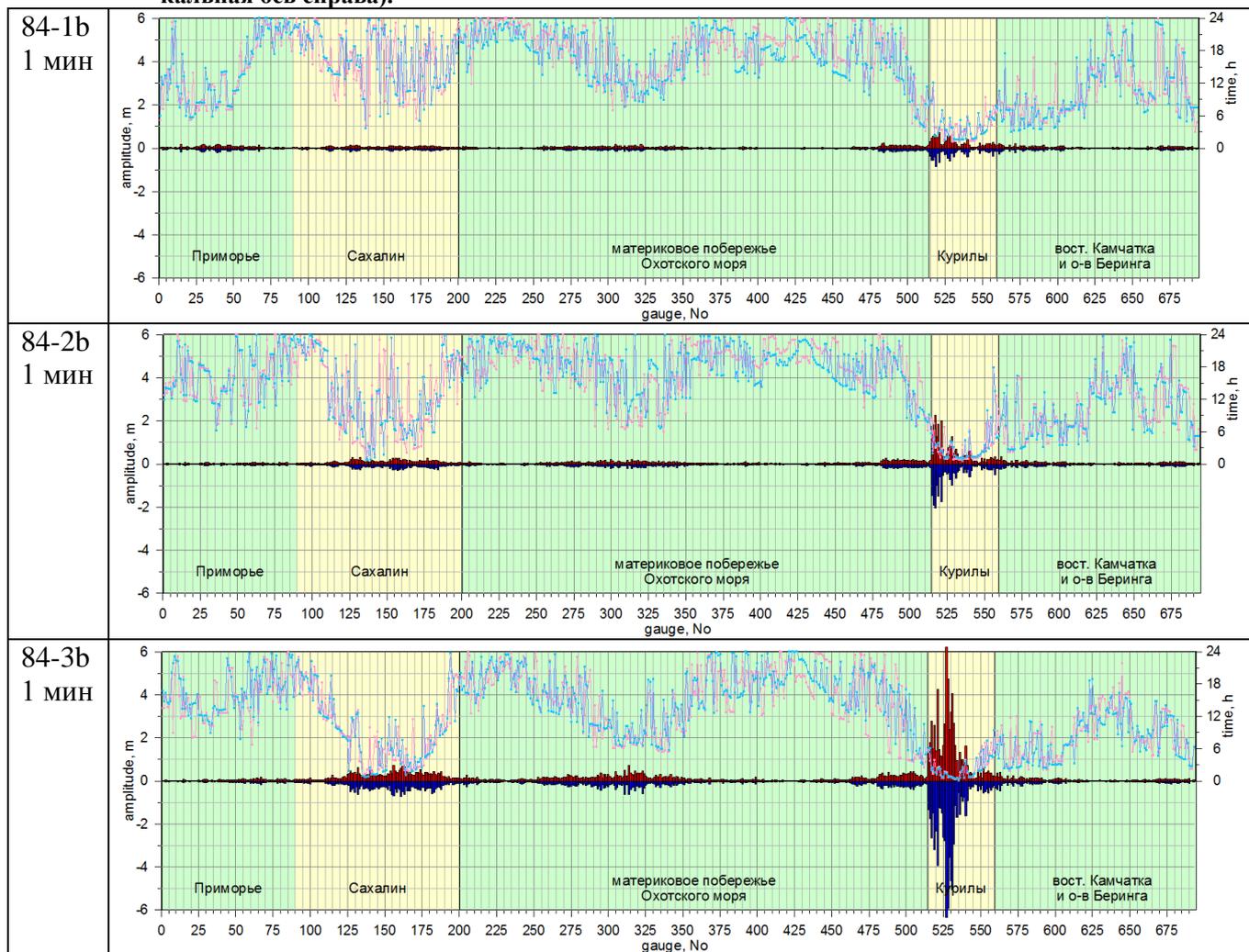


Таблица 3.3 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 8,4 (типа (b)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).



Рассматривавшиеся «ближние» региональные очаги с магнитудой 8,1 двух типов ((e) – Таблица 3.4 и (f) – Таблица 3.5) отличались помимо положения своих эпицентров также и другим параметром механизмов – углом падения плоскости разрыва, отсчитываемым от горизонтальной плоскости (δ – «dip angle») и измеряющимся в градусах ((e) – $\delta = 45^\circ$, (f) – $\delta = 135^\circ$). Здесь обнаружено, что очаги, размещенные напротив центра о-ва Хоккайдо (81-1e, 81-1f) порождают несущественные амплитуды на защищаемом побережье, но при смещении очагов к северу амплитуды, как и в случае землетрясений с магнитудой 8,4, заметно увеличиваются, так что уже источники 81-2e и 81-2f приводят к размаху колебаний водной поверхности, достигающих на Курильских островах 2 м, а более северные очаги 81-3e и 81-3f – 6 м. Сравнение последних двух показывает, что уменьшение глубины залегания источника приводит к небольшому росту амплитуд генерируемых им волн цунами.

В результате сопоставления можно сделать вывод о том, что для землетрясений с магнитудами 8,1 южную границу ближней цунамигенной зоны для Дальневосточного побережья России можно провести между источниками (81-1x и 81-2x).

Таблица 3.4 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 8,1 (типа (e)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).

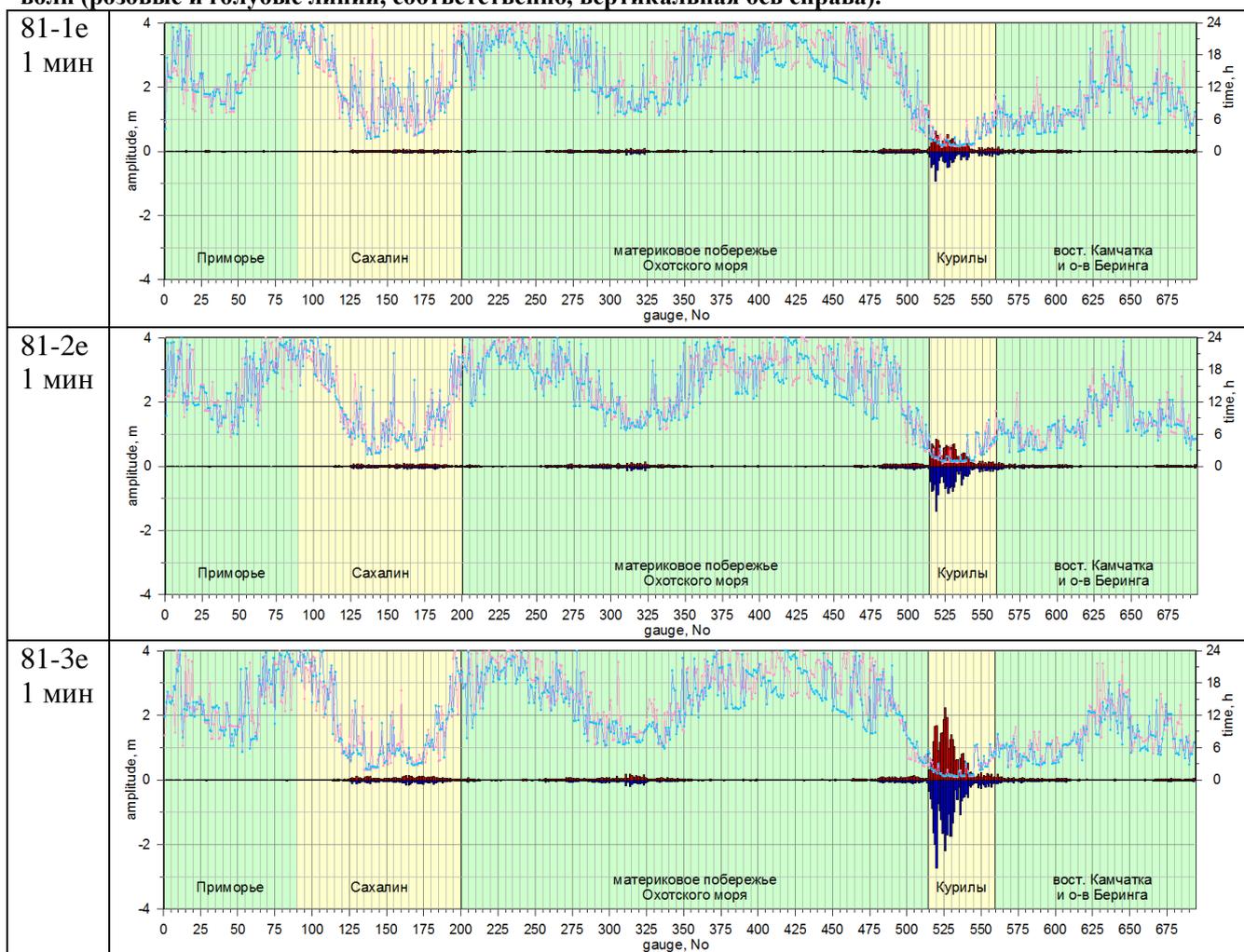
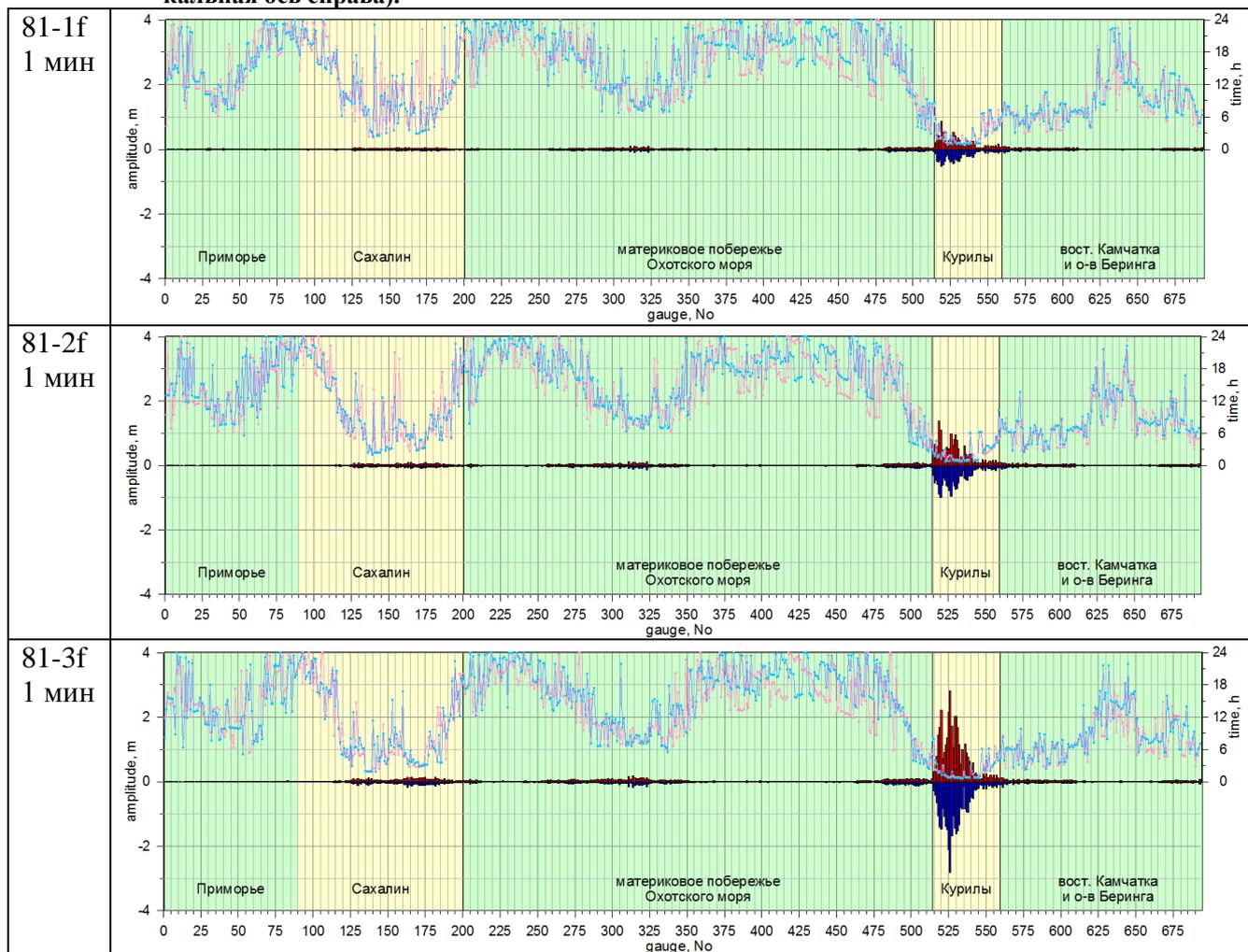


Таблица 3.5 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 8,1 (типа (f)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).



Совокупность рассматривавшихся «ближних», региональных очагов с магнитудами 7,8 состояла из четырех типов ((a) – Таблица 3.6, (b) – Таблица 3.7, (c) – Таблица 3.8 и (d) – Таблица 3.9), отличавшихся помимо положения своих эпицентров также и двумя другими параметрами механизмов – глубиной залегания ((a) – $H_{top} = 5$ км, (b) – $H_{top} = 15$ км, (c) – $H_{top} = 25$ км, (d) – $H_{top} = 35$ км) и вертикальной подвижкой ((a) – $D_0 = 3,42$ м, (b) – $D_0 = 2,74$ м, (c) – $D_0 = 2,74$ м, (d) – $D_0 = 2,74$ м).

Из анализа были исключены практически не проявившиеся на защищаемом побережье очаги с номерами 78-1х и 78-2х, очаги 78-3х также проявляются незначительно. Очаги серии «78-4х», расположенной примерно напротив самых южных островов Курильской гряды, порождают волны с размахом на этих островах до 2 м. Для следующей вдоль разлома серии очагов «78-5х» ширина зоны с ощутимыми амплитудами (до двух метров и более) несколько увеличивается.

Сопоставление источников различных типов показывает, что, несмотря на увеличение заглубления очага, наибольшие высоты волн порождаются ближайшими к побережью модельными землетрясениями типа (d).

Таким образом, для землетрясений с магнитудами 7,8 южную границу ближней цунамигенной зоны для Дальневосточного побережья России можно провести между источниками типов (78-3х и 78-4х).

Таблица 3.6 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 7,8 (типа (а)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).

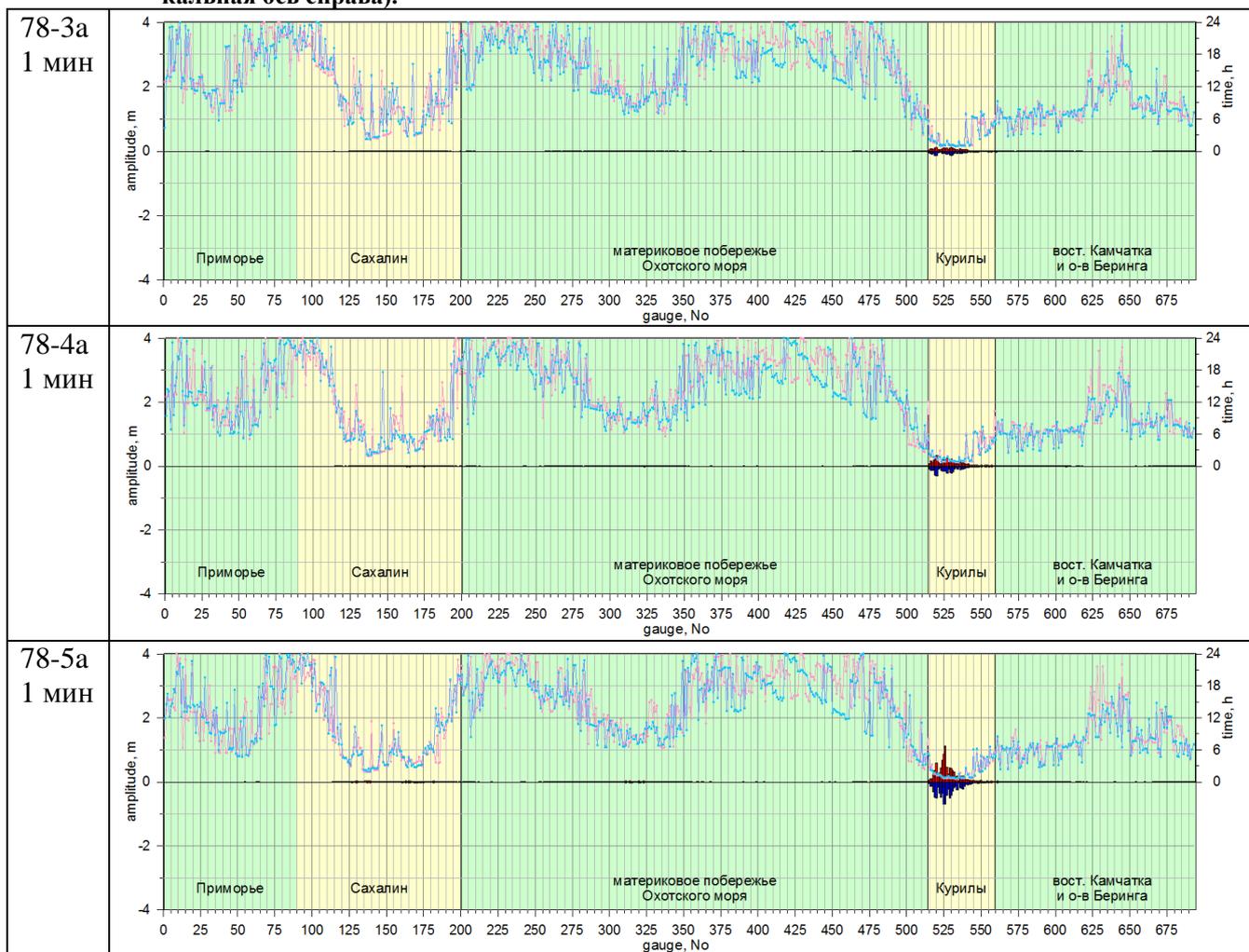


Таблица 3.7 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 7,8 (типа (b)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).

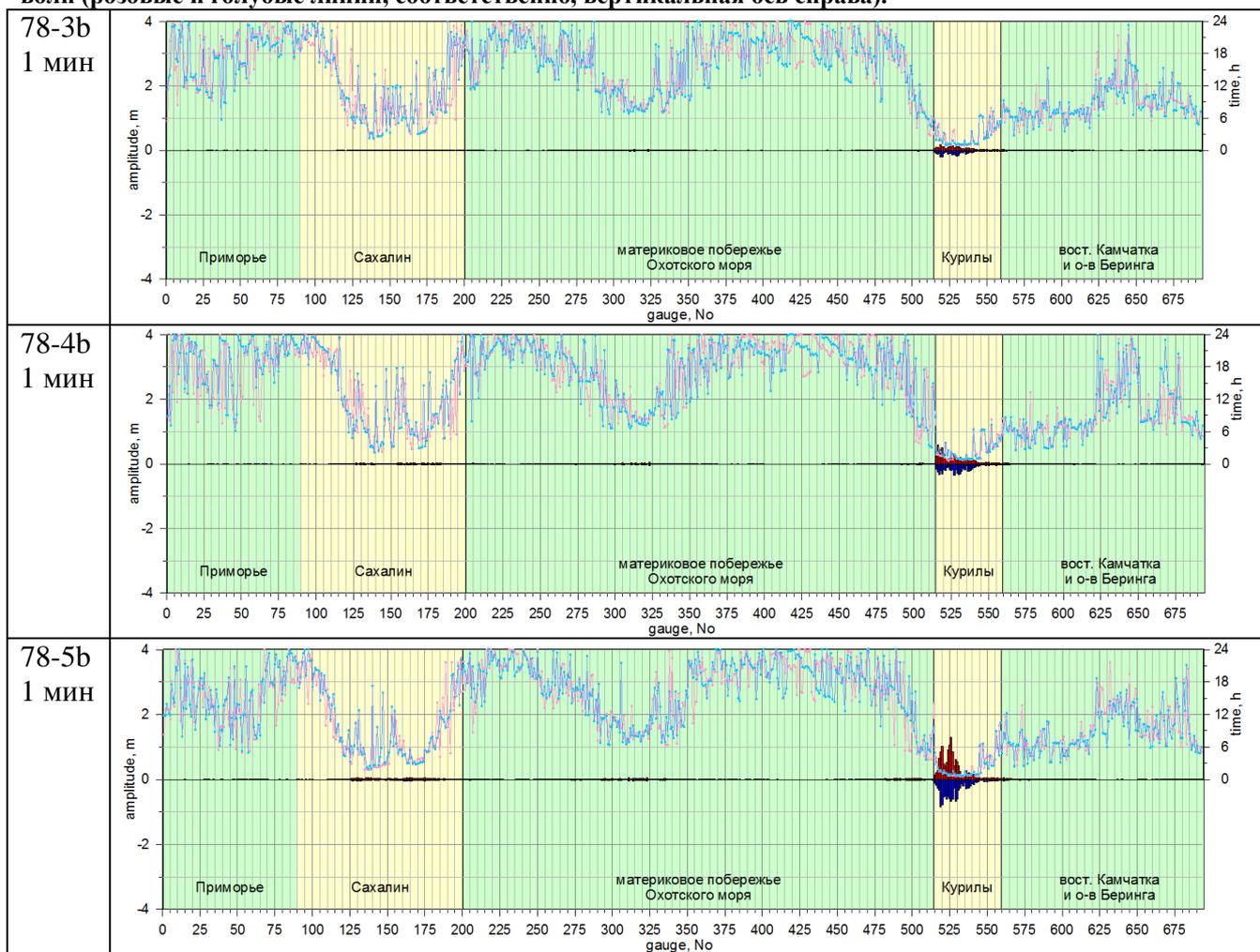


Таблица 3.8 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 7,8 (типа (с)), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).

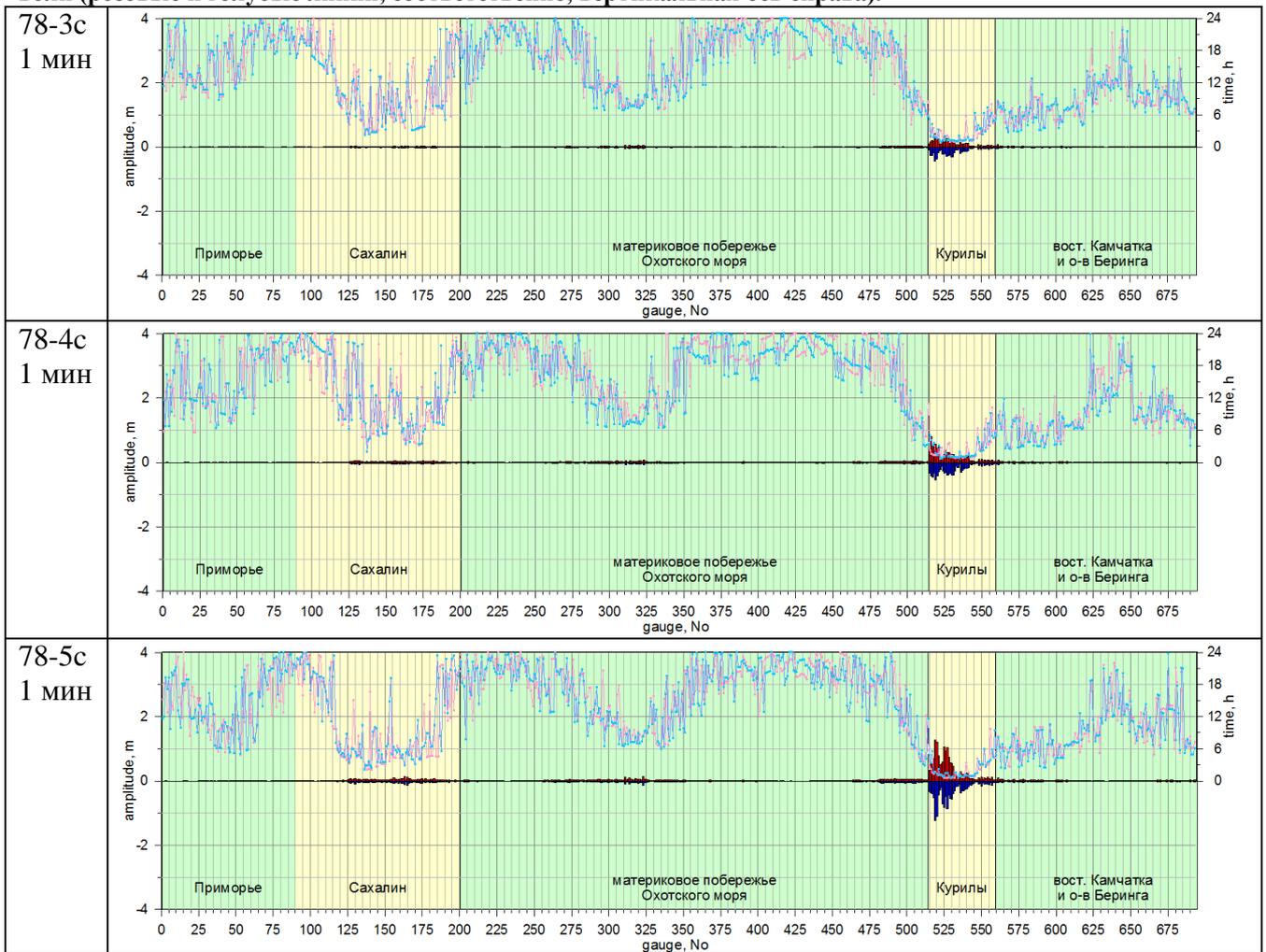
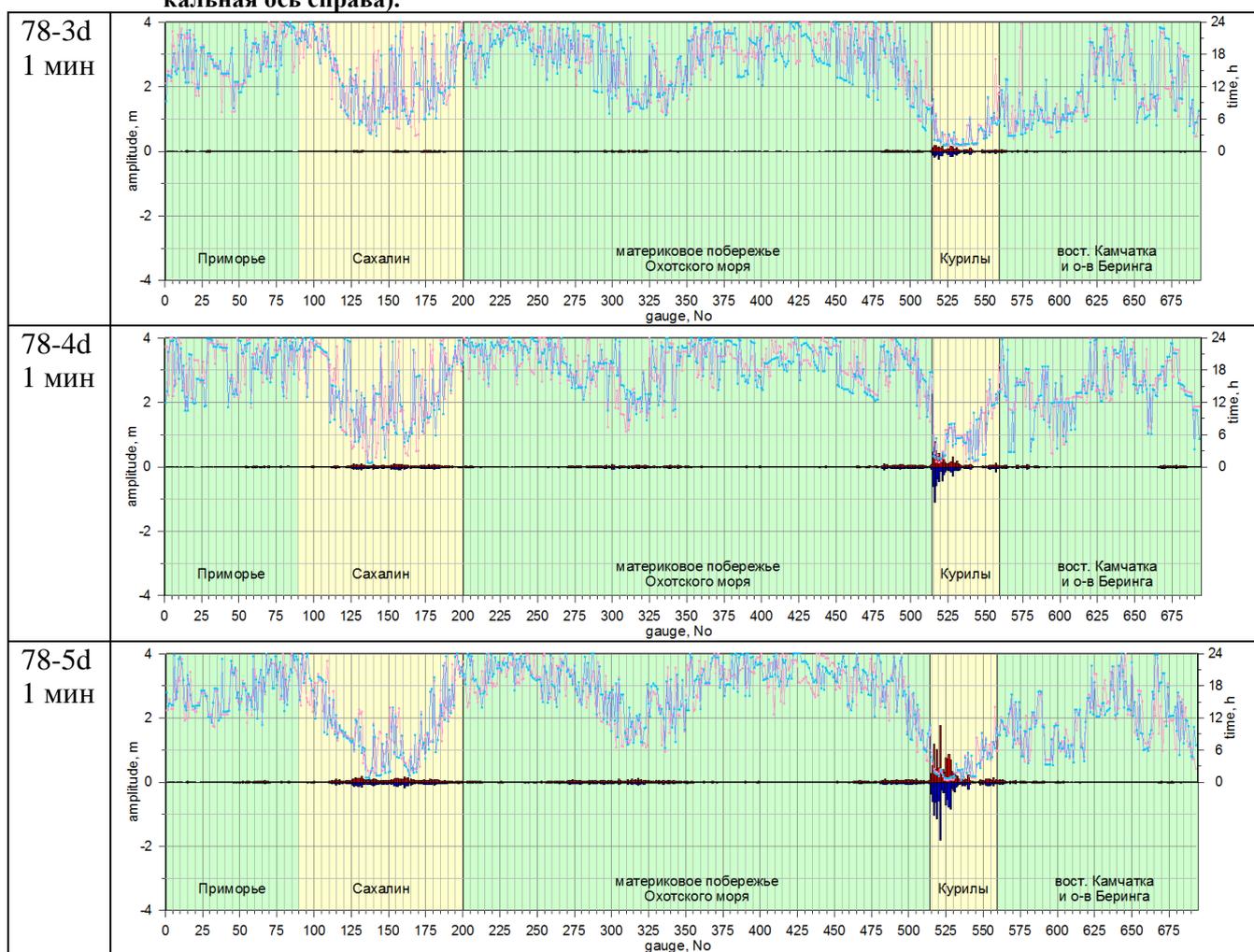


Таблица 3.9 Распределения (гистограммы) на защищаемом побережье максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева, значения величин), порожденными модельными землетрясениями с магнитудой 7,8 (типа *(d)*), расположенными вблизи южной оконечности Курильской гряды, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии, соответственно, вертикальная ось справа).



3.2. Восточная граница цунамигенной зоны

3.2.1. Анализ исторических данных

Вопрос о восточной границе цунамигенной зоны, представляющей непосредственную угрозу для побережья РФ, существенно более сложный, чем вопрос о южной границе. Его сложность обусловлена как сеймотектоническими особенностями этого района, так и конкретной конфигурацией побережья и расположением относительно него цунамигенных зон. Основной сеймотектонической особенностью пограничного региона является стыковка в этом районе двух крупнейших сейсмогенных зон Тихого океана – Курило-Камчатской, являющейся восточной границей Тихоокеанской плиты, и Алеутской, маркирующей ее северную границу, сочленение которых происходит под прямым углом в районе полуострова Камчатский.

Каждая из этих зон имеет в недавнем прошлом историю возникновения крупнейших (класса M9) землетрясений и высокий уровень современной сейсмичности (Рисунок 3.7, Рисунок 3.8). В отношении структуры этого крупного сеймотектонического узла, современных движений в нем и преобладающих механизмов землетрясений у исследователей нет единого мнения, поэтому при чис-

ленном моделировании рассматривались различные варианты размещения плоскости разрывов в очагах модельных землетрясений и типы подвижек по ним.

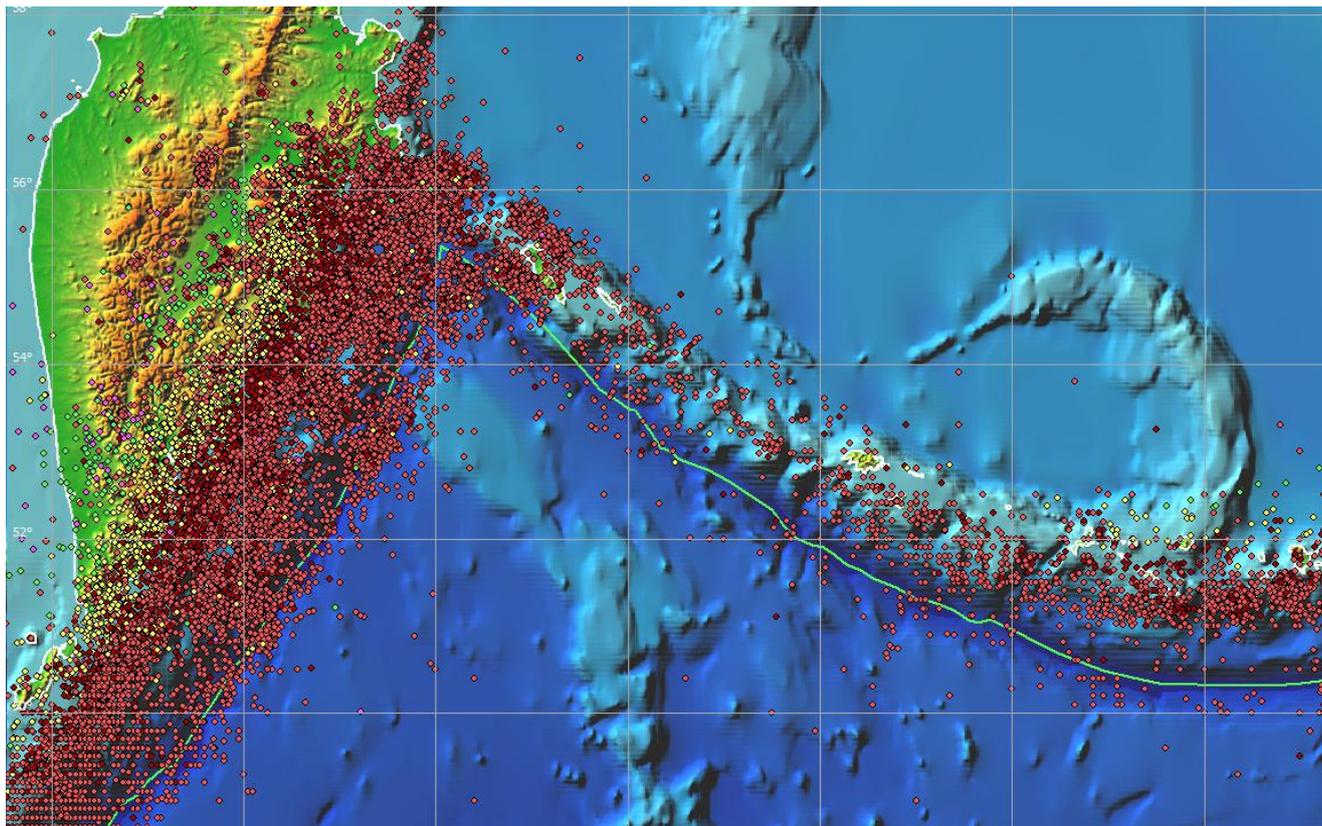


Рисунок 3.7 Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M > 5$ за период с 1900 по 2011 гг.

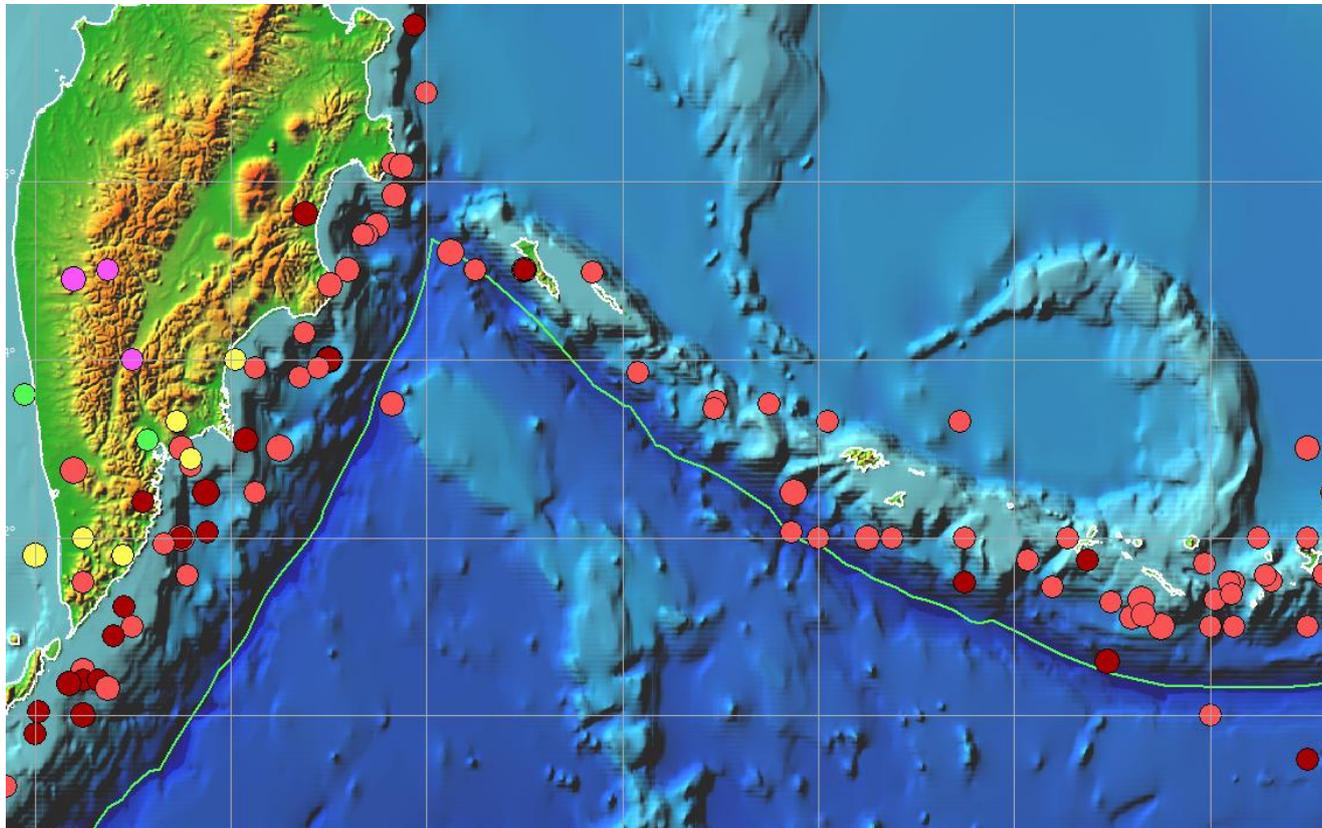


Рисунок 3.8 Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M > 7$ за период с 1900 по 2011 гг.

Другой проблемой является почти полное отсутствие исторических данных о проявлениях цунами из этого района (западная часть Алеутской дуги) на Даль-

невосточном побережье РФ. Последнее по времени крупное землетрясение здесь произошло 4 марта 1965 года. Его инструментальный эпицентр ($51,23^{\circ}\text{N}$, $178,52^{\circ}\text{W}$) был определен в районе Крысыих о-вов, однако, облако афтершоков протянулось почти на 700 км к западу от этой точки, достигая практически пограничной линии юрисдикции России и США в этом районе. Магнитуда основного толчка M_s по данным разных агентств находилась в диапазоне от 7,8 до 8,7, магнитуда M_w в настоящее время оценивается величиной 8,7. Максимальный заплеск (10,6 м) был измерен на о-ве Шемяя.

Появлений каких-либо *опасных* волн цунами от этого землетрясения вблизи российского побережья зафиксировано не было. Они носили очень ограниченный характер и были заметны только на записях мареографов. По данным каталога С.Л.Соловьева (Соловьев, 1978) высоты волн составили в Северо-Курильске (о-в Парамушир) – 0,1 м, в Бабушкино (о-в Шумшу) – 0,2 м, на о-ве Матуа 0,15 м, в Буревестнике (о-в Итуруп) – 0,15 м.

Далее к западу от очага 1965 года сильных землетрясений за весь инструментальный период зафиксировано не было. Наиболее раннее историческое событие из этого района относится к 1849 году (сентябрь или, по другим данным, октябрь). В каталоге (Соловьев, Ферчев, 1961) со ссылкой на работу (Дорошин, 1870) приведено следующее описание события: "1849 года 16 сентября острова Беринга и Медный испытали сильное землетрясение, от которого на Медном обвалился утес, завалив весьма хорошее котовое лежбище; упали казарма, баня, пильный сарай, и во всех без исключения домах развалились печи. Оно началось в 8 вечера и продолжалось до утра следующего дня. Вода в продолжении всего этого времени то прибывала, то убывала. Жители спасались на горах". Очевидно, что речь идет о близком и сильном землетрясении, породившем цунами на Командорских островах, однако его положение и магнитуда не могут быть сколь-нибудь достоверно установлены на основании этого единичного сообщения. В это время восточный берег Камчатки был уже достаточно хорошо обжит русскими поселенцами, отсутствие сведений о проявлениях этого цунами говорит о том, что волны цунами, если и дошли до Камчатки, оказались там весьма слабыми.

Далее, в "Новом каталоге ..." (1977) есть землетрясение, случившееся в этом районе 30 января 1917 года, которое возможно сопровождалось цунами (Новый каталог..., 1977). Его магнитуда оценивается по разным источникам величиной от 7,8 до 8,1. При этом для координат очага имеются две довольно различающиеся оценки: $55,2^{\circ}\text{N}$, $164,5^{\circ}\text{E}$ ((Новый каталог..., 1977) и $56,5^{\circ}\text{N}$, $163,0^{\circ}\text{E}$ (база данных по цунами (NGDC Database, 2010), помещающие его по разные стороны (южную и северную) Командорской дуги. В любом случае, достоверные сведения о проявлениях цунами от этого землетрясения отсутствуют.

Других сильных землетрясений в этой части Алеутской дуги не зафиксировано. По мнению многих исследователей ее западный участок, лежащий между западной границей очага землетрясения 1965 года (примерно в районе 170°E) и полуостровом Камчатский, представляет собой крупную (длиной порядка 500 км) сейсмическую брешь, способную разрядиться землетрясением с магнитудой не менее 8 (Рисунок 3.9).

Относительно возможного механизма этого будущего землетрясения существуют различные точки зрения. Одна из них состоит в том, что это будет пологий разрыв вдоль главной субдукционной границы в этой зоне, отделяющей погружающуюся тихоокеанскую плиту от перекрывающей ее Берингоморской плиты.

В этом случае в подвижке по разрыву может быть большая доля сдвиговой компоненты. Другая точка зрения состоит в том, что при этом землетрясении в движение может быть вовлечен Командорский блок, представляющий собой узкую, относительно независимую часть Берингоморской плиты, примыкающую к океанической литосфере (Рисунок 3.10). По результатам современных измерений, этот блок также движется на восток (как и западная часть Тихоокеанской плиты), но по своему собственному закону. Как результат этого относительного движения на ограничивающих его разломах (Беринга на севере и Стеллера на юге), а также внутри блока, могут накапливаться значительные напряжения, которые затем могут разряжаться в достаточно сильных, с магнитудам до 7,5 (возможно, и выше) землетрясениях (Левина и др., 2009). При этом механизм подвижки в очагах этих землетрясений может быть любым, вплоть до взбросо-сбросовых подвижек по крутой плоскости разрыва.

Примером такой ситуации является Суматранское землетрясение 24 декабря 2004 года, когда при общем сдвиговом характере относительного движения двух крупных плит (Индийской и Бирманской) возникло сильнейшее землетрясение с преимущественно поддвиговым типом механизма, породившее разрушительное трансокеанское цунами. Другим, совсем свежим примером является землетрясение с магнитудой $M_s = 7,8$, происшедшее 28 октября 2012 года на западном побережье Канады в районе о-вов Шарлотты. Очаговая область этого землетрясения находится в районе контакта Тихоокеанской плиты, движущейся на север – северо-запад (т.е. по касательной) относительно Североамериканской плиты. Подвижка, реализовавшаяся в очаге этого землетрясения, оказалась, тем не менее, преимущественно поддвиговой. Возникшее цунами не вызвало каких-либо разрушений, но было зарегистрировано всеми мареографными станциями северо-восточного сектора Тихого океана.

В серии численных расчетов распространения цунами, выполненных в рамках данного договора, проверялись обе эти возможности. Рассматривались очаги модельных землетрясений с магнитудами от 7,8 до 9,0 и разрывами, ориентированными вдоль Алеутской дуги с пологим падением плоскости разрыва ($\delta=10^\circ$) под Берингоморскую плиту. Для каждого модельного очага проверялось также влияние изменения направления подвижки – от правостороннего сдвига ($\lambda=170^\circ$), через всбросо-сдвиг ($\lambda=135^\circ$) до пологого надвига ($\lambda=90^\circ$).

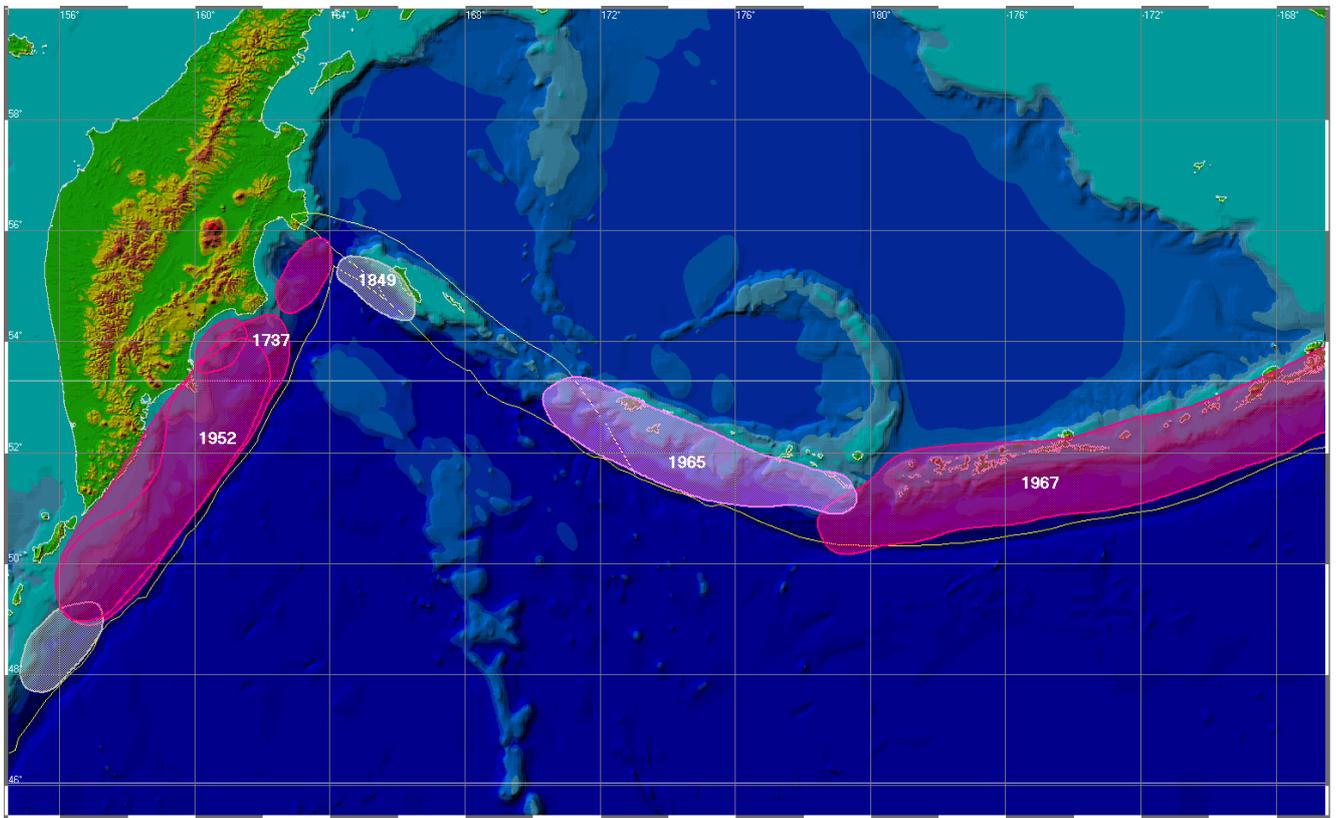


Рисунок 3.9 Карта очагов сильнейших цунамигенных землетрясений в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон.

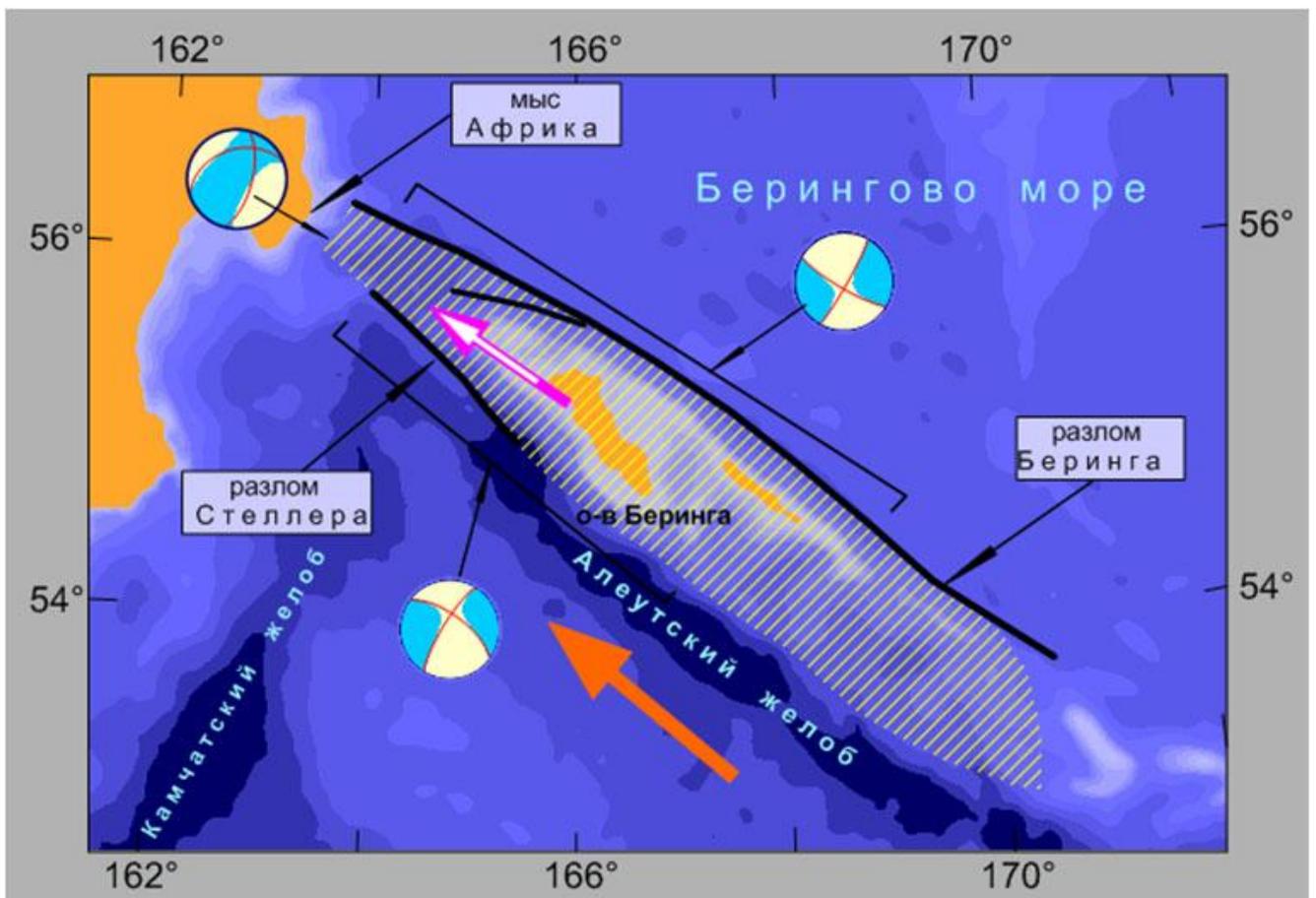


Рисунок 3.10 Сеймотектоническое строение западной части Алеутской дуги. Командорский блок, ограниченный с севера разломом Беринга и с юга разломом Стеллера, в целом движется в западном направлении и может иметь тектонический режим, отличный от режима остальной западной части Алеутской дуги (Левина и др., 2009).

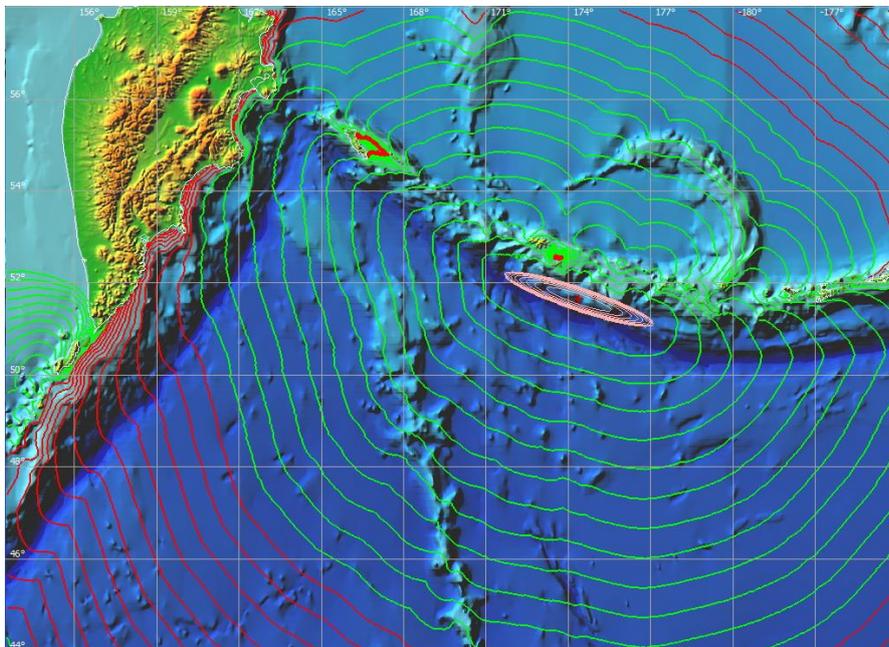


Рисунок 3.11 Карта времен распространения цунами от гипотетического источника, расположенного в западной части Алеутской гряды в районе 175 в.д. Изохроны проведены через 5 мин, смена цвета – через 1 час.

3.2.2. Анализ данных численного моделирования

Анализируемые в этом разделе гистограммы отражают распределения вдоль защищаемого побережья максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн, а также времен их прихода. Эти значения рассчитывались в 134 виртуальных мареографах (Рисунок 3.12) на одноминутной сетке в «ближней» расчетной области.

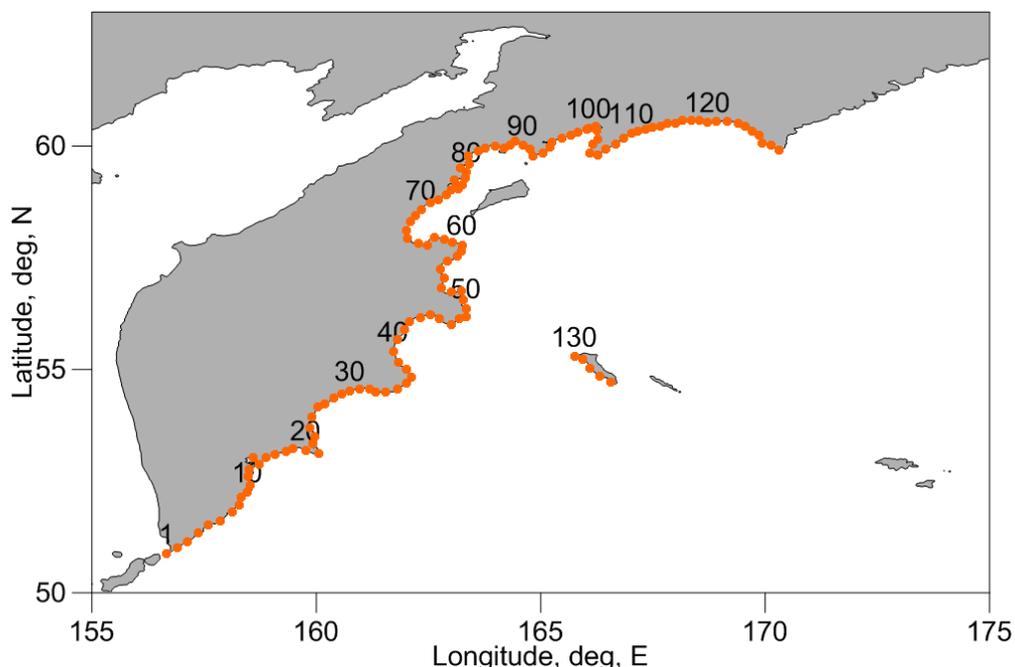


Рисунок 3.12 Схема расположения 134 виртуальных мареографов, в которых рассчитывались характеристики волн цунами при уточнении восточной границы ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России.

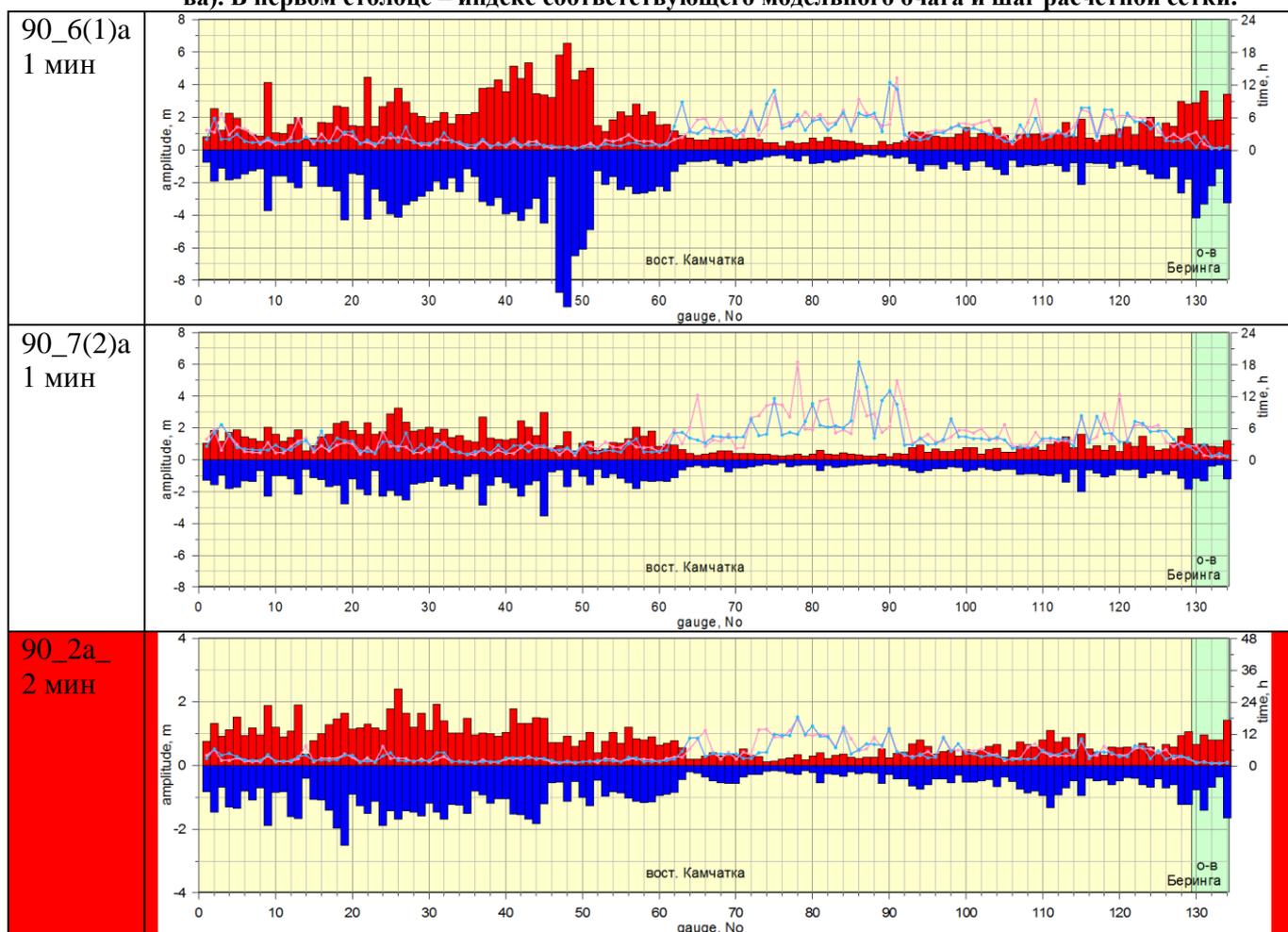
Как показывают гистограммы (Таблица 3.10), цунамиопасность для Дальневосточного побережья России (в основном, конечно, Камчатки и, в меньшей степени, – Курильских островов) представляют не только входящие в «ближнюю»

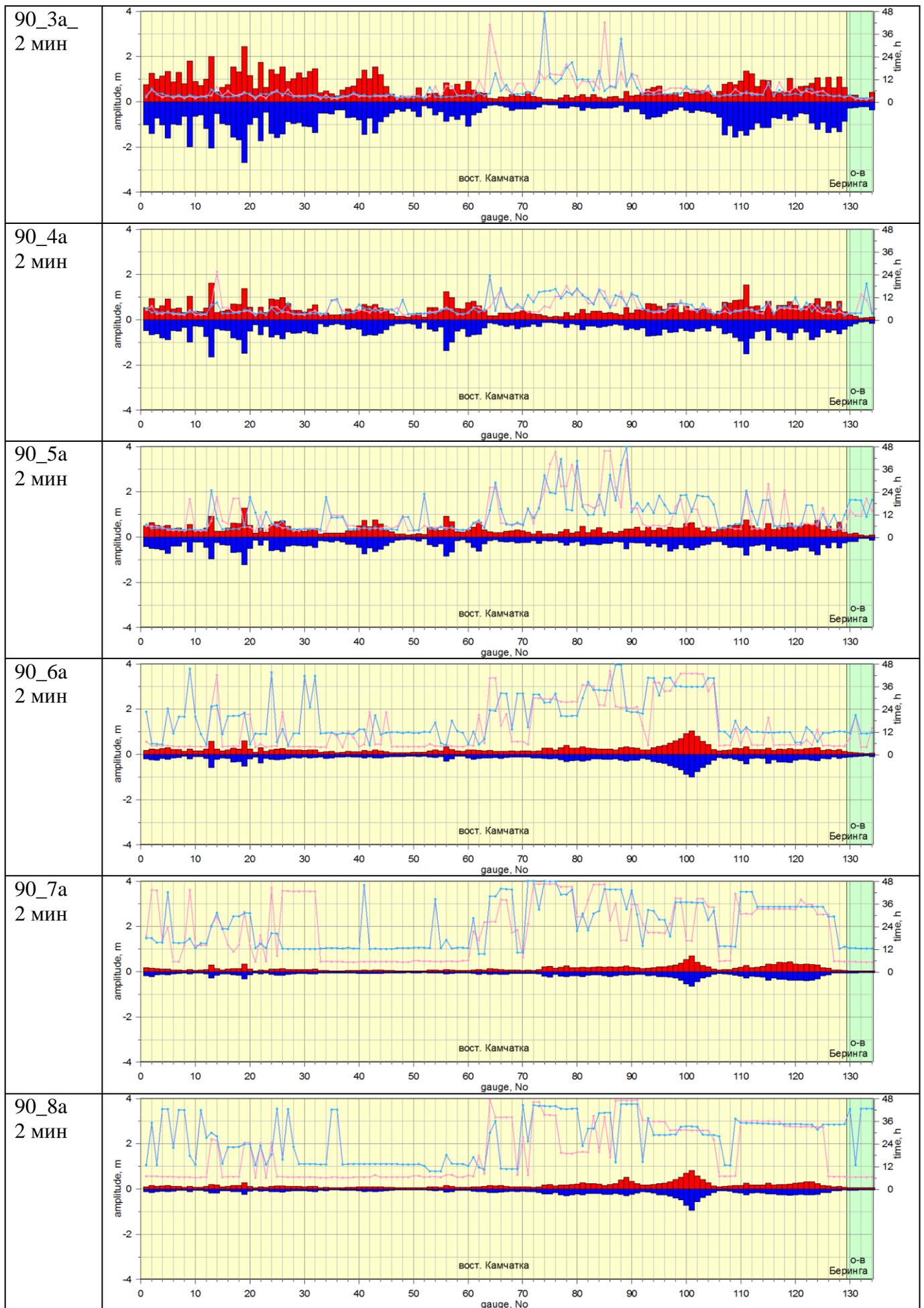
систему очаги 90_6а и 90_7а (см. Рисунок 3.2а), но также и более далекие алеутские источники с номерами 90_3а и 90_4а из системы «удаленных» очагов. Для них размахи амплитуд волн составляют в отдельных мареографах до 5 и 3 м соответственно, наблюдаются также и размахи до 2 м на восточном побережье Сахалина (такого сильного воздействия на сахалинское побережье у более близких алеутских очагов не наблюдается). По мере удаления эпицентров землетрясений от побережья России цунамиопасность для РФ генерируемых ими очагов уменьшается, так что наблюдаются только амплитуды волн с размахами до 2 м (у источника 6а) с западной стороны м. Говена.

Таким образом, восточная граница ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России, для цунамигенных мега-землетрясений с магнитудой 9,0 может быть проведена между очагами 90_4а и 90_5а.

Для сравнения и оценки влияния разрешающей способности используемой расчетной сетки в таблицу включена также гистограмма, соответствующая очагу 90-7(2)а, но рассчитанная на двухминутной сетке (строка, выделенная красным цветом), что в этом случае приводит к изменению амплитуд волн примерно в 1,5 раза.

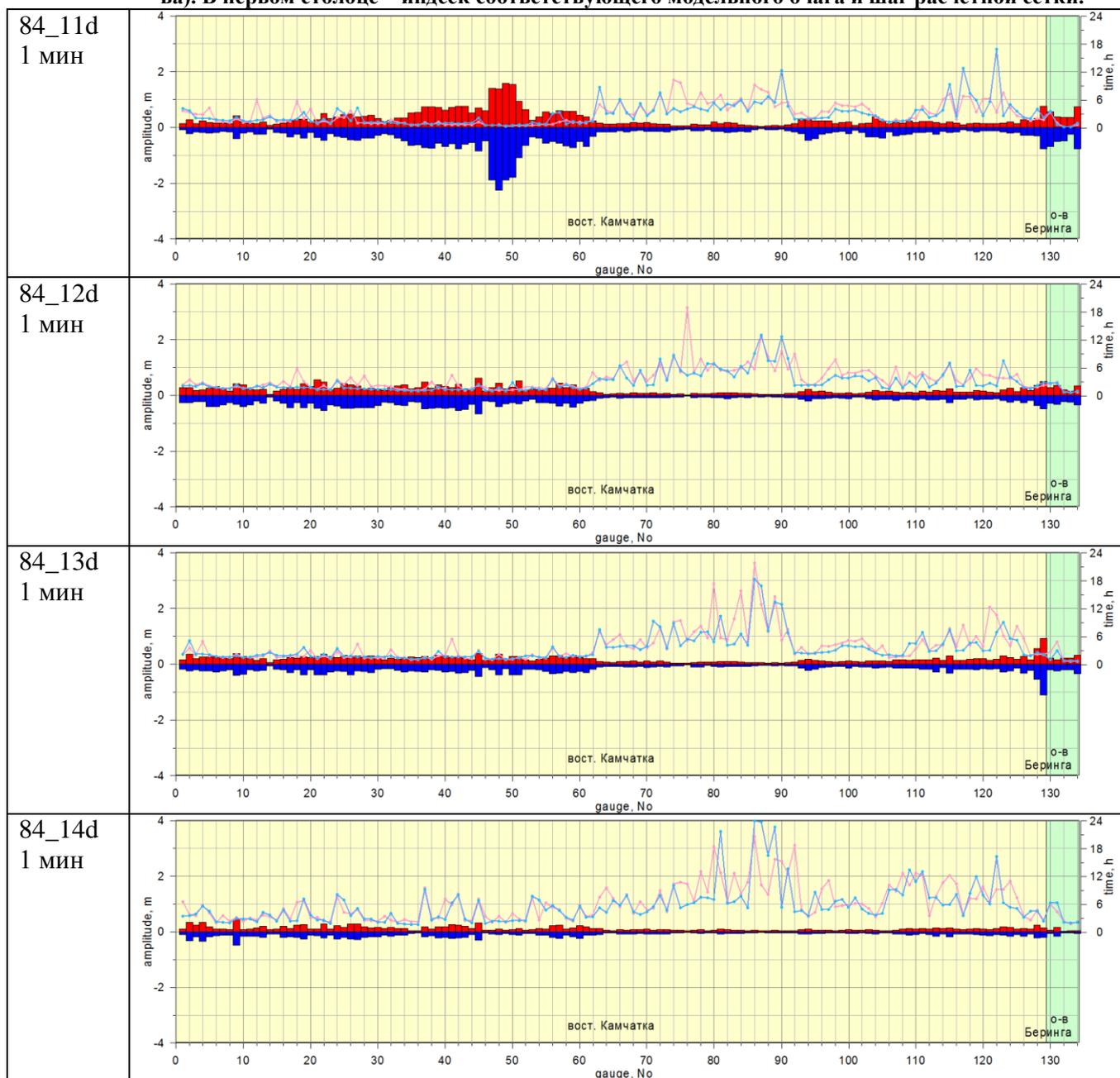
Таблица 3.10 Распределения (гистограммы) максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных цунамигенными землетрясениями с магнитудой 9,0, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага и шаг расчетной сетки.





Из рассмотренных источников магнитуды 8,4 (Рисунок 3.2b) определенную опасность представляет только ближайший из них – 84_11d, проявляющийся на ближайшем к эпицентру восточном побережье Камчатки (с размахом до 3 м). При смещении очага к востоку амплитуды сильно уменьшаются (Таблица 3.11), однако, для очага 84_13d наблюдается резкий всплеск до 2 м на оконечности мыса Олюторский, в то время как на остальном рассматриваемом побережье размахи не превышают 1 м. Следовательно, для землетрясений с магнитудами 8,4, восточная граница ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России, может быть проведена между очагами 84_11d и 84_21d.

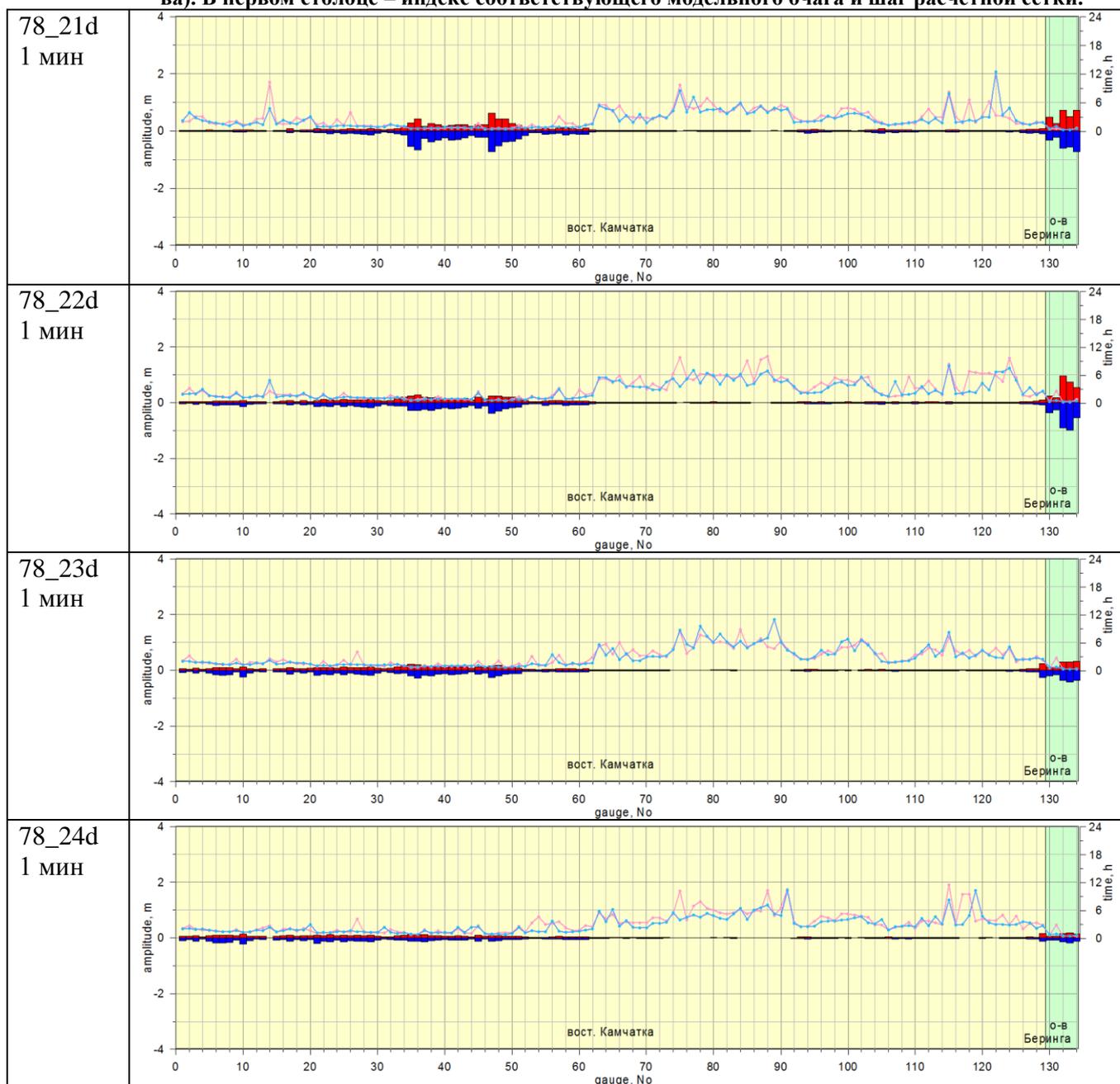
Таблица 3.11 Распределения (гистограммы) максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных цунамигенными землетрясениями с магнитудой 8,4, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага и шаг расчетной сетки.



Что касается модельных землетрясений с магнитудой 7,8 (Рисунок 3.2b), то определенную опасность представляют только ближайшие к Камчатке очаги

78_21d и 79_22d, которые приводят к появлению в центральной части восточного побережья Камчатки и на острове Беринга волн с размахом до 1 – 1,5 м (Таблица 3.12). Более удаленные очаги опасности для побережья РФ не представляют. Так что восточная граница ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России для цунамигенных землетрясений с такой магнитудой, пролегает между источниками 78_22d и 78_23d.

Таблица 3.12 Распределения (гистограммы) максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных цунамигенными землетрясениями с магнитудой 7,8, а также времена регистрации этих экстремальных значений высот волн (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа). В первом столбце – индекс соответствующего модельного очага и шаг расчетной сетки.



Существующая в настоящий момент неопределенность в определении механизмов вероятных цунамигенных землетрясений зоне сочленения Алеут и северо-востока Камчатки, наряду с очевидной зависимостью характера проявления сейсмогенных цунами у побережья с особенностями механизмов порождающих их землетрясений привела к необходимости исследования параметрической зависимости цунамиопасности землетрясений относительно изменения направление

подвижки в плоскости разрыва (угол λ_0 – strike angle – отсчитывающийся против часовой стрелки от направления простирания плоскости разрыва, измеряется в градусах).

В рассмотренных выше механизмах алеутских очагов (Рисунок 3.2*b*) этот параметр принимал значение 170° . Известно, что соответствующий механизм является не самым «цунамиопасным» при фиксированных магнитуде и других параметрах. Поэтому (см. Таблица 3.13 – Таблица 3.26) были дополнительно рассмотрены очаги с углами $\lambda_0 = 135^\circ$ (промежуточный) и $\lambda_0 = 90^\circ$ (самый опасный вариант). Значение соответствующего угла указано в первом столбце. Во втором столбце во всех указанных выше таблицах размещены гистограммы, формат которых полностью совпадает с представленными выше гистограммами, и «свечения цунами» – изображения, иллюстрирующие распределения максимальных положительных амплитуд волн цунами за все время моделирования. Такие свечения ясно указывают сильную зависимость направления распространения волновой энергии от направления подвижки в плоскости разрыва. Совместный анализ свечений и гистограмм позволяет правильно интерпретировать приведенные на гистограммах результаты и, в частности, объяснить появление экстремальных значений на распределениях вдоль побережья.

Таблица 3.13 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 21d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

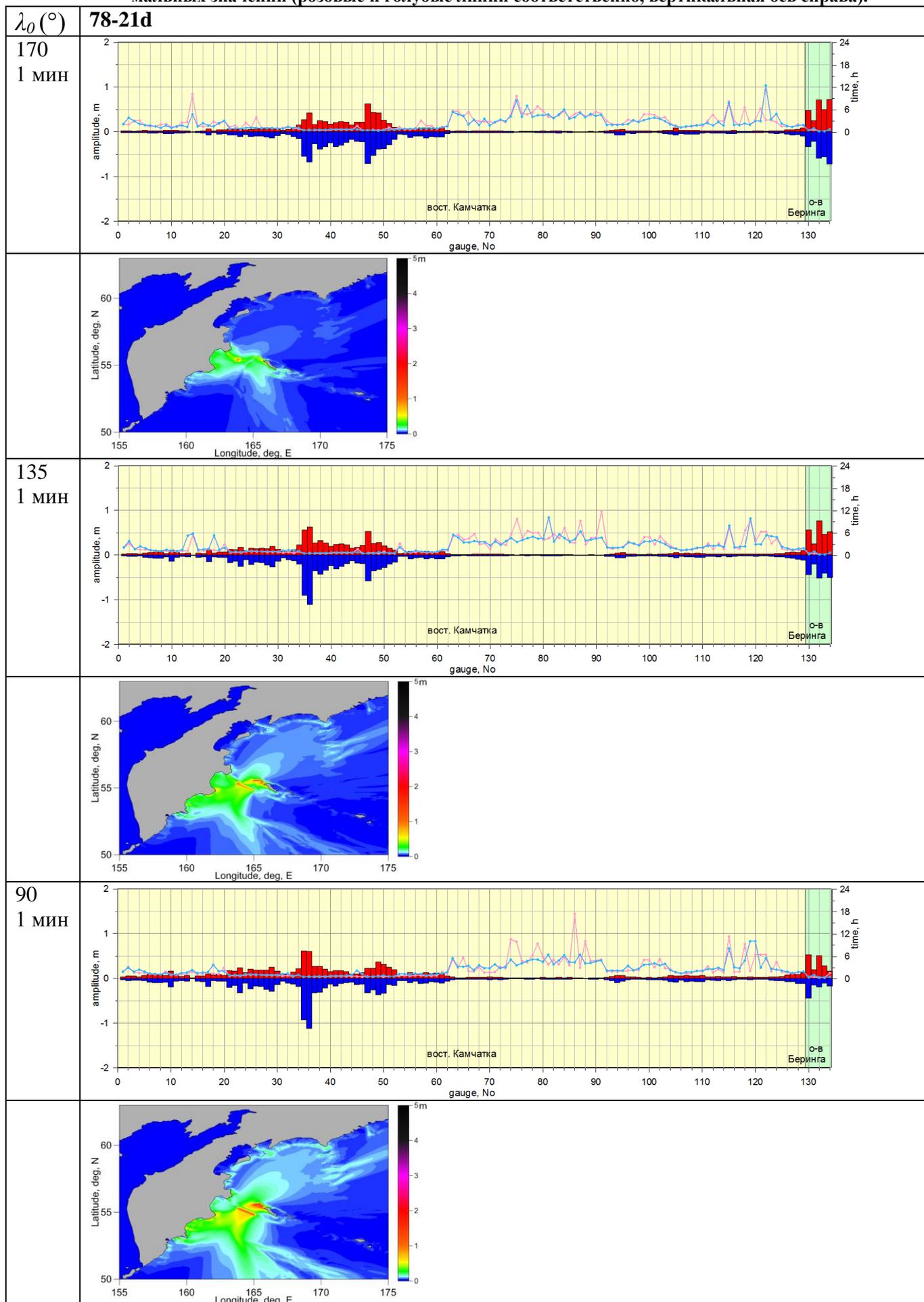


Таблица 3.14 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 22d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

78-22d	
170 1 мин	
135 1 мин	
90 1 мин	

Таблица 3.15 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 23d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

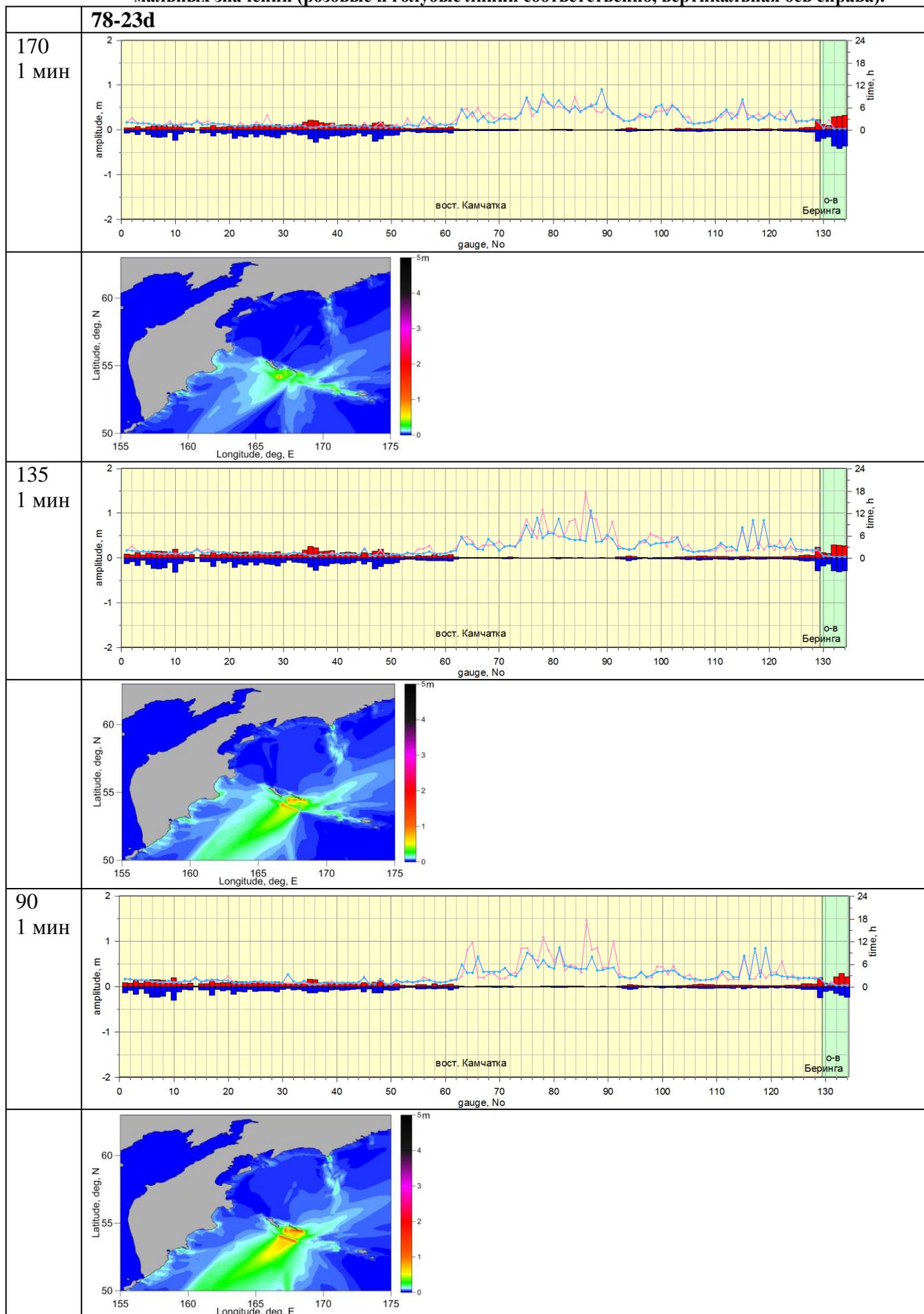


Таблица 3.16 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 24d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

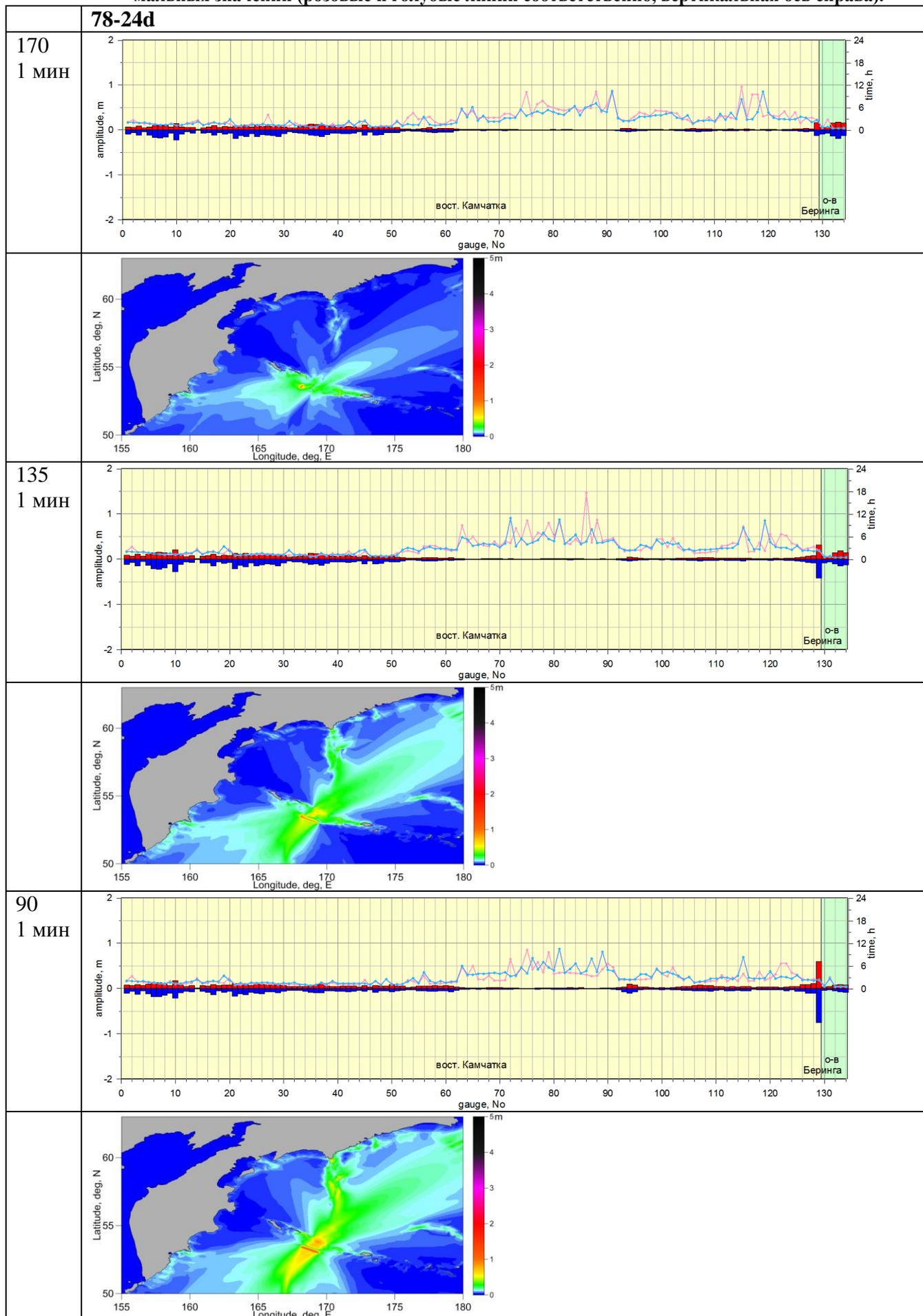


Таблица 3.17 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 25d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

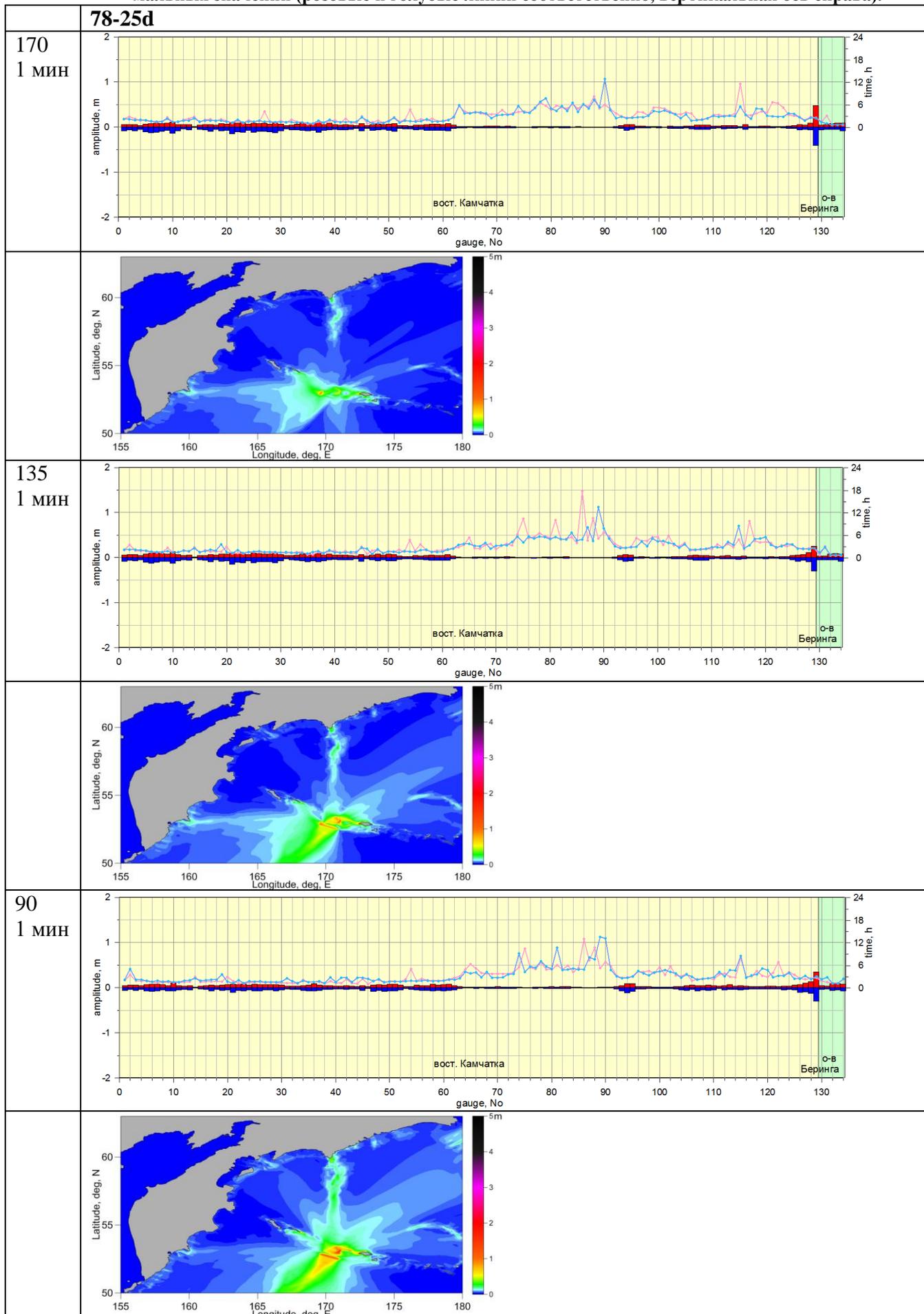


Таблица 3.18 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 26d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

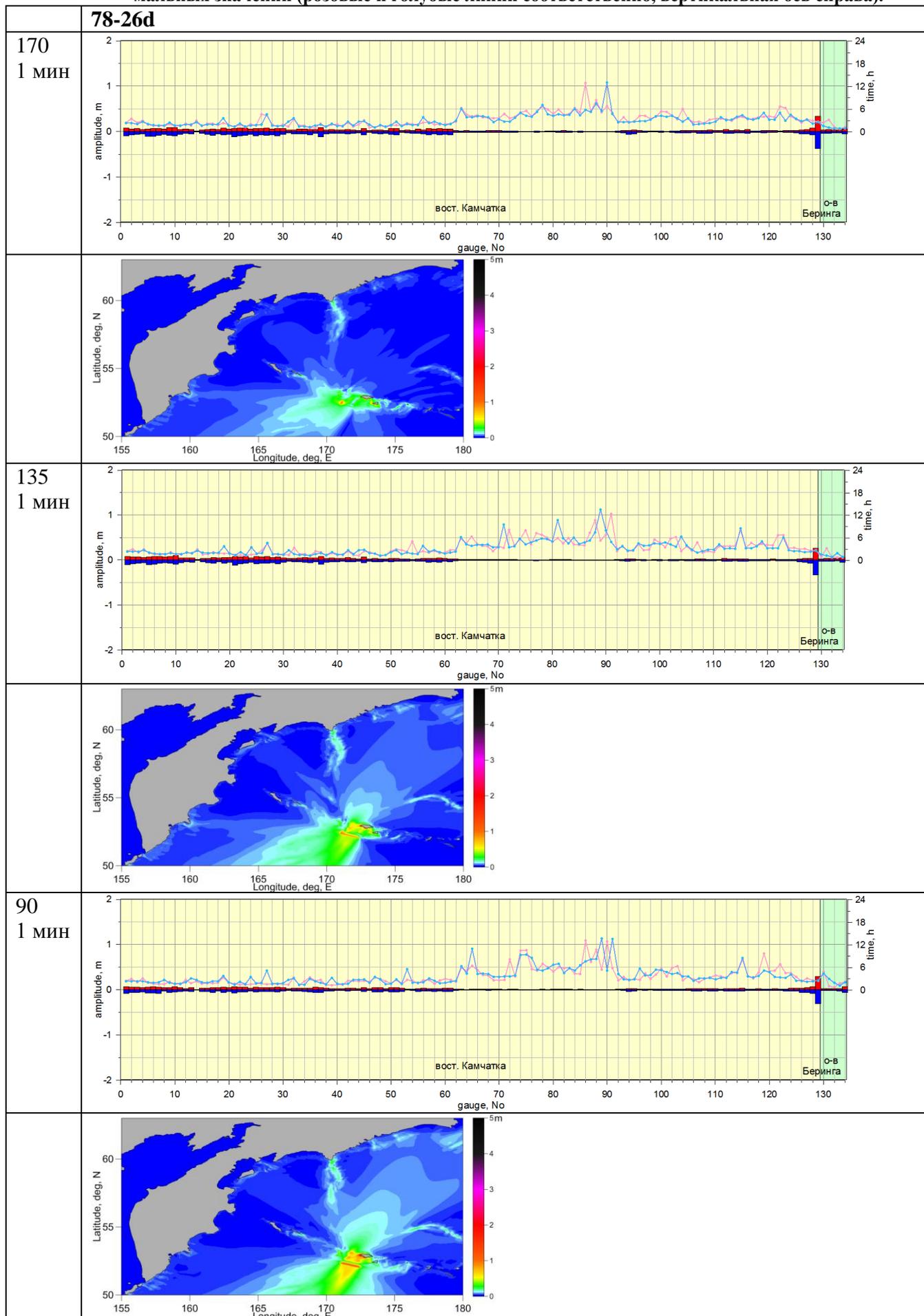


Таблица 3.19 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 27d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

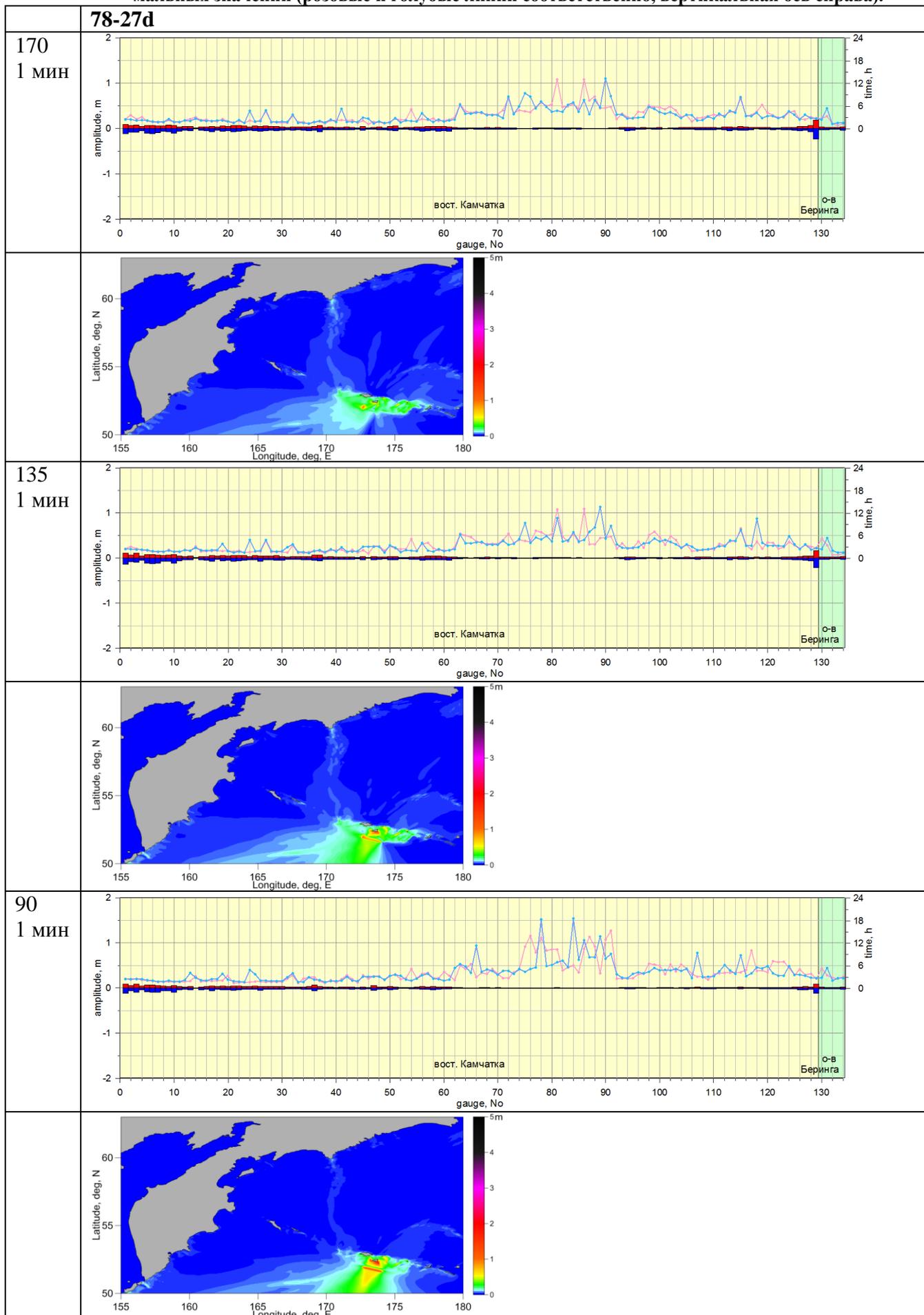


Таблица 3.20 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 28d с магнитудой 7,8 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

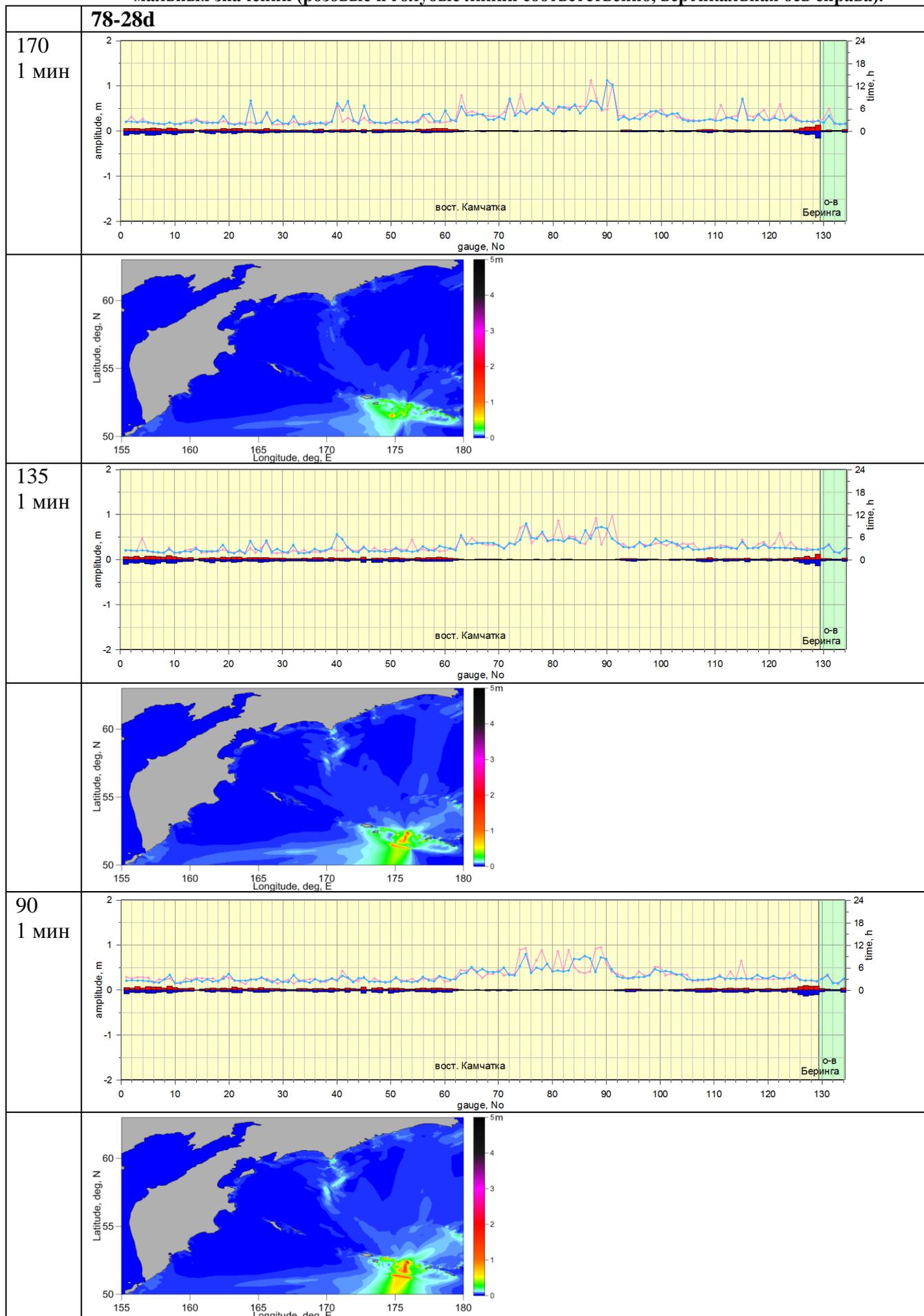


Таблица 3.21 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 11d с магнитудой 8,4 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

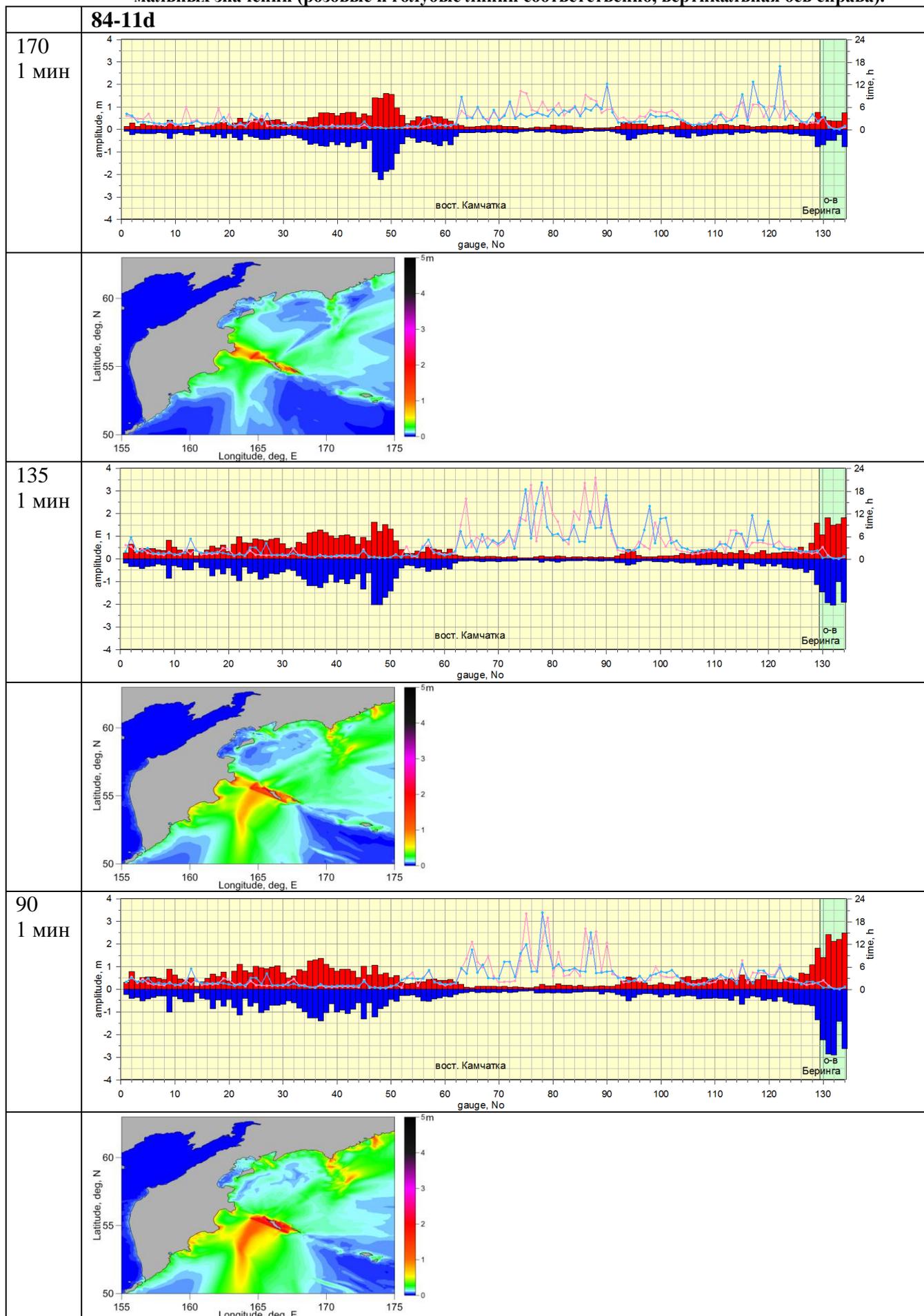


Таблица 3.22 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 12d с магнитудой 8,4 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

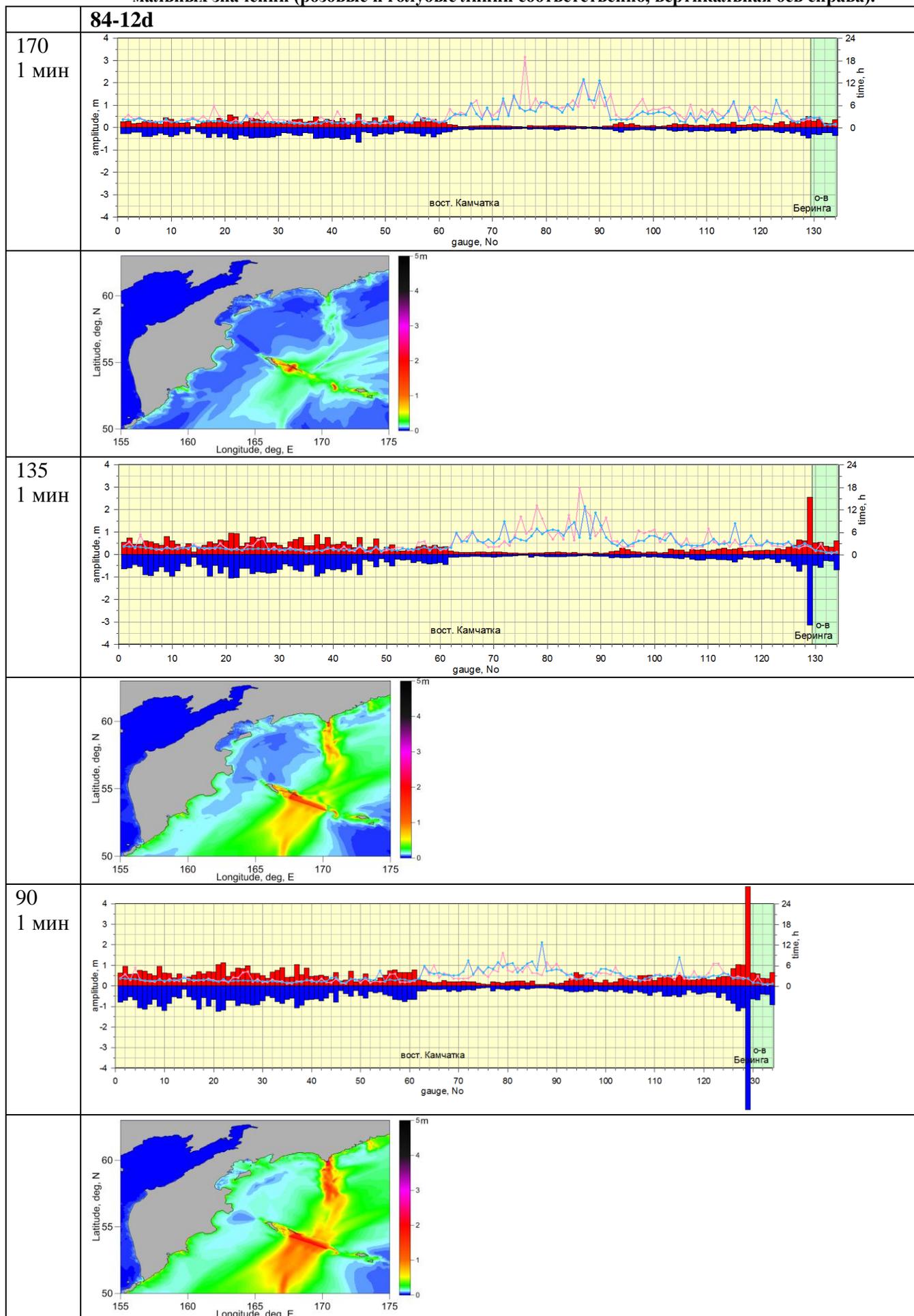


Таблица 3.23 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 13d с магнитудой 8,4 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

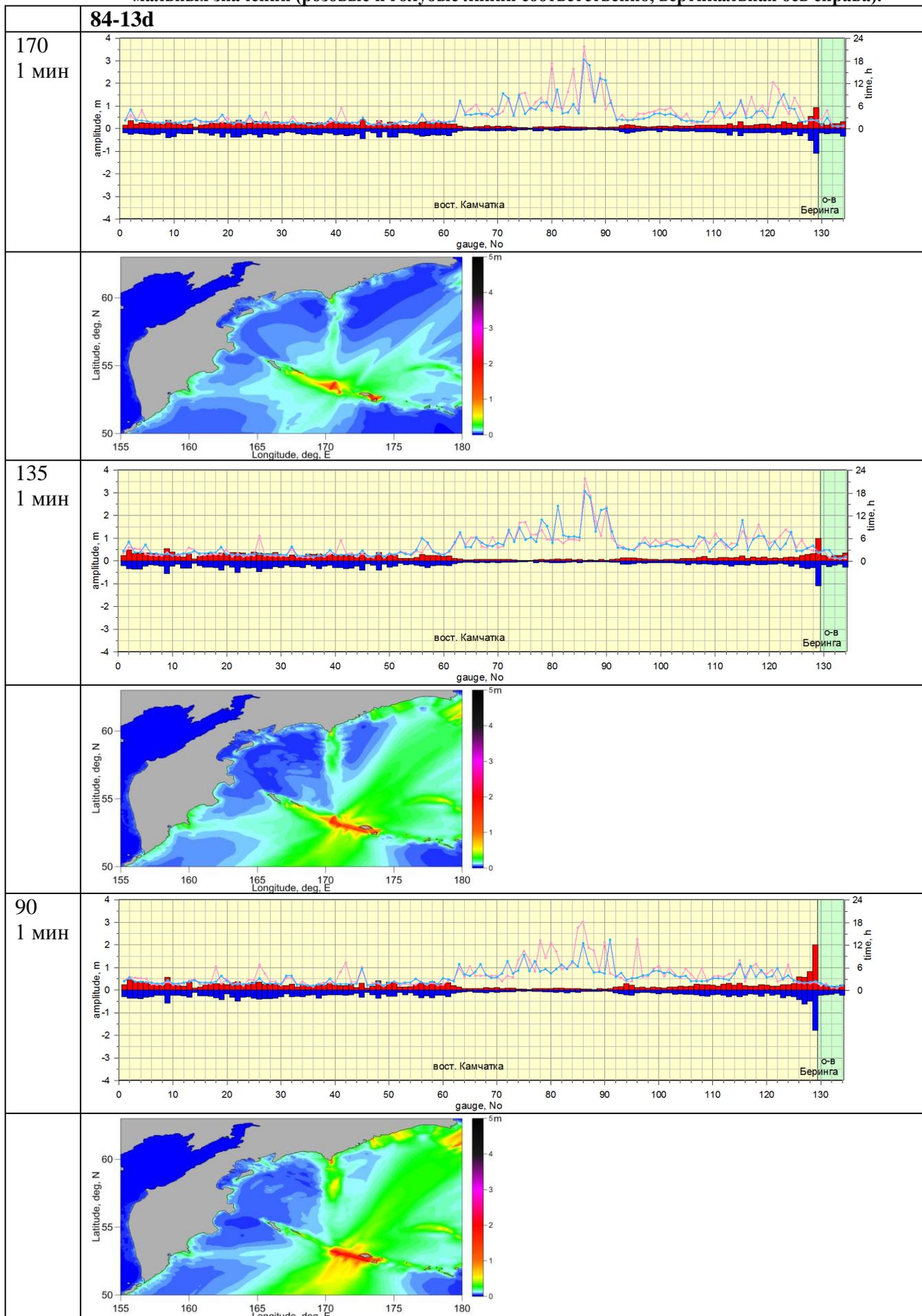


Таблица 3.24 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 14d с магнитудой 8,4 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

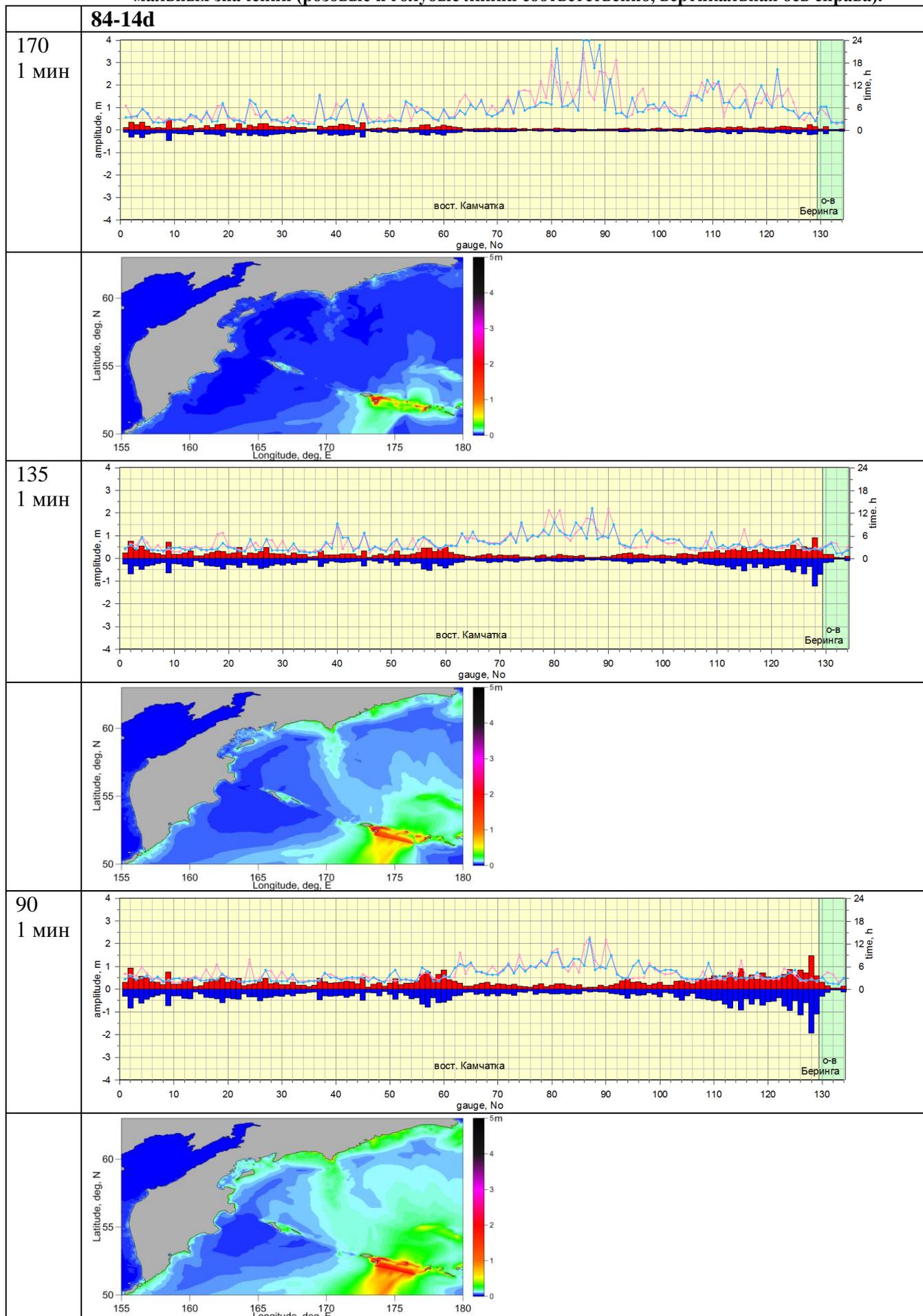


Таблица 3.25 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа ба с магнитудой 9,0 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).

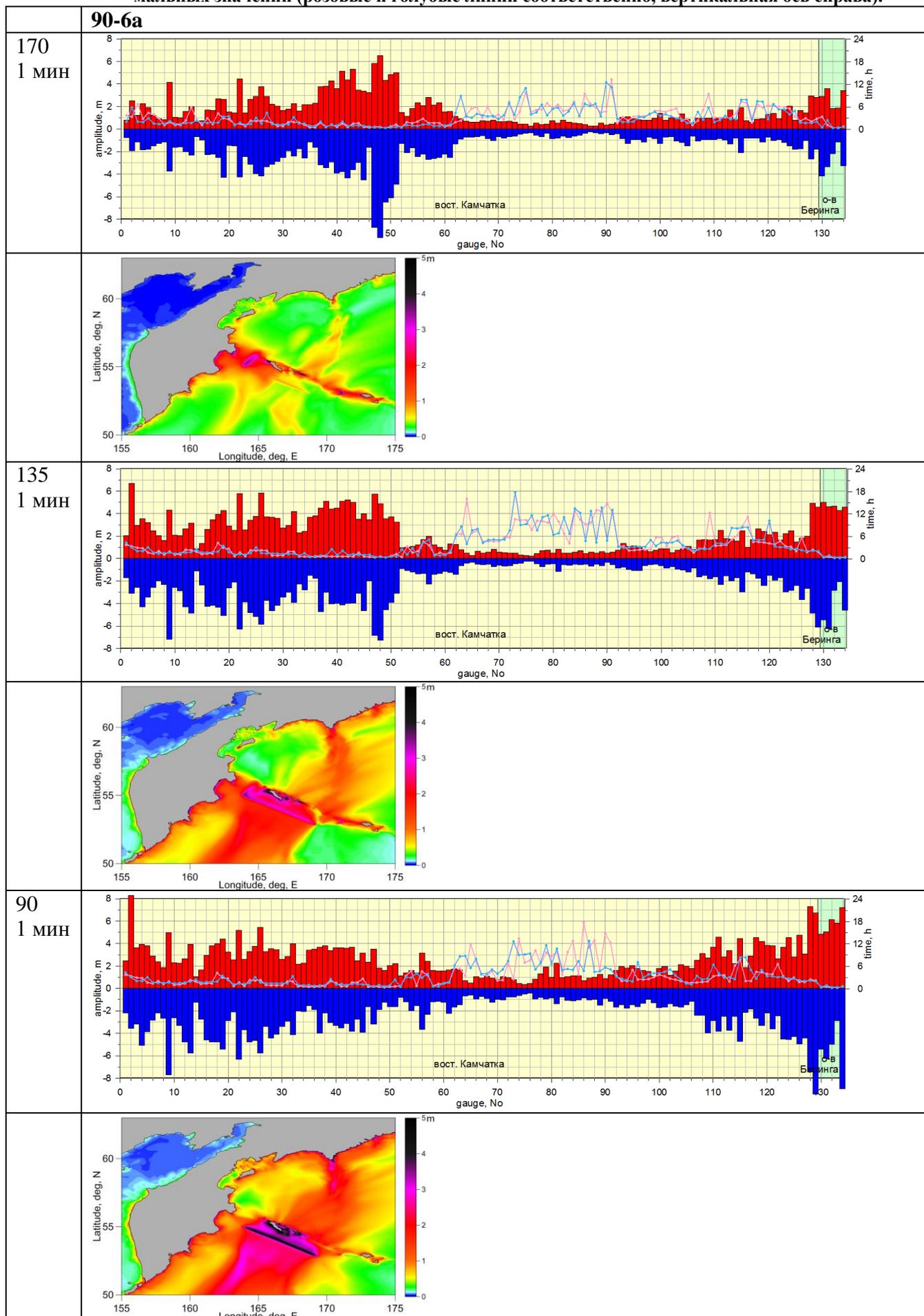
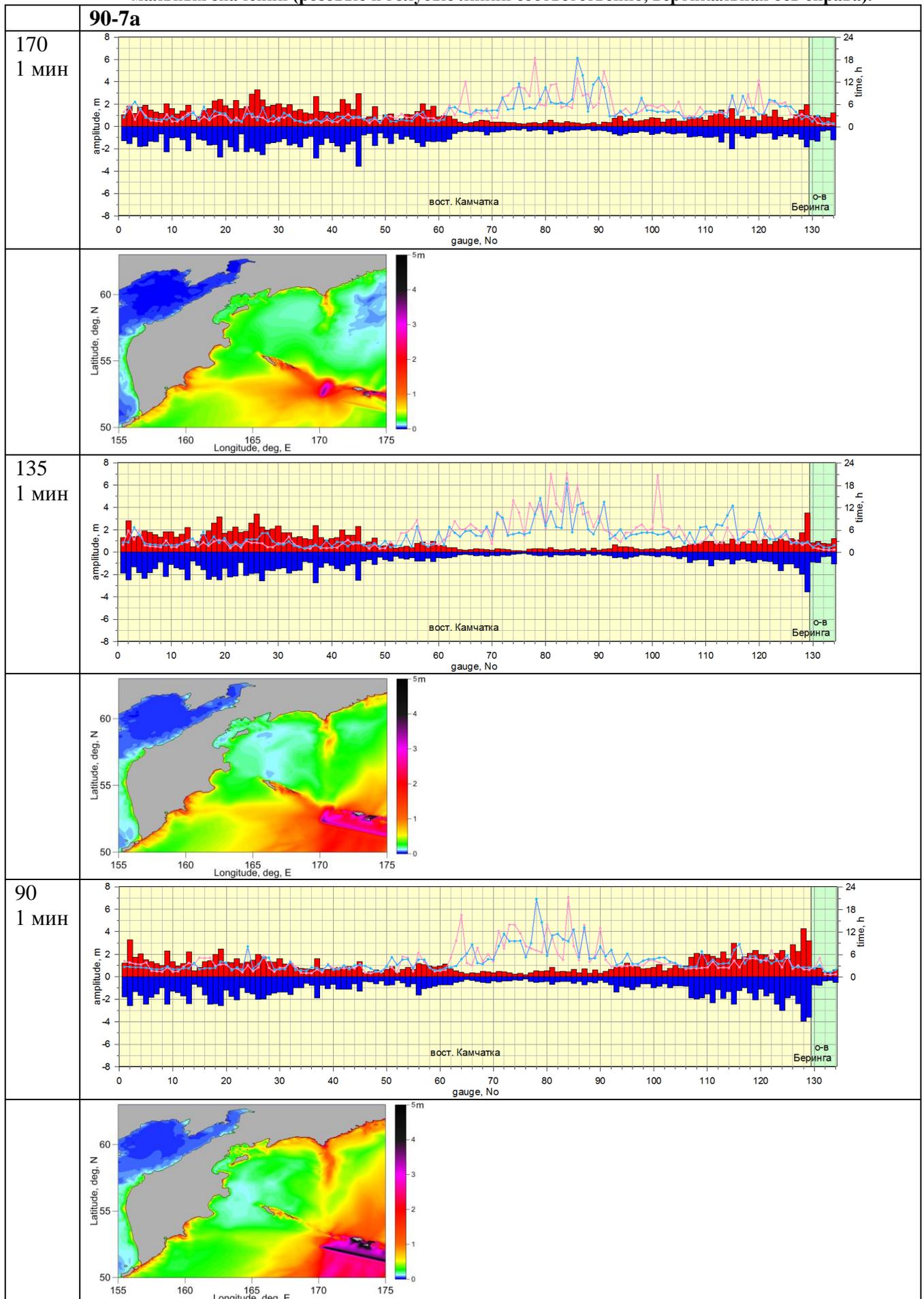


Таблица 3.26 Гистограммы максимальных положительных и отрицательных высот волн (красные и синие столбцы соответственно, вертикальная ось слева), порожденных землетрясениями типа 7а с магнитудой 9,0 и различными значениями угла λ_0 , а также времена регистрации этих экстремальных значений (розовые и голубые линии соответственно, вертикальная ось справа).



Приведенные выше гистограммы и картины свечений вполне наглядно демонстрируют важность адекватного учета параметров механизмов модельных цунамигенных землетрясений на примере угла, определяющего направление подвижки в плоскости разрыва. Однако графическое представление всегда следует сопровождать конкретными количественными характеристиками. С этой целью ниже (Таблица 3.27, Таблица 3.28) приведены экстремальные значения, рассчитанные для виртуальных мареографов, расположенных в пяти защищаемых пунктах – Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семьячки, Усть-Камчатск и Никольское (Рисунок 3.13) и в соседних узлах расчетной сетки. Эти значения были получены для наиболее опасных по результатам приведенного выше анализа модельных цунамигенных землетрясений. Схемы размещения этих узлов также указаны в таблицах.

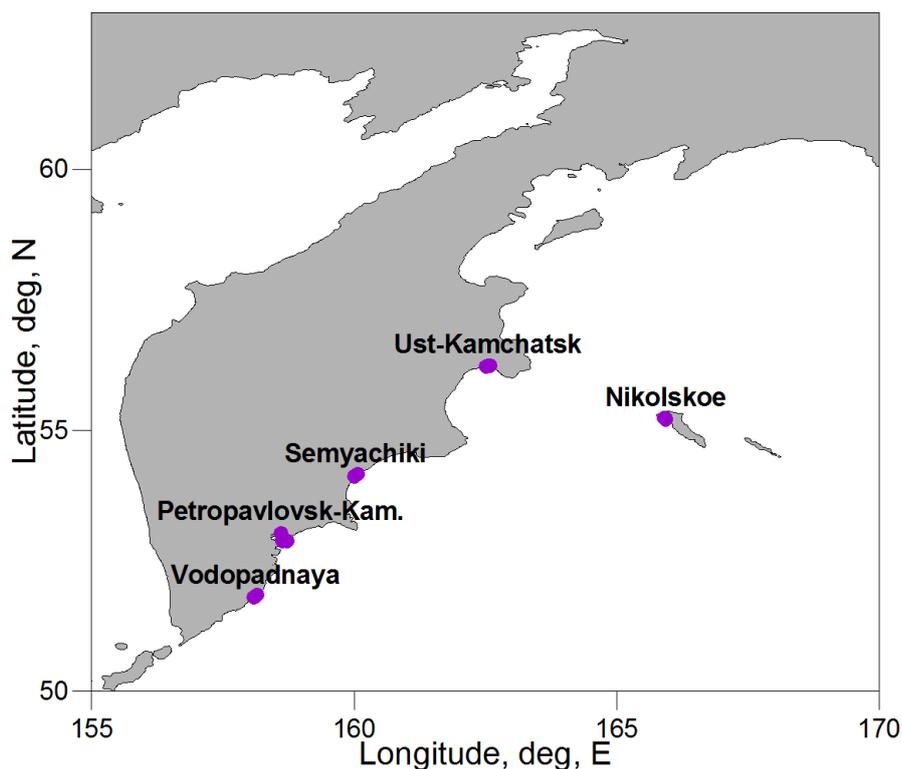


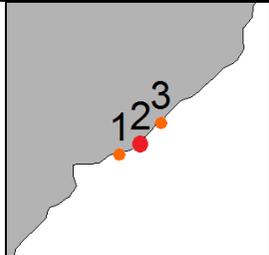
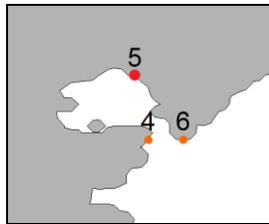
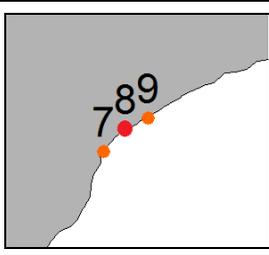
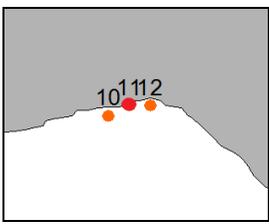
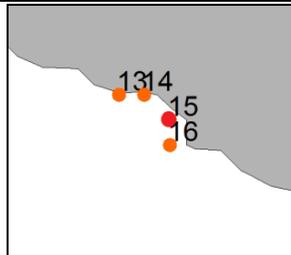
Рисунок 3.13 Схема размещения виртуальных мареографов для защищаемых пунктов Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семьячки, Усть-Камчатск и Никольское, для которых в таблицах (Таблица 3.27, Таблица 3.28) приведены экстремальные значения характеристик волн цунами.

Таблица 3.27 Максимальные положительные и минимальные отрицательные высоты волн (красные и синие шрифты соответственно), а также суммы их абсолютных значений (размах, высота волн) порожденных в окрестностях защищаемых пунктов Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семьячки, Усть-Камчатск, Никольское «ближними» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 7,8 для разных направлений подвижки в плоскости разрыва (угол λ_0). В первом столбце – индекс соответствующего землетрясения, во втором – значения угла λ_0 , в первой строке – схема расстановки виртуальных мареографов.

		Водопадная			Петропавловск-Камчатский			Семьячки			Усть-Камчатск			Никольское			
ID	λ_0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
78-21d	170	0,03	0,02	0,03	0,03	0,004	0,02	0,06	0,07	0,06	0,20	0,22	0,20	0,21	0,34	0,25	0,32
		-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,005	-0,02	-0,09	-0,09	-0,09	-0,16	-0,22	-0,20	-0,27	-0,24	-0,21	-0,27
		0,05	0,05	0,06	0,05	0,008	0,03	0,15	0,16	0,16	0,36	0,43	0,40	0,48	0,58	0,47	0,59
	135	0,07	0,07	0,07	0,04	0,007	0,04	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,16	0,22	0,33	0,25	0,33
		-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,006	-0,05	-0,16	-0,16	-0,17	-0,12	-0,18	-0,17	-0,26	-0,27	-0,20	-0,31
		0,15	0,14	0,13	0,09	0,012	0,09	0,30	0,30	0,32	0,28	0,35	0,33	0,48	0,60	0,46	0,64
	90	0,10	0,10	0,10	0,06	0,011	0,06	0,19	0,19	0,19	0,09	0,10	0,10	0,21	0,24	0,20	0,26
		-0,11	-0,10	-0,08	-0,07	-0,012	-0,06	-0,17	-0,17	-0,19	-0,10	-0,14	-0,13	-0,18	-0,29	-0,14	-0,28
		0,21	0,20	0,18	0,13	0,022	0,12	0,36	0,36	0,38	0,19	0,24	0,23	0,39	0,53	0,34	0,54
78-22d	170	0,07	0,06	0,06	0,05	0,009	0,04	0,10	0,10	0,10	0,14	0,20	0,18	0,23	0,27	0,18	0,28
		-0,10	-0,09	-0,09	-0,05	-0,009	-0,04	-0,12	-0,11	-0,12	-0,12	-0,20	-0,19	-0,23	-0,35	-0,25	-0,29
		0,17	0,15	0,14	0,11	0,018	0,09	0,22	0,21	0,22	0,26	0,39	0,37	0,47	0,62	0,43	0,58
	135	0,11	0,10	0,11	0,07	0,012	0,06	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,18	0,24	0,28	0,22	0,30
		-0,15	-0,13	-0,13	-0,08	-0,014	-0,06	-0,12	-0,16	-0,12	-0,12	-0,21	-0,20	-0,20	-0,33	-0,23	-0,30
		0,26	0,24	0,23	0,15	0,026	0,12	0,27	0,30	0,27	0,27	0,41	0,38	0,45	0,61	0,45	0,61
	90	0,13	0,12	0,12	0,08	0,014	0,07	0,14	0,14	0,14	0,12	0,16	0,14	0,32	0,37	0,37	0,39
		-0,15	-0,13	-0,13	-0,08	-0,017	-0,07	-0,13	-0,16	-0,11	-0,12	-0,19	-0,18	-0,21	-0,37	-0,22	-0,43
		0,28	0,25	0,25	0,16	0,031	0,14	0,27	0,30	0,25	0,24	0,34	0,31	0,53	0,73	0,59	0,82
78-23d	170	0,10	0,09	0,09	0,06	0,008	0,06	0,10	0,10	0,10	0,09	0,13	0,11	0,13	0,14	0,10	0,16
		-0,18	-0,17	-0,15	-0,08	-0,009	-0,07	-0,11	-0,11	-0,11	-0,09	-0,14	-0,13	-0,13	-0,20	-0,15	-0,17
		0,28	0,26	0,25	0,14	0,017	0,13	0,22	0,21	0,21	0,19	0,26	0,24	0,26	0,33	0,26	0,32

135	0,16	0,15	0,15	0,09	0,011	0,07	0,13	0,12	0,12	0,09	0,12	0,10	0,14	0,15	0,10	0,14
	-0,27	-0,25	-0,22	-0,11	-0,012	-0,09	-0,11	-0,11	-0,11	-0,09	-0,14	-0,13	-0,12	-0,18	-0,14	-0,16
	0,43	0,40	0,37	0,20	0,023	0,16	0,23	0,23	0,23	0,17	0,26	0,23	0,26	0,33	0,23	0,30
90	0,16	0,15	0,15	0,08	0,011	0,07	0,10	0,10	0,10	0,06	0,09	0,08	0,11	0,12	0,07	0,09
	-0,26	-0,24	-0,21	-0,10	-0,012	-0,08	-0,06	-0,09	-0,06	-0,05	-0,12	-0,11	-0,07	-0,11	-0,08	-0,12
	0,42	0,39	0,36	0,18	0,024	0,15	0,17	0,19	0,16	0,11	0,21	0,19	0,17	0,22	0,15	0,21

Таблица 3.28 Максимальные положительные и минимальные отрицательные высоты волн (красные и синие шрифты соответственно), а также суммы их абсолютных значений (размах, высота волн) порожденных в окрестностях защищаемых пунктов Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семячки, Усть-Камчатск, Никольское «близкими» цунамигенными землетрясениями с магнитудами 8,4 и 9,0 для разных направлений подвижки в плоскости разрыва (угол λ_0). В первом столбце – индекс соответствующего землетрясения, во втором – значения угла λ_0 , в первой строке – схема расстановки виртуальных мареографов.

		Водопадная			Петропавловск-Камчатский			Семячки			Усть-Камчатск			Никольское			
																	
ID	la	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
84-11d	170	0,17	0,15	0,16	0,25	0,07	0,12	0,41	0,48	0,41	0,52	0,70	0,67	0,55	0,61	0,39	0,42
		-0,16	-0,14	-0,16	-0,21	-0,07	-0,19	-0,43	-0,44	-0,32	-0,59	-0,85	-0,82	-0,58	-0,60	-0,49	-0,46
		0,33	0,29	0,32	0,45	0,14	0,30	0,84	0,92	0,73	1,11	1,55	1,49	1,13	1,21	0,88	0,87
	135	0,43	0,39	0,41	0,44	0,13	0,28	0,86	0,84	0,83	0,75	0,94	0,94	2,44	2,75	1,82	1,28
		-0,25	-0,23	-0,30	-0,38	-0,14	-0,38	-0,76	-0,90	-0,64	-0,83	-1,32	-1,22	-2,10	-2,41	-1,93	-1,62
		0,68	0,63	0,71	0,82	0,27	0,66	1,62	1,74	1,47	1,58	2,27	2,16	4,55	5,16	3,75	2,90
90	0,52	0,47	0,49	0,50	0,13	0,33	0,98	0,95	0,94	0,76	1,01	0,99	3,27	3,93	2,43	1,96	
	-0,31	-0,29	-0,36	-0,45	-0,16	-0,41	-0,88	-1,03	-0,75	-0,77	-1,31	-1,22	-3,07	-3,47	-2,86	-2,51	
	0,83	0,76	0,85	0,95	0,30	0,75	1,86	1,98	1,68	1,53	2,32	2,21	6,34	3,39	5,29	4,47	
84-12d	170	0,31	0,27	0,29	0,26	0,04	0,16	0,31	0,38	0,26	0,40	0,62	0,57	0,30	0,35	0,37	0,29
		-0,36	-0,33	-0,38	-0,34	-0,05	-0,20	-0,46	-0,45	-0,43	-0,41	-0,67	-0,65	-0,34	-0,36	-0,31	-0,32
		0,68	0,60	0,68	0,59	0,10	0,36	0,77	0,83	0,69	0,81	1,29	1,22	0,64	0,71	0,68	0,61
	135	0,52	0,47	0,50	0,65	0,12	0,33	0,58	0,75	0,56	0,54	0,77	0,70	0,60	0,77	0,55	0,48
		-0,86	-0,75	-0,89	-0,70	-0,13	-0,45	-0,81	-0,77	-0,73	-0,58	-0,91	-0,85	-0,71	-0,76	-0,58	-0,52
		1,38	1,22	1,39	1,35	0,24	0,78	1,38	1,52	1,29	1,12	1,67	1,55	1,31	1,52	1,14	1,01

90	90	0,71	0,59	0,61	0,84	0,15	0,43	0,67	0,85	0,68	0,49	0,65	0,58	0,76	0,93	0,58	0,53
		-1,04	-0,90	-1,07	-0,83	-0,17	-0,53	-0,89	-0,85	-0,80	-0,52	-0,79	-0,73	-0,85	-0,94	-0,67	-0,55
		1,75	1,49	1,67	1,67	0,32	0,96	1,56	1,70	1,47	1,01	1,44	1,31	1,61	1,87	1,25	1,09
90-6a	170	1,07	0,92	0,96	1,60	0,63	0,73	3,29	3,76	2,83	3,48	3,37	3,02	4,54	5,08	3,60	2,52
		-1,41	-1,28	-1,39	-2,21	-0,68	-0,99	-3,78	-4,15	-3,30	-3,32	-4,49	-4,20	-3,02	-4,17	-3,34	-3,85
		2,48	2,20	2,35	3,80	1,30	1,72	,06	,90	6,13	6,80	7,86	,22	,56	9,25	6,94	6,36
	135	2,07	2,02	2,01	3,23	0,88	1,35	4,23	5,81	4,39	3,17	3,99	3,61	6,98	9,48	4,60	5,02
		-2,34	-1,96	-2,28	-3,64	-1,13	-2,35	-5,64	-5,85	-5,03	-3,60	-4,66	-4,44	-5,88	-6,38	-6,25	-5,45
		4,40	3,98	4,29	6,87	2,00	3,70	9,86	11,65	9,41	6,77	8,65	8,04	12,86	15,86	10,85	10,47
	90	2,35	2,39	2,30	3,79	1,04	1,67	4,06	5,45	4,66	2,21	3,16	3,25	,63	10,35	5,04	4,70
		-2,48	-2,19	-2,38	-4,04	-1,24	-2,76	-5,64	-5,76	-4,95	-3,09	-3,92	-3,53	-6,18	-6,80	-6,23	-6,18
		4,84	4,58	4,67	,83	2,28	4,43	9,69	11,21	9,62	5,30	7,08	6,78	13,81	1,15	11,27	10,88
90-7a	170	1,43	1,32	1,36	1,31	0,56	0,86	2,90	3,26	2,62	2,23	2,96	2,82	1,07	1,28	0,97	0,86
		-1,51	-1,36	-1,18	-1,45	-0,60	-1,14	-1,90	-2,23	-1,72	-1,76	-3,55	-3,35	-1,26	-1,48	-1,31	-1,15
		2,95	2,68	2,54	2,76	1,15	2,00	4,80	5,49	4,35	3,99	6,50	6,17	2,33	2,76	2,29	2,02
	135	1,72	1,56	1,58	1,63	0,51	0,96	2,60	3,41	2,21	2,02	2,30	2,24	1,18	1,33	0,98	0,86
		-1,84	-1,50	-1,54	-1,41	-0,79	-1,20	-1,76	-1,87	-1,98	-1,27	-2,54	-2,29	-1,11	-1,28	-0,95	-1,06
		3,56	3,06	3,12	3,05	1,30	2,16	4,36	5,28	4,19	3,29	4,84	4,53	2,29	2,61	1,93	1,92
	90	1,29	1,17	1,18	1,54	0,54	0,83	1,73	2,01	1,23	0,96	1,34	1,35	1,08	1,22	0,78	0,63
		-1,79	-1,52	-1,59	-1,58	-0,66	-0,89	-2,08	-1,99	-1,91	-1,15	-1,26	-1,15	-0,87	-1,00	-0,77	-0,75
		3,07	2,69	2,77	3,12	1,21	1,72	3,81	4,00	3,14	2,11	2,60	2,50	1,95	2,21	1,55	1,38

3.3. Выводы

По результатам анализа доступных исторических сведений и расчетных материалов могут быть сделаны следующие выводы.

Южной границей ближней цунамигенной зоны при пороговой магнитуде 7,0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающего его примерно в точке $43,1^{\circ}\text{N}$, $145,2^{\circ}\text{E}$ (в районе Хаманака), и проходящую через точку $41,4^{\circ}\text{N}$, $146,8^{\circ}\text{E}$. Выбор этого положения границы сделан главным образом на основании результатов моделирования, показывающих, что для очагов южнее этой границы диаграмма свечения типичного цунамигенного очага с магнитудой в диапазоне 7,0-7,9 уже полностью «уходит» с российского побережья. Этот вывод также подтверждается всеми доступными материалами о проявлениях исторических цунами из этого района.

Для очагов с магнитудами в диапазоне 8,0 – 8,9 положение южной границы сдвигается еще примерно на **200 км к юго-западу** (вдоль побережья Хоккайдо) в район сочленения курило-камчатской и японской цунамигенных зон (пролив Цугару) и соответствует линии, проходящей через точки $41,7^{\circ}\text{N}$, $142,0^{\circ}\text{E}$ и $40,1^{\circ}\text{N}$, $145,0^{\circ}\text{E}$. Южнее этой границы опасными остаются мега-землетрясения с магнитудами 9,0 и выше, что наглядно подтвердилось в случае цунами Тохоку 11 марта 2011 года. Такие события, однако, должны обрабатываться по совершенно другой схеме, отличной от обработки «нормальных» цунамигенных землетрясений. Главной проблемой при этом становится различие сильнейших нормальных землетрясений (магнитуды 8,0 – 8,9) от мега-землетрясений класса М9 (с магнитудами 9,0 и выше), которое не может быть сделано в пределах первого часа после возникновения события только по сейсмическим данным. Здесь требуется применение всего комплекса измерений, включая GPS-данные, записи приборов сильных движений, глубоководных регистраторов цунами и прибрежных кабельных либо буйковых датчиков, защищающих конкретные населенные пункты.

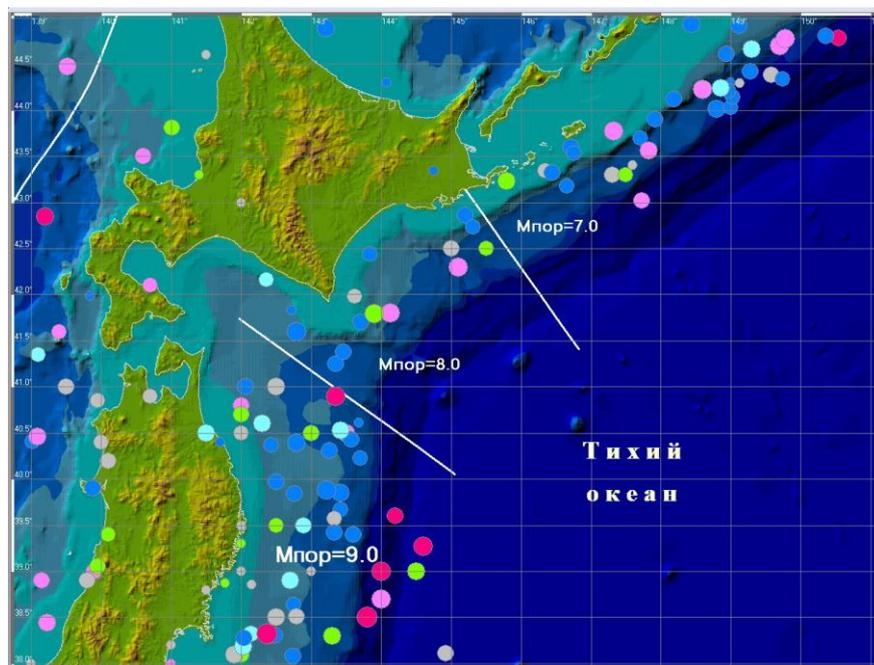


Рисунок 3.14 Границы и магнитудные пороги для южной части границы ответственности дальневосточной СПЦ. Кружками показано положение исторических цунамигенных землетрясений этого района. Цвет кружков определяется интенсивностью цунами по шкале Соловьева-Имамуры.

Восточную границу ближней цунамиопасной зоны при предельно сильных возможных землетрясениях (магнитуда 9,0 и выше) с очагами вдоль Алеутской дуги можно провести примерно в районе 175°E . При этом время распространения головной волны до о-ва Беринга будет порядка 40 мин, до побережья Камчатки 60 – 70 мин (Рисунок 3.11). Землетрясение магнитуды 9,0 из этого района (модельный очаг 90-7(2)а) способно создать опасные колебания уровня на всем восточном побережье Камчатки с высотами свыше 3 м и размахом порядка 6 м (Таблица 3.10). Причем максимальные колебания уровня на Камчатке слабо зависят от типа подвижки – чисто сдвиговый механизм может оказаться более опасным, чем поддвиговый. Максимальный размах колебаний может возрасти до 11 – 12 м при приближении очага землетрясения к Камчатке (модельный очаг 90-б(1)а), опять же вне зависимости от типа механизма. Интересно отметить, что максимальные высоты и размах колебаний на о-ве Беринга оказываются при этом даже ниже, чем на камчатском побережье (3 – 4 м и 6 – 8 м соответственно для источника 90-б(1)а), что может быть следствием его нахождения в пределах очаговой области, где фактические колебания уровня примерно соответствуют начальным подвижкам в очаге землетрясения.

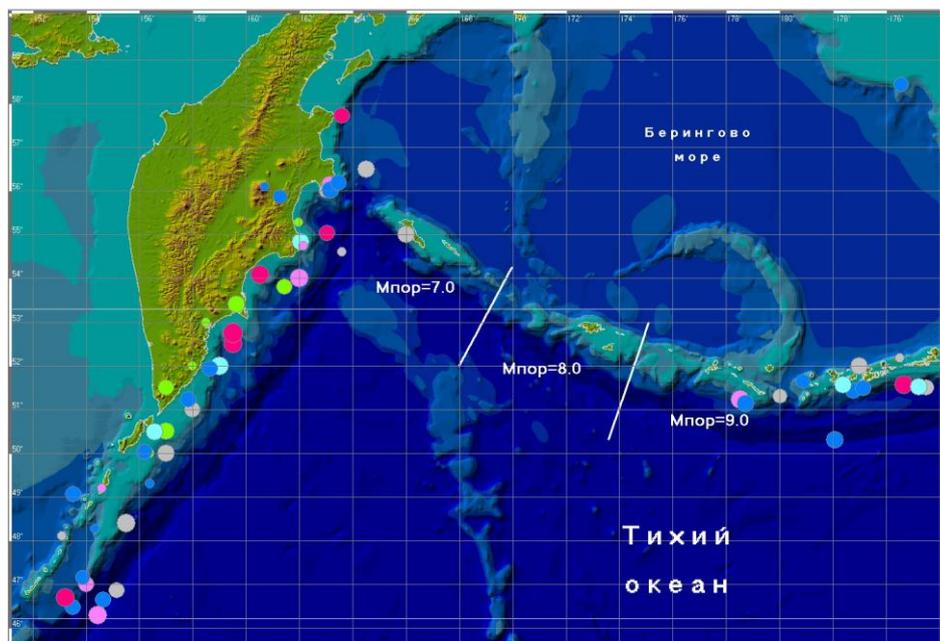


Рисунок 3.15 Границы и магнитудные пороги для южной части границы ответственности дальневосточной СРЦ. Кружками показано положение исторических цунамигенных землетрясений этого района. Цвет кружков определяется интенсивностью цунами по шкале Соловьева-Имамуры.

При снижении магнитуды до 8, восточная граница ближней цунамиопасной зоны может быть смещена еще на 350 – 400 км к западу и проведена в районе 170° в.д. Для очагов с $M_w = 8,4$ максимальные высоты на Камчатском побережье будут в пределах 1 м, размах – в пределах 2 м. При этом, согласно модельным расчетам, примерно такие же высоты (в пределах 1 м) будут наблюдаться и на о-ве Беринга (очаг 84-11d). При дальнейшем снижении магнитуды (до 7,8) колебания уровня вблизи Камчатского побережья перестают быть опасными (размах ниже 0,5 м) за исключением механизмов с направлением подвижки в плоскости разрыва равным 135 и 90 градусам.

В отличие от стандартной ситуации расположения очага вдоль защищаемого побережья изменение направления подвижки (угол λ_0) для модельных алеут-

ских очагов не оказывает существенного влияния на средние высоты волн на Камчатке. Причина этого заключается в изменении диаграммы направленности излучения энергии очагом при изменении направления подвижки. При сдвиговой подвижке диаграмма имеет четырехлепестковый вид, при этом один из лепестков всегда направлен в сторону Камчатки (под углом в 45° к простиранию разрыва). При взбросовой подвижке амплитуда начальных смещений увеличивается, но в диаграмме остаются два основных лепестка, направленных под прямым углом к плоскости разрыва, т.е. в этом случае основная энергия уходит в северо-западный сектор Тихого океана, минуя побережье Камчатки и северных Курил (см. Таблица 3.13 – Таблица 3.26).

4 Предложение в программу работ до 2015 г. по обоснованию новой схемы принятия решений об объявлении тревоги цунами на Дальневосточном побережье РФ с учетом особенностей географического положения защищаемых пунктов и оперативного использования данных гидрофизической подсистемы.

На основании вышеизложенного, предложения состоят в формировании программы детальных исследований цунамиопасности для наиболее важных защищаемых пунктов. При этом на первом этапе следует рассмотреть 3 – 4 характерных объекта, представляющих различные по сейсмо-тектоническим характеристикам зоны. Это могут быть Малокурильское (о-в Шикотан), Северо-Курильск (или Матуа), Петропавловск-Камчатский (или Усть-Камчатск). После выполнения работ по этой пилотной части проекта следует определить очередность и составить список на ближайшие 2 – 3 года. Надо незамедлительно приступить к пополнению и систематизации исторических данных, натурной информации, к паспортизации объектов и формулировке задач математического моделирования, в ходе которого будут определены экстремальные характеристик границ заплеска, высот наката, продолжительности наката и динамических воздействий (скорости, потоки) с учетом детальной батиметрии, диссипации (шероховатость), приливных компонент и т.п.

5 Заключение

В этом, заключительном разделе отчета суммируются выводы, сделанные по представленным материалам исследования.

5.1. Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от системы модельных очагов «региональных» и «удаленных» цунамигенных землетрясений

Охотское море не имеет собственных цунамигенных зон, способных породить сильные сейсмогенные цунами непосредственно внутри акватории моря. Однако оно открыто к воздействию региональных цунами, порождаемых сильными ($M > 8$) подводными землетрясениям Курило-Камчатской зоны, а также проникновению сильнейших трансокеанских цунами, порождаемых мегаземлетрясениями ($M 9$) в других цунамигенных зонах Тихого океана, в первую очередь, в Южно-американской.

Результаты выполненного в рамках настоящей работы численного моделирования показывают, что опасные (с высотой более 0,5 м) колебания уровня в западной части охотоморского побережья от Курило-Камчатских землетрясений могут начинаться уже при магнитуде $M_w=8,0$. При магнитуде $M_w=8,4$ размах колебаний уровня в районе Магадана может достигать 2 м, а при магнитуде $M_w=9,0$ размах может превышать 8 м. Такое цунами, несомненно, окажет разрушительное воздействие на все прибрежные населенные пункты колымского побережья.

Изучение вариаций колебания уровня Охотского моря в зависимости от положения очага вдоль Курильской гряды показывает, что какие-то выраженные максимумы (или минимумы) по положению очага вдоль гряды отсутствуют. Для достаточно протяженных (при $M > 8$) очагов даже крупные острова (Парамушир, Симушир, Итуруп) не являются значительным барьером. Через проливы волновая энергия протекает в Охотское море и далее распределяется по всему его бассейну, при этом вариации колебаний уровня в конкретных точках определяются почти исключительно локальными условиями (батиметрией прилегающих участков шельфа, резонансными свойствами бухт и заливов).

При вариациях положения модельных очагов вкост простирания островной дуги общей тенденцией является рост амплитуд волн на колымском побережье при приближении очага к островной дуге, который происходит даже несмотря на уменьшение средних глубин воды в очаговой области. При выходе очаговой области в задуговую часть островной дуги, амплитуды колебаний достигают максимума (размах 1,2 м для Аяна, 1,9 м для Охотска, 2,0 м для Магадана).

При приближении очага к Камчатскому полуострову происходит захват волной энергии (западным) камчатским шельфом и ее вторичное излучение в сторону Магадана, при этом амплитуды колебаний уровня в районе Магадана достигают максимума для очага, закрытого на треть полуостровом Камчатка.

Отдельную проблему для охотоморского побережья представляют вулканогенные цунами, порождаемые оползнями и обвалами, возникающими на вулканических постройках подводных и островных вулканов. Такие обвалы могут как возникать вследствие сейсмического воздействия, связанного с общим сейсмотектоническим процессом данной зоны, так и порождаться непосредственно вулканическим извержением, причем необязательно происходящим на данном вулкане.

В силу морфологических особенностей значительной части охотского побережья особую опасность для него представляют обвальные цунами, возникающие при подводных и береговых оползнях и обвалах. Такие обвалы совсем не обязательно связаны с сейсмической деятельностью, они могут возникать при потере стабильности склонов, возникающей по целому ряду причин (инженерные воздействия, изменения погоды, влагонасыщенности грунтов и т.д.). Возникающие при этом волны цунами могут быть локально-разрушительными, хотя, как правило, не способны распространяться на большие расстояния от источника.

Наличие ледяного покрова может усиливать эффект воздействия цунами на берег (увеличение дальности заливания, вынос тяжелого льда на берег). Дополнительные опасности возникают при взломе берегового припая в периоды нахождения там людей (подледный лов рыбы). Этот эффект может иметь место при очень незначительной высоте самого цунами (первые десятки сантиметров).

Самые высокие (по всему охотоморскому побережью) волны цунами были зарегистрированы в Магадане в 1952 году (2 м) и в 1960 году (2,2 м). Одной из

причин увеличенных колебаний уровня здесь могло быть резонансное усиление путем взаимодействия подходящей волны с модами собственных колебаний бухты Нагаева.

Редкость (малая повторяемость) цунамигенных явлений в Охотском море (сравнительно с соседней Курило-Камчатской зоной) порождает недооценку реальной опасности цунами в этом регионе. Следствием этого является беспечность населения при нахождении в береговой зоне и нежелание местных властей заниматься разработкой превентивных мероприятий по защите от цунами. Для получения оценок реальной угрозы цунами в Охотском море необходимо выполнение целенаправленных исследований по поиску и систематизации исторических сведений о проявлениях цунами, полевых экспедиционных работ по поиску следов палеоцунами на охотоморском побережье, идентификации и оценке сейсмогенного потенциала активных разломов в прибрежной зоне, а также численное моделирование распространения цунами в бассейне Охотского моря, порождаемого сейсмогенными, вулканогенными и обвальными источниками.

5.2. Уточнение южной и восточной границ ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России

По результатам анализа доступных исторических сведений и расчетных материалов могут быть сделаны следующие выводы.

Южной границей ближней цунамигенной зоны при пороговой магнитуде 7,0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающего его примерно в точке **43,1°N, 145,2°E** (в районе Хаманака) и проходящую через точку **41.4°N, 146.8°E**. Выбор этого положения границы сделан главным образом на основании результатов моделирования, показывающих что для очагов южнее этой границы диаграмма свечения типичного цунамигенного очага с магнитудой в диапазоне 7,0-7,9 уже полностью «уходит» с российского побережья. Этот вывод также подтверждается всеми доступными материалами о проявлениях исторических цунами из этого района.

Для очагов с магнитудами в диапазоне 8,0-8,9 положение юной границы сдвигается еще примерно на **200 км к юго-западу** (вдоль побережья Хоккайдо) в район сочленения курило-камчатской и японской цунамигенных зон (пролив Цугару) и соответствует линии проходящей через точки **41.7°N, 142.0°E** и **40.1°N, 145.0°E**. Южнее этой границы опасными остаются мега-землетрясения с магнитудами 9,0 и выше, что наглядно подтвердилось в случае цунами Тохоку 11 марта 2011 года. Такие события, однако, должны обрабатываться по совершенно другой схеме, отличной от обработки «нормальных» цунамигенных землетрясений. Главной проблемой при этом становится различие сильнейших нормальных землетрясений (магнитуды 8,0-8,9) от мега-землетрясений класса M9 (с магнитудами 9,0 и выше), которое не может быть сделано в пределах первого часа после возникновения события только по сейсмическим данным. Здесь требуется применение всего комплекса измерений, включая GPS данные, записи приборов сильных движений, глубоководных регистраторов цунами и прибрежных кабельных либо буйковых датчиков, защищающих конкретные населенные пункты.

Восточную границу ближней цунамиопасной зоны при предельно сильных возможных землетрясениях (магнитуда 9,0 и выше) с очагами вдоль Алеутской

дуги можно провести примерно в районе 175°E . При этом время распространения головной волны до о-ва Беринга будет порядка 40 мин, до побережья Камчатки 60-70 мин (Рисунок 3.11). Землетрясение магнитуды 9,0 из этого района (модельный очаг 90-7(2)а) способно создать опасные колебания уровня на всем восточном побережье Камчатки с высотами свыше 3 м и размахом порядка 6 м (Таблица 3.10). Причем максимальные колебания уровня на Камчатке слабо зависят от типа подвижки – чисто сдвиговый механизм может оказаться более опасным, чем поддвиговой. Максимальный размах колебаний может возрасти до 11 – 12 м при приближении очага землетрясения к Камчатке (модельный очаг 90-6(1)а), опять же вне зависимости от типа механизма. Интересно отметить, что максимальные высоты и размах колебаний на о-ве Беринга оказываются при этом даже ниже, чем на камчатском побережье (3-4 м и 6-8 м, соответственно, для источника 9,0-6(1)а), что может быть следствием его нахождения в пределах очаговой области, где фактические колебания уровня примерно соответствуют начальным подвижкам в очаге землетрясения.

При снижении магнитуды до 8, восточная граница ближней цунамиопасной зоны может быть смещена еще на 350 – 400 км к западу и проведена в районе 170° в.д. Для очагов с $M_w = 8,4$ максимальные высоты на Камчатском побережье будут в пределах 1 м, размах – в пределах 2 м. При этом, согласно модельным расчетам, примерно такие же высоты (в пределах 1 м) будут наблюдаться и на о-ве Беринга (очаг 84-11d). При дальнейшем снижении магнитуды (до 7,8) колебания уровня вблизи Камчатского побережья перестают быть опасными (размах ниже 0,5 м) за исключением механизмов с направлением подвижки в плоскости разрыва равным 135 и 90 градусам.

В отличие от стандартной ситуации расположения очага вдоль защищаемого побережья изменение направления подвижки (угол λ_0) для модельных алеутских очагов не оказывает существенного влияния на средние высоты волн на Камчатке. Причина этого заключается в изменении диаграммы направленности излучения энергии очагом при изменении направления подвижки. При сдвиговой подвижке диаграмма имеет четырехлепестковый вид, при этом один из лепестков всегда направлен в сторону Камчатки (под углом в 45° к простиранию разрыва). При взбросовой подвижке амплитуда начальных смещений увеличивается, но в диаграмме остаются два основных лепестка, направленных под прямым углом к плоскости разрыва, т.е. в этом случае основная энергия уходит в северо-западный сектор Тихого океана, минуя побережье Камчатки и северных Курил (см. Таблица 3.13 – Таблица 3.26).

6 Литература

Агентство ИА REX, 10 августа 2011 г., <http://www.iarex.ru/news/18453.html>

Алексеев М.Д., Онухов Ф.С., Уфимцев Г.Ф. (1975) Сбросообвалы на северо-западном побережье Охотского моря // Геол. и геофиз. № 8. С. 87-95.

Важенин Б.П. (2000) Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. – 205 с.

Важенин Б.П. (2006) Курильские вулканы – источники цунами в Северном Охотоморье. – Вулканизм и геодинамика: Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 3. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН. – С. 659-663.

Важенин Б.П. (2008) Исторические аспекты исследования цунами в Примагданье // V Диковские чтения: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Первой Колымской экспедиции и 55-летию образования Магаданской области, Магадан, 18-20 марта 2008 г. / Рос. акад. наук, Дальневост. отд-ние, Сев-Вост. науч. центр, Сев.-Вост. комплекс. НИИ; [отв. ред. А. И. Лебединцев]. – Магадан: Кордис. – С. 60-62.

Важенин Б.П. (2010) Проблемы исследования цунами в Северном Охотоморье // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды второй региональной научно-технической конференции. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, С. 312-317.

Важенин Б.П. (2011) Крупные скальные обвалы на северных берегах Охотского моря // Геология, география, биологическое разнообразие и ресурсы Северо-Востока России. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, С. 80-82.

Важенин Б.П., Лебединцев В.И. (2001) Обвалы морских берегов как объекты для археологических исследований // Диковские чтения: Материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения чл.-кор. РАН Н.Н. Дикова. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001, С. 115-122.

Дорошин П.Н. (1870) О некоторых вулканах, их извержениях и землетрясениях в бывших американских владениях России // Записки С.-П. минерал. об-ва, II серия, ч.5.

Заякин Ю.А. (1996) Цунами на Дальнем Востоке России // Петропавловск-Камчатский. 86 с.

Исторические сведения о цунами в Охотском море (1998) // Монографический справочник. Проект «Моря» Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеиздат. С. 225- 226.

Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. (2011) Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 года на тихоокеанском побережье России // Сейсм. приборы, Т.38, №1, С. 41-64.

Кожурин А.И. (2012) Активные разломы Дальневосточного региона // Доклад на совещании по проблеме цунами, Новосибирск, ИВТ СО РАН, 9-11 октября 2012.

Крашенинников С.П. (1994) Описание земли Камчатки, т.1, Санкт-Петербург: Наука, 438 с.

Левина В.И., Чеброва А.Ю., Ландер А.В., Иванова Е.И., Митюшкина Е.И., Титков Н.Н. (2009) Командорское-II землетрясение 5 декабря 2003 года с $M_S=6,8$, $I_0=7$ (Командорские острова) // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. - Обнинск: ГС РАН, С. 374-381.

Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. (2009) Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // *Океанология*, Т. 49, №2, С. 181-197.

Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана (2003). Удинцев Г. Б. (ред.). МОК (ЮНЕСКО), РАН, ФГУП ПКО "Картография", ГУНиО. М., СПб, 192 с.

Моделирование и анализ характеристик проявления удаленных цунами у защищаемых пунктов Дальневосточного побережья Российской Федерации (2011) // Отчет по второму 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.), Институт вычислительных технологий СО РАН, / Российская академия наук, Сибирское отделение, Новосибирск, 2011г., 18 стр., 4 приложения.

Национальный атлас России (2007). Том 2. Природа, экология. Москва, 495 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. (1977) Отв. ред. Н.В.Кондорская, Н.В.Шебалин, М., Наука, 535 с.

Семенов В.И. (1985) Цунами-подобное явление в Авачинском заливе // *Вопросы географии Камчатки*, Т. 9, С. 151-155.

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., Го Ч.Н. (1974) Каталог цунами на западном побережье Тихого океана (173-1968 гг.). М.: Наука. 310 с.

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

Тихий океан (1974) Атлас океанов. М.: ГУНиО МО СССР, 323 с.

Уфимцев Г.Ф. (1993) Сбросообвалы как вид дислокаций приповерхностных частей литосферы // *Тихоокеан. геол.* № 1. С. 31-38.

Enriquez A. (2007) Aysen Fiord Chile 21 April 2007 tsunami // *Tsunami Newsletter*, V/XXXIX. No.2, P. 11

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

International Year of Planet Earth - Global Launch Event, 2008, retrieved October 2012

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

Lander J.F. (1976) Tsunamis affecting Alaska, 1737 – 1996, Boulder, Colorado, National Geophysical Data Center, 195 pp.

Miller D.J. (1960) Giant waves in Lituya Bay. // *Bull. Seis. Soc. Am.*, V.50, N 3, P. 253-266.

Minoura K., Gusiakov V.K., Kurbatov A.V. (1996) Tsunami deposits intercalated in coastal sequences of the Kamchatka Peninsula // *Historical Earthquakes*, V.9, P. 99-115.

"National Geophysical Data Center, Boulder, USA, 2010, http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml"

The Chilean Tsunami of May 24, 1960 (1961) The Committee for Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960, 398 pp.

Panizzo A., De Girolamo P., Di Risio M., Maistri A., Petaccia A. (2005) Great landslide events in Italian artificial reservoirs // *Nat. Haz. Earth Sci. System*, 5, P. 733-740.

Wiegel R.L., Noda E.K., Kuba E.M., Gee D.M., Torberg G.F. (1970) Water waves generated by landslides in reservoirs // *J. Waterways, Harbour Coastal Eng., ASCE*, 96, P. 307-333.