

**Российская академия наук
Сибирское отделение**

Регистрационный номер 0120.1 275745

**Фундаментальные проблемы совершенствования
оперативного прогноза цунами и создания карты
цунамирайонирования Дальневосточного побережья РФ**

*Промежуточный информационный отчет за 2013 год
по Междисциплинарному интеграционному проекту № 37 партнерских
фундаментальных исследований, направленных на реализацию соглашений
с Уральским и Дальневосточным отделениями РАН*

Координатор проекта

д.ф.-м.н. _____ Л.Б. Чубаров

Ученый секретарь проекта

к.ф.-м.н. _____ С.А. Бейзель

Институты – исполнители:

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Институт вычислительных технологий СО РАН

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

**Новосибирск
2013**

Заявленные цели проекта на этап 2013 года включали в себя:

- Морфоструктурный анализ цунамиопасных участков Дальневосточного побережья, уточнение границ цунамигенных зон, выбор способов параметризации модельных очагов подводных землетрясений и определение набора пороговых магнитуд подводных землетрясений для Курило-Камчатской зоны, Японского, Охотского и Берингова морей (ИВиС ДВО РАН, ИВМиМГ СО РАН).
- Создание предварительной карты распределения активных структур в Охотоморском регионе, их положения и соотношения с геологическим строением (ИВиС ДВО РАН).
- Анализ сейсмичности Охотоморского региона, сопоставление сейсмологических, геологических и палеосейсмологических данных с целью подготовки структурно-кинематической схемы активных структур, выделение структурных парагенезов, их кинематическая и тектоническая интерпретация (ИВиС ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН).
- Сбор данных о фактических высотах и дальностях заплесков исторических и палеоцунами на Охотоморском побережье (ИВМиМГ СО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН).
- Уточнение положения и размеров очагов цунами Дальневосточного региона. Выбор и обоснование расчетных областей и сеток для массовых расчетов распространения цунами на реальных участках акватории Тихого океана, прилегающей к Дальневосточным регионам России, проведение точечных вычислительных экспериментов (ИВМиМГ СО РАН, ИВТ СО РАН).

Основные результаты, полученные в 2013 году.

1) В рамках подготовки монографии «Цунами и цунамиподобные явления в окраинных морях и внутренних водоемах России» проведен анализ литературных и архивных данных о проявлениях цунами на Дальневосточном побережье России. Составлен сводный каталог цунамигенных событий Дальневосточного региона (Рис. 1), включающий на данный момент 111 событий, происшедших с 1737 по 2013 год. Завершена параметризация событий, составлена сводная таблица их очаговых параметров.

2) На основе дешифрирования космических и аэрофотоснимков и анализа геологических карт составлена общая схема разломов Охотоморского и Берингоморского регионов (Рис. 2), выполнены их тектоническая и кинематическая интерпретации, создана структурно-кинематическая схема. Для ряда разломов, обследованных ранее в экспедиционных работах 2009-2011 гг., собраны и систематизированы данные по их кинематике, периодах повторяемости подвижек, максимально ожидаемых магнитудах (M_{max}). В частности, интерпретированы данные о системах Кетандинских (1 на Рис. 2) и Ланково-Омолонских (2 на Рис. 2) разломов и Хейтонского разлома (3 на Рис. 2), высказана гипотеза об их структурной взаимосвязи (врезка Б на Рис. 3). Если подобная интерпретация верна, то подводное соединение этих разломов в северо-западной части Охотского моря может являться потенциальной сейсмо- и цунамигенной структурой. Полученные результаты являются важным дополнением имеющихся инструментальных сейсмологических данных, что особенно важно для районов, где каталог инструментальных наблюдений мал. Указанные сведения об активных разломах на обрамлении Берингова и Охотского морей использованы при выборе положения, механизмов и магнитуд модельных очагов цунамигенных землетрясений Дальневосточного региона.

3) В связи с предстоящим включением Охотоморского побережья в зону ответственности Дальневосточной Службы предупреждения о цунами (СПЦ) проведен анализ сейсмичности, морфоструктурных особенностей и активной тектоники Охотского моря (Рис. 4, Рис. 5).

Охотское море находится в районе стыка трех крупнейших плит – Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской, между которыми зажата относительно небольшая и достаточно стабильная Охотская плита (Рис. 4). Её тектоника и сейсмогенный потенциал до сих пор являются недостаточно изученными. По-видимому, большинство сейсмических событий, происходящих непосредственно в акватории Охотского моря, связаны со структурами, опережающими континентальные сейсмические пояса, примыкающие к этому морю. На основе сводной интерпретации всех имеющихся данных построена система модельных очагов подводных землетрясений, способных генерировать опасные цунами в рассматриваемой акватории (Рис. 6). Составлена таблица основных параметров модельных очагов, которая передана соисполнителям

проекта (ИВТ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН) для выполнения сценарных расчетов распространения цунами в акватории Охотского моря.

4) Проведен сбор опубликованных архивных данных о фактических высотах и дальностях заплесков исторических и палеоцунами на Охотоморском побережье. В основном, эти данные касаются проявлений цунами от катастрофических мега-землетрясений 1737, 1952, 1960 и 2011 гг. Анализ собранных данных показывает, что реально опасными для Охотоморского побережья могут быть только очаги цунамигенных землетрясений класса М9, 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 г.). Проведенное в рамках интеграционного междисциплинарного проекта № 117 «Геодинамическое, гидродинамическое и вычислительное моделирование в задачах оценки цунами-риска для побережья России» моделирование удаленных цунами показало, однако, что возможна еще одна зона (Новая Гвинея, Соломоновы острова), очаги в которой могут быть опасны для нашего побережья (Рис. 7), т.к. в силу особенностей распространения энергии цунами один из боковых лепестков диаграммы направленности оказывается ориентирован в сторону Курило-Камчатского побережья. 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. Отсюда следует важный вывод о том, что для периферийных участков побережья окраинных морей Тихого океана, не имеющих в непосредственной близости перед собой зон субдукции (к каким относится Охотоморское побережье), основной вклад в цунамиопасность вносится удаленными цунами, порождаемыми субдукционными мега-землетрясениями с магнитудой порядка 9 и выше. Собранные данные сопоставлены с результатами численных расчетов распространения цунами в Охотском море от системы модельных очагов с различными магнитудами (7.8, 8.4, 9.0), расположенными в Курило-Камчатской зоне.

5) Отработана методика соединения в единую модель донного рельефа существующих аппроксимаций дна северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей с материалами прибрежных батиметрических съемок, выполняемых ИМГиГ ДВО РАН в прибрежных районах о. Сахалин. Батиметрические съемки выполняются при помощи цифрового эхолота, антенна которого закреплена на дне пластиковой моторной лодки “Yamaha”. Точные карты глубин прибрежных акваторий позволяют выполнять численное моделирование распространения цунами в мелководной зоне и определять характеристики волн на заданных изобатах, а также строить адекватные модели наката волн на берег.

б) Обобщены материалы по наблюдениям цунами на Дальневосточном побережье России за период исторических наблюдений (с 1737 года по настоящее время). В целом на этом побережье цунами от региональных источников наблюдалось 111 раз (Курило-Камчатская зона – 92 события, Японское море – 9 событий, Охотское море – 10 событий). В трех случаях ощутимое цунами было зарегистрировано от удаленных источников (Чили 1960, Аляска 1964, Тохоку 2011), хотя реально опасным было только Чилийское цунами 1960 года.

Случаев приборной регистрации слабых цунами от удаленных источников гораздо больше, и их число непрерывно растет по мере совершенствования приборной сети. Построены вероятностные модели цунами-режима (функции повторяемости высот волн) для Южных, Северных Курильских островов и Камчатки. Показано, что средняя частота цунами в южной части Курильской гряды наиболее высока (0,17 случая в год). В северном направлении величина этого параметра уменьшается и составляет 0,09 – 0,1 случая в год для Северных Курил и 0,07 случая в год – для Камчатки.

На основе численного моделирования всех сильнейших цунами для каждого из районов построены карты цунамиопасности (Рис.8, Рис. 9) для периода повторяемости 100 лет на основе формулы $h_{100} = H^* \ln(100 \cdot f)$, где H^* – характеристическая высота цунами, f – частота сильных цунами.

7) Продолжено уточнение положения и размеров очагов цунами Дальневосточного региона с использованием исторических данных о наблюдениях цунами, разломной тектоники, результатов численного моделирования цунами. Построенная сводная

система модельных очагов для набора магнитуд $M_w = 7.8, 8.4, 9.0$ покрывает все основные зоны расположения цунамигенных землетрясений, угрожающих Дальневосточному побережью РФ. Эта система используется в расчетах ожидаемых высот цунами в защищаемых пунктах Дальневосточного побережья РФ.

8) Для трех населенных пунктов Дальнего Востока – пос. Малокурильское, пос. Северо-Курильск, г. Усть-Камчатск, расположенных в разных частях (южной, центральной и северной) Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и обладающих различной ориентацией подводной акватории по отношению к направлению подхода волн цунами, построены детальные цифровые массивы топографии и батиметрии на сетке с шагом (1 угловая секунда – около 30 м), позволяющим адекватно рассчитывать процесс наката волн цунами на побережье (**Рис. 10**). Проведены предварительные расчеты процесса взаимодействия с побережьем в окрестности этих пунктов волн цунами, порожденных гипотетическими очагами землетрясений магнитуды $M_w = 8.4$. Определены границы зон заливания и осушения берега в окрестности защищаемых пунктов, максимальные возвышения свободной поверхности воды, максимальные глубины и длительности затопления, максимальные модули скорости течений (**Рис. 11**).

Уточненный план работ по проекту на этап 2014 г.:

- Создание предварительной карты распределения активных структур и структурно-кинематической схемы Курильских островов с использованием результатов анализа сейсмичности и дешифрирования космических и аэрофотоснимков (ИВиС ДВО РАН).
- Создание сводной системы модельных очагов цунамигенных землетрясений Дальневосточного региона, получение оценок повторяемостей землетрясений различной магнитуды по отдельным цунамигенным зонам (ИВиС ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН, ИВМиМГ СО РАН, ИВТ СО РАН).
- На основе анализа расчетных мареограмм от системы модельных очагов подводных землетрясений построение распределения максимальных высот волн вдоль побережья (ИВМиМГ СО РАН, ИВТ СО РАН).
- Комплексный анализ и интерпретация результатов, полученных в ходе выполнения проекта, создание расчетной основы (базы данных расчетных мареограмм цунами в защищаемых пунктах) для построения карты цунамирайонирования побережья и прогнозной оценки высот цунами, организация системы быстрого доступа к базе и системе визуализации (ИВМиМГ СО РАН, ИВТ СО РАН, ИВиС ДВО РАН).

Рисунки

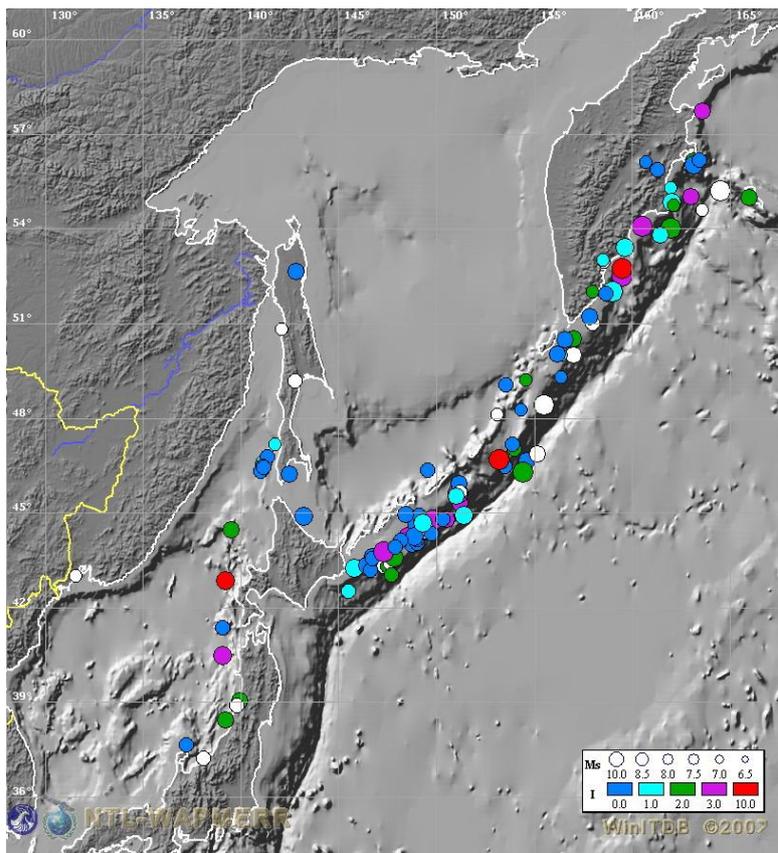


Рис. 1. Карта очагов цунамигенных событий, цунами от которых наблюдалось на Дальневосточном побережье РФ. Показано положение 111 очагов цунами, произошедших в регионе с 1737 по 2013 гг.

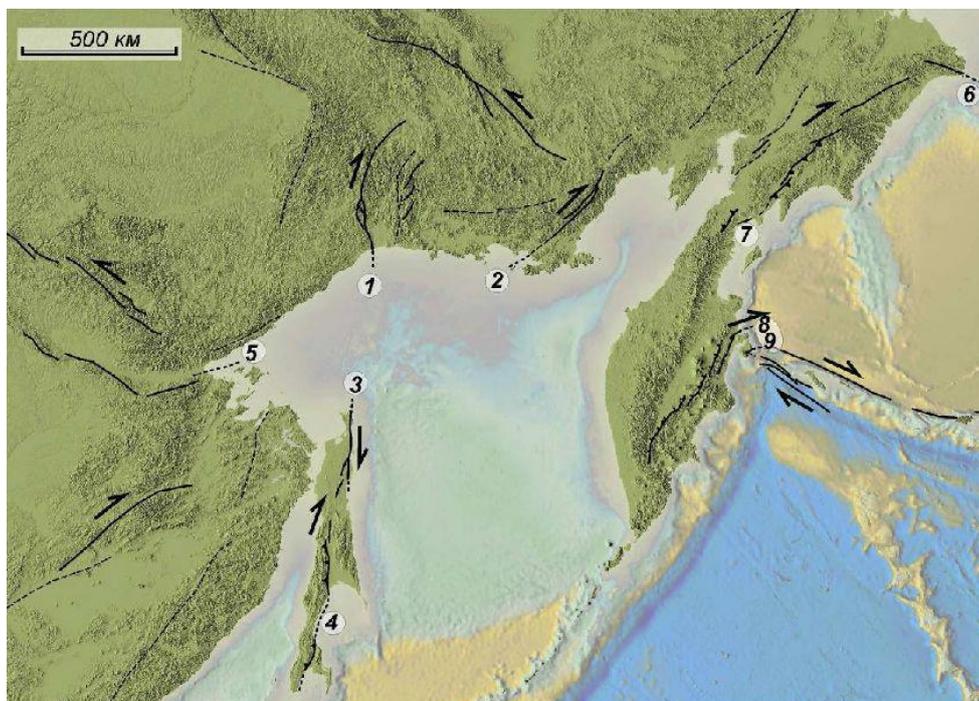


Рис. 2. Общая схема разломов Охотоморского и Берингоморского регионов. Сплошные линии – выделяемые уверенно; штриховые линии – предполагаемые; точечные линии – примерное продолжение под водой. Цифры в кружках – места выходов разломов к линии берега.

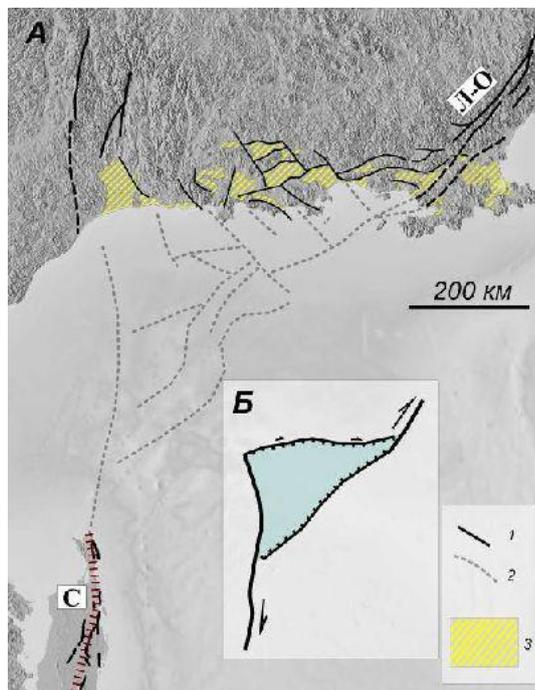


Рис. 3. Вероятная подводная структура на стыке Кетандинского, Ланково-Омолонского и Хейтонского разломов.

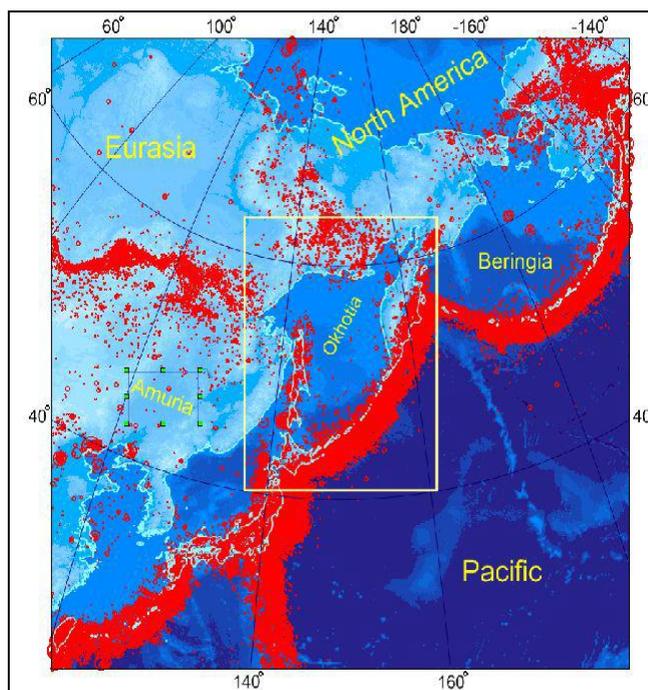


Рис. 4. Мелкофокусная сейсмичность Охотоморского региона (отмечен прямоугольником в центре) и прилегающих территорий. На карту вынесены землетрясения с глубиной гипоцентра < 70 км, зарегистрированные основными мировыми сейсмическими сетями (каталоги ISC, NEIC, Землетрясения в СССР и др.) за период 1964-2013 гг.

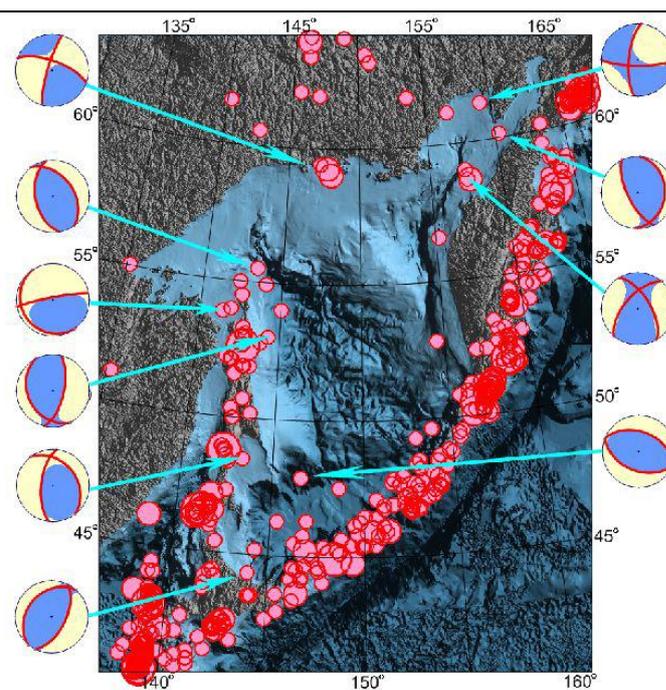


Рис. 5. Сильнейшие мелкофокусные землетрясения Охотоморского региона, $M_{max} \geq 5.0$ за период 1964 – 2013 гг. (добавлено четыре более ранних землетрясения, произошедших в на шельфе). Приведены наиболее надежные определения механизмов очагов для событий, эпицентры которых располагаются во внутренней акватории Охотского моря.

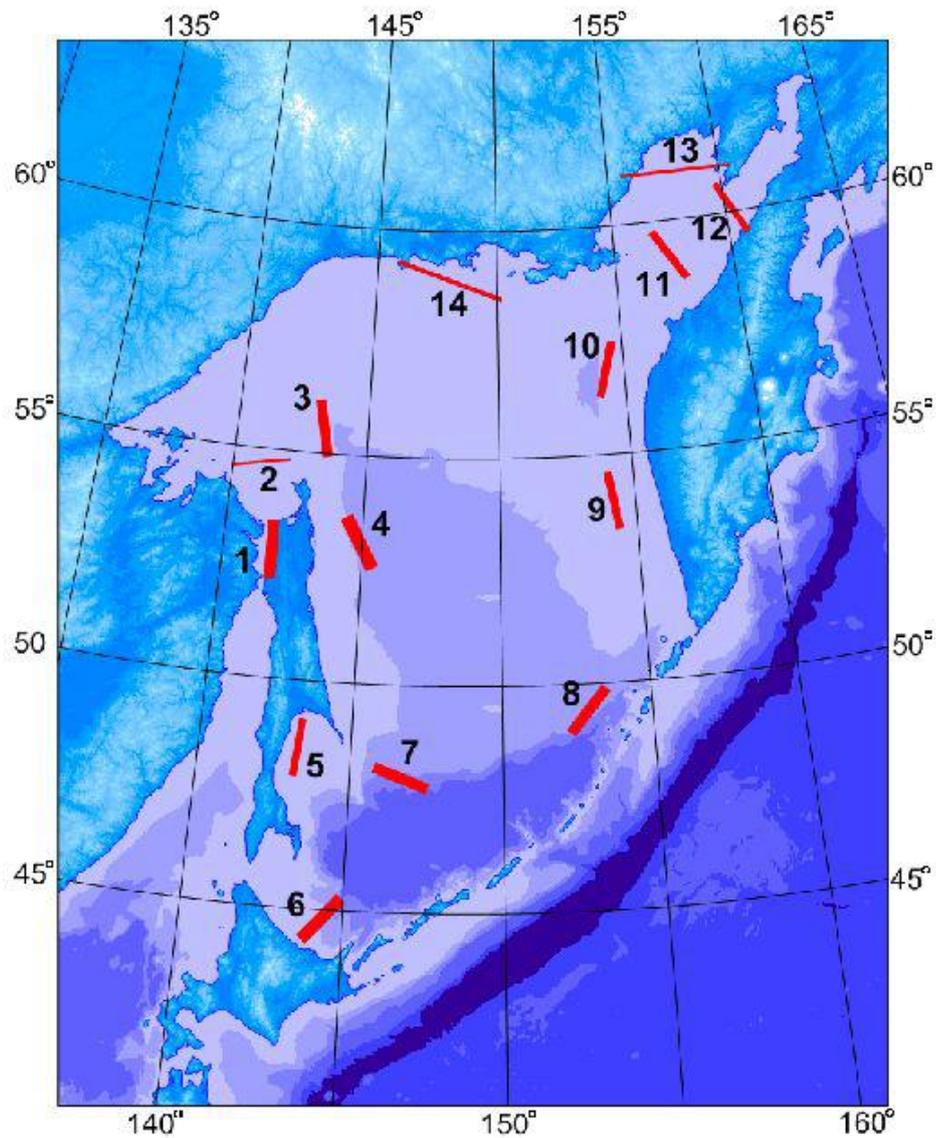
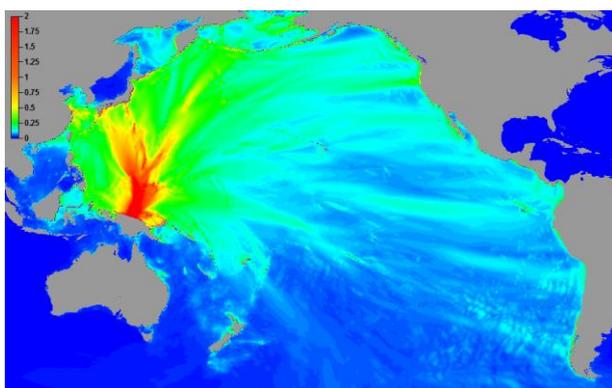
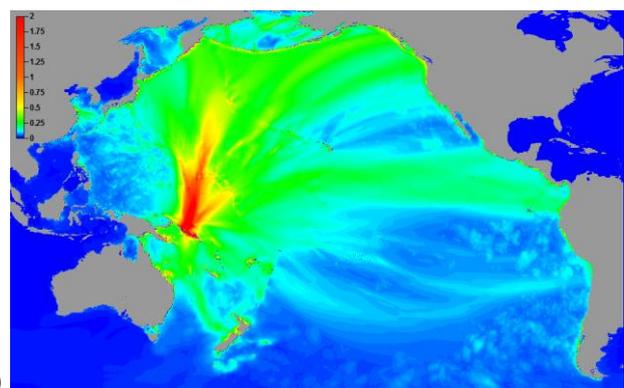


Рис. 6. Проекции построенных модельных очагов подводных землетрясений, расположенных в пределах акватории Охотского моря.



(a)



(б)

Рис. 7. Диаграммы направленности распространения энергии волн цунами, порожденных гипотетическими цунамигенными землетрясениями с магнитудой $M_w = 9.0$ вблизи Папуа-Новой Гвинеи (a) и Соломоновых островов (б).



Рис.8. Карта распределения высот волн цунами повторяемостью 1 раз в 100 лет (h_{100}) вдоль побережья Южных Курильских островов.

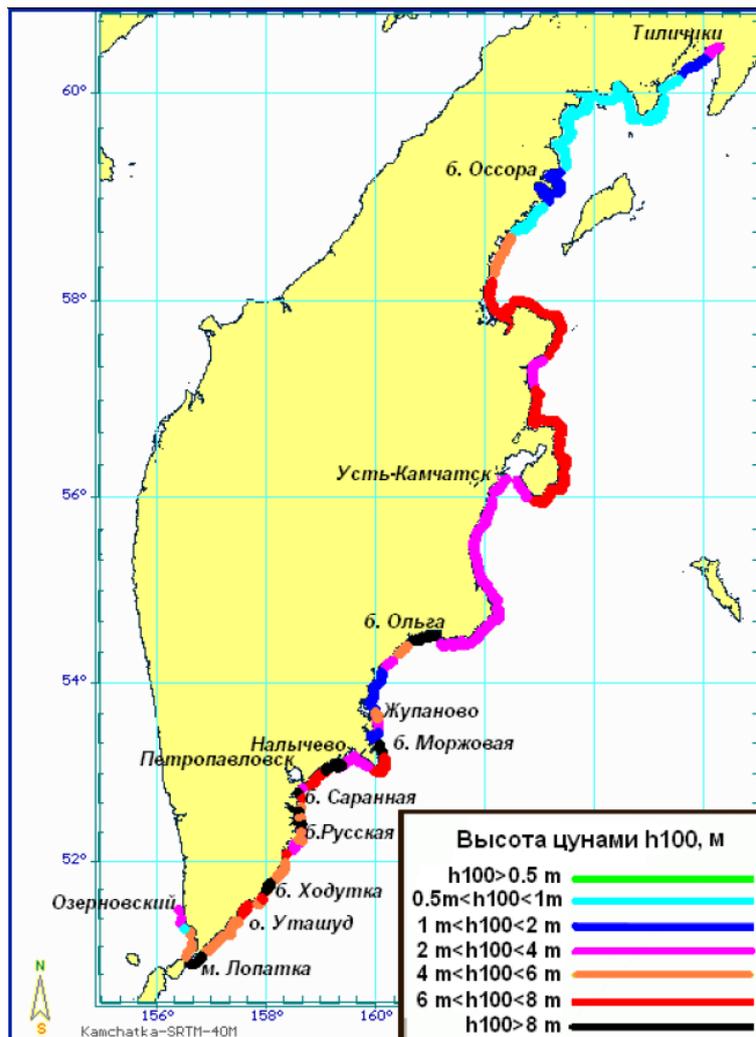


Рис. 9. Карта распределения высот волн цунами повторяемостью 1 раз в 100 лет (h_{100}) вдоль побережья полуострова Камчатка.

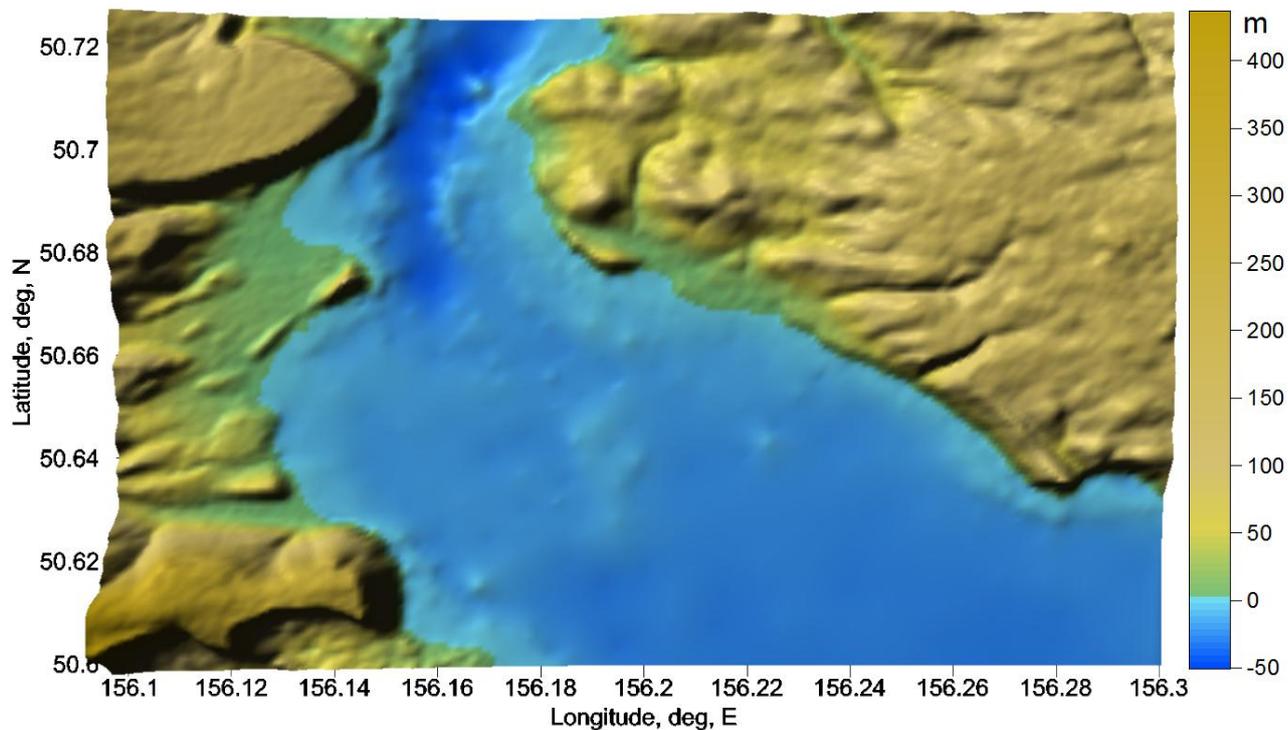


Рис. 10. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи г. Северо-Курильска.

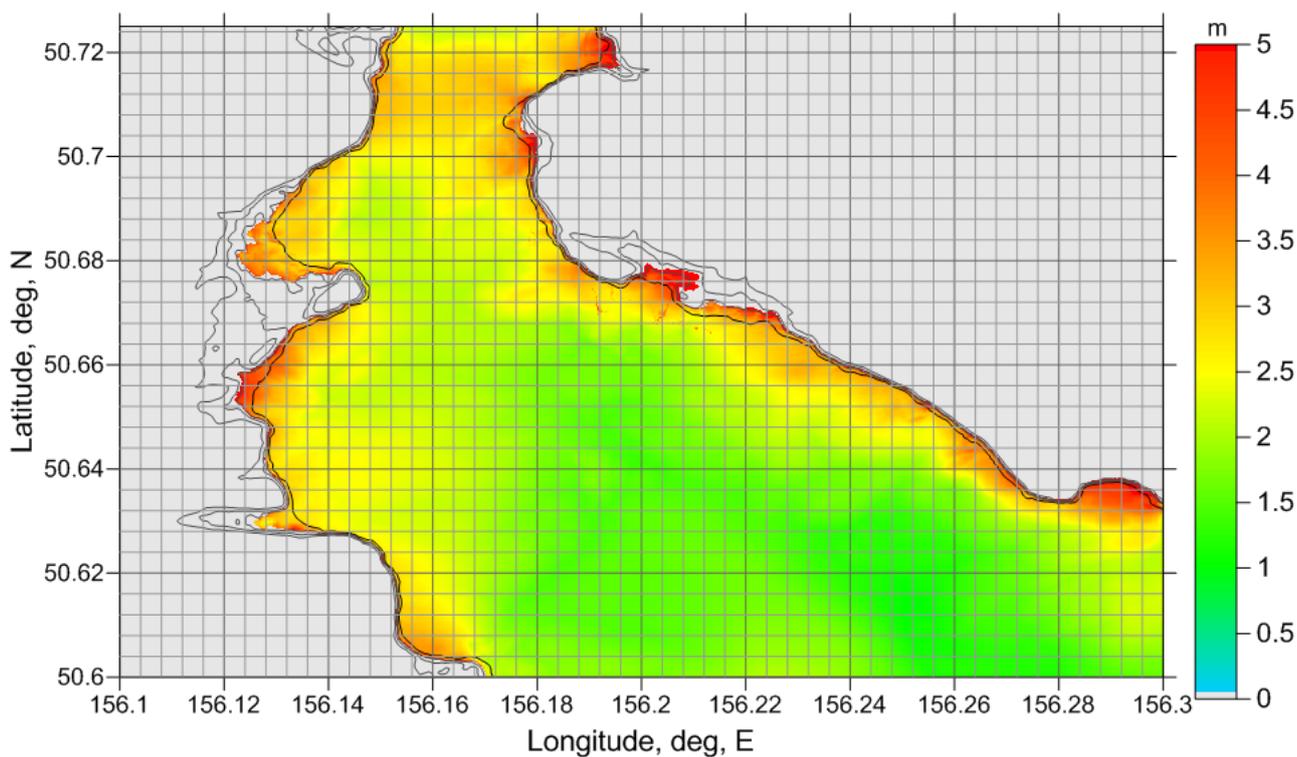


Рис. 11. Распределение максимальных возвышений свободной поверхности при заплеске волн цунами от модельного очага магнитуды $M_w = 8.4$ для защищаемого пункта «Малокурильское». Серым цветом отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м. Жирная черная линия показывает положение невозмущенной линии уреза.

Библиографический список научных трудов:

символом (*) отмечены совместные публикации сотрудников партнерских организаций

Опубликованные в 2013 г.

**Beisel S., Gusakov V.K., Chubarov L., Shokin Y.* Tsunamis in the Okhotsk Sea: results of numerical simulation and analysis of historical data // Conference Information «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro. P. 68.

**Gusakov V.K., Chubarov L.B., Beisel S.A.* Assessment of tsunami hazard for the coast of the Okhotsk Sea // Abstracts of the SP1 Symposium «Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning» of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, Gothenburg, Sweden.

Pedoja K., Authemayou C., Pinegina T., Bourgeois J., Nexer M., Delcaillau B., Regard V. «Arc-continent collision» of the Aleutian-Komandorsky arc into Kamchatka: insight into Quaternary tectonic segmentation through Pleistocene marine terraces and morphometric analysis of fluvial drainage // *Tectonics*. 2013. DOI: 10.1002/tect.20051.

Pinegina T.K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E.A., Lander A.V., Arcos M.E.M., Pedoja K., MacInnes B.T. A nexus of plate interaction: Segmented vertical movement of Kamchatsky Peninsula (Kamchatka) based on Holocene aggradational marine terraces // *The Geological Society of America Bulletin*. 2013. Vol. 125, No. 9-10. P. 1554-1568. doi: 10.1130/B30793.1.

Shevchenko G.V., Zolotukhin D.E., Tikhonov I.N. A method for the tsunami risk estimation along the Russia's Far East // *Science of Tsunami Hazards*. 2013. Vol. 32, No. 4. P. 212-220.

**Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б.* Вычислительные технологии определения заплесков волн цунами на отдельные участки дальневосточного побережья России // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 241-245.

**Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье России на основе результатов математического моделирования // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 236-240.

Гусяков В.К. Проблема мега-событий в оценке цунамиопасности побережья // Геология морей и океанов, Том V, Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, ИО РАН, 18-22 ноября 2013 г. С. 71-75.

Гусяков В.К. Сильнейшие цунами Мирового океана и проблема цунами-районирования морских побережий // Проблемы передачи информации. 2013. №4. С. 36-46.

Кайстренко В.М., Храмушин В.Н., Золотухин Д.Е. Оценка цунамиопасности для тихоокеанского побережья России // Мореходство и морские науки – 2012: избранные доклады Четвертой Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (5-7 сентября 2012 г. и 12 февраля 2013 г.). Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография. 2013. С. 181-194.

Кожурин А.И. Пинегина Т.К. Активные разломные деформации полуострова Камчатский // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 163-166.

**Косых В.С., Чубаров Л.Б., Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А.* Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. № 40. С. 115-134.

Ототюк Д.А., Чебров Д.В., Викулина С.А. Результаты работы РИОЦ «Петропавловск» в рамках Службы предупреждения о цунами и Службы срочных донесений в 2012–2013 // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 279-282.

Пинегина Т.К. Цунамигенные землетрясения на западном обрамлении Командорской котловины (по данным палеоцунами) // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 288-293.

Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // в книге «Мировой океан. Том I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане» – М.: Научный мир, 2013. С. 488-498.

Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. – М.: Научный Мир. 2013. 161 с.

**Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Чебров Д.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М.* Развитие научно-методического обеспечения сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 221-225.

Чебров Д.В., Гусев А.А., Чебров В.Н. Алгоритм оперативного варианта карты сотрясений от произошедшего сильного землетрясения // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 294-298.

Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Ототюк Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОЦ «Петропавловск» в рамках службы цунами // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 299-303.

Сданные в печать

Pedoja K., Husson L., Johnson M.E., Melnick D., Witt C., Pochat S., Nexer M., Delcaillau B., Pinegina T., Poprawski Y., Authemayou C., Elliot M., Regard V., Garestier F. Staircase construction of Quaternary and Upper Cenozoic sequences of strandlines caused by sea level oscillations and tectonic uplift // *Earth-Science Reviews*.

Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // *Физика Земли*.

Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г. Скорость коллизионных деформаций полуострова Камчатский (Камчатка) // *Геотектоника*.

Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Активная тектоника и геоморфология побережья Камчатского залива (Камчатка) // *Тихоокеанская геология*.

Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Эндогенные геологические процессы и история развития устьевой области р. Камчатки в голоцене // *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*.

Участие в научных мероприятиях по тематике проекта:

International Conference «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro

Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, Gothenburg, Sweden.

IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября - 5 октября 2013 г.

Международная научная конференция (Школа) по морской геологии, Москва, ИО РАН, 18-22 ноября 2013 г.