

## АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ УДАЛЕННЫХ И БЛИЖНИХ ЦУНАМИ НА ОХОТОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Бейзель С. А.<sup>1</sup>, Гусяков В. К.<sup>2</sup>, Чубаров Л. Б.<sup>1</sup>, Шокин Ю. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, [chubarov@ict.nsc.ru](mailto:chubarov@ict.nsc.ru)*

<sup>2</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

### **Введение**

Относительная редкость (низкая повторяемость) цунамигенных явлений в Охотском море (сравнительно с соседней Курило-Камчатской зоной) порождает недооценку реальной опасности цунами в этом регионе. Отсюда следует 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.

Результаты выполненных авторами расчетов цунами от модельных очагов подводных землетрясений послужили основой для анализа проявления удаленных и ближних цунами на Охотоморском побережье. Для вычислительных экспериментов были выбраны модельные землетрясения, способные породить волны, близкие по характеру камчатским (1737 и 1952 гг.), чилийскому, аляскинскому и японскому (Тохоку) цунами (соответственно 1960, 1964 и 2011 гг.). Наряду с этими историческими цунамигенными землетрясениями были рассмотрены также гипотетические очаги, расположенные как в ближней зоне (Курильские острова) так и в дальней зоне (Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновы острова).

### **Анализ проявления ближних цунами у берегов Охотского**

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 модельными землетрясениями с магнитудами ( $M_w$ ) 7.8, 8.4 и 9.0, очаги которых располагались вдоль Курильских островов и основывались на известной модели пространственного дислокационного источника [1, 3]. Процесс распространения волн рассчитывался с использованием классических нелинейных уравнений мелкой воды, записанных в сферической системе координат [2], на сетке с шагом 1 угловая минута. Основным материалом для анализа являлись диаграммы свечения, показывающие направленность излучения энергии цунами модельными сейсмическими источниками и ее дальнейшую эволюцию при распространении в акватории Охотского моря.

Анализ полученных результатов показывает, что в случае землетрясений с магнитудой  $M_w$  до 7.8, опасных высот волн в этой акватории и вдоль охотоморского побережья не наблюдается. Однако с ростом магнитуды очага степень проникновения цунами в Охотское море возрастает. Усиливается также захват волновой энергии шельфами Сахалина, Камчатки и побережья в районе Магадана и Охотска. Так, для рассмотренных источников магнитуды  $M_w = 8.4$  высоты волн вдоль побережья составляют уже 2–3 м, а для  $M_w = 9.0$  на отдельных участках побережья достигают 8–10 м (рис.1).

На основе анализа полученных диаграмм свечения, можно выделить три основных направления потока энергии – к острову Сахалин (его южному, восточному и северному побережьям), к материковому побережью Охотского моря и к центральной части западного побережья полуострова Камчатка. При этом на континентальном побережье Охотского моря явно выделяются две «цунамиопасные» зоны, первая из которых включает защищаемые пункты Охотск и Иня, а вторая – Магадан и окрестности пунктов Балаганное и Тауйск.

Характер распространения энергии волн от «ближних» цунами в акватории Охотского моря, очевидно, определяется процессом прохода волн через Курильские проливы, а значит, – расположением эпицентров цунамигенных землетрясений относительно этих проливов.

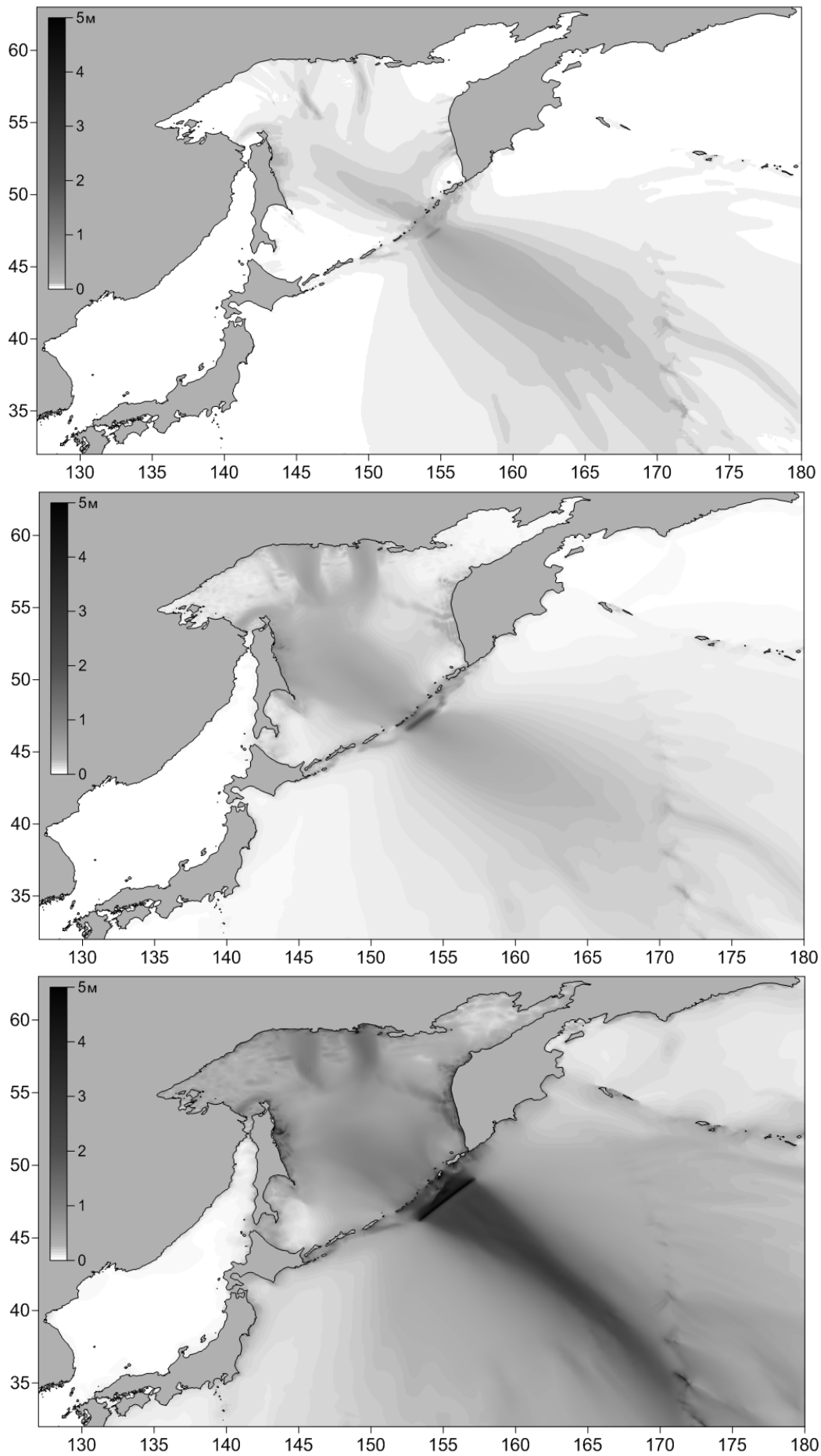


Рис. 1. Диаграммы свечения для модельных очагов с магнитудой  $M_w = 7.8$  (вверху),  $M_w = 8.4$  (в центре) и  $M_w = 9.0$  (внизу), расположенных в районе пролива Крузенштерна.

Для определения наиболее опасных для Охотского побережья мест расположения очагов цунами в Курило-Камчатской зоне была проведена серия расчетов по оценке воздействия на это побережье волн цунами, порождаемых очагами с магнитудой  $M_w = 9.0$  и эпицентрами, расположенными вдоль островной гряды пределах от  $45.5^\circ$  до  $51.9^\circ$  с.ш. и от  $149.2^\circ$  до  $157.75^\circ$  в.д., с шагом между эпицентрами  $0.5^\circ$ .

Анализ картин свечения и распределений максимальных положительных и отрицательных амплитуд волн, зафиксированных вдоль всего исследуемого побережья, показывает, что для самого южного из рассматриваемых здесь очагов основной максимум энергии приходится на центральную часть восточного побережья Сахалина, где амплитуды волн достигают почти 6 м (с размахом около 10 м), в центральной части колымского побережья эти значения составляют 3 и 6 м, а на западном побережье Камчатки – 2 и 4 м, соответственно.

При смещении очага к северу происходит постепенное смещение «сахалинского» луча к северной части острова, усиление обоих «охотских» лучей и «камчатского» максимума. Так, при положении эпицентра землетрясения в районе  $44.75^\circ$  с.ш.,  $147.75^\circ$  в.д. наблюдается наибольшее воздействие волн цунами на центральную часть побережья Охотского моря, при котором волны по высоте превышают 10 метров. На западном побережье Камчатки наибольшие волны фиксируются для очагов с эпицентрами в районе  $49.3^\circ$  с.ш.,  $154.8^\circ$  в.д., когда их высота приближается к отметке 8–10 м. При дальнейшем смещении эпицентра к северу «сахалинское» направление излучения волновой энергии окончательно затухает, а в сторону Магадана идут волны, отраженные от камчатского шельфа. Наконец, для самого северного из рассмотренных очагов значительные волны высотой порядка 3–4 м фиксируются только у западного побережья Камчатки, на Сахалине и в районе Охотска и Магадана не превышая 1.5–2 м.

Похожая картина изменений направленности излучения волновой энергии наблюдается и для очагов с магнитудой  $M_w = 8.4$ . Амплитуды волн, порожденных модельными очагами с эпицентрами в районе  $42.0 - 43.5^\circ$  с.ш.,  $142.5 - 145.2^\circ$  в.д., оказываются пренебрежимо малыми вдоль всего рассматриваемого побережья. Они становятся более заметными и достигают 1 м в центральной части материкового побережья Охотского моря для очагов, расположенных в районе  $44.8^\circ$  с.ш.,  $148.0^\circ$  в.д. Волна цунами, порожденная очагом в районе  $46.1^\circ$  с.ш.,  $150.5^\circ$  в.д., достигает полутора метров на восточном побережье острова 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, построенном для срединного очага в районе  $47.6^\circ$  с.ш.,  $152.75^\circ$  в.д., – 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.

При рассмотрении сценариев наиболее опасных для побережья Охотского моря гипотетических цунами, порожденных землетрясениями с магнитудой  $M_w = 8.4$ , рассматривались также модельные очаги, эпицентры которых размещались по нормали к линии разлома в районе точки  $48.45^\circ$  с.ш.,  $153.75^\circ$  в.д. в сторону Охотоморского побережья и в сторону Тихого океана с шагом  $0.3^\circ$ . Рассчитанные диаграммы свечения продемонстрировали идентичность основных направлений распространения энергии – в сторону восточного побережья Сахалина, западного побережья Камчатки (впрочем, совсем незначительно) и два луча в сторону материкового побережья Охотского моря. Наибольшие амплитуды волн наблюдаются от источников, лежащих внутри акватории Охотского моря, самый опасный из которых – очаг, расположенный в точке ( $48.75^\circ$  с.ш.,  $152.45^\circ$  в.д.). При перемещении очагов в сторону Тихого океана их цунамиопасность резко снижается, и по своим размахам волны не превышают 1 м. Опасность, однако, сохраняется для окрестностей Магадана.

### **Анализ проявления удаленных цунами у берегов Охотского моря**

Анализ распределений высот цунами вдоль побережья Охотского моря, порожденных удаленными землетрясениями из других цунамигенных зон Тихого океана, выполнялся по результатам моделирования наиболее опасных источников с магнитудой  $M_w = 9.0$ , расположенных вдоль всего сейсмического пояса Тихого океана. Всего было рассмотрено 94 модельных очага с шагом между их эпицентрами около 4 градусов. Полученные результаты показали, что наиболее опасными для побережья Охотского моря являются очаги (см. рис. 2 – 4), расположенные в трех цунамигенных зонах – в южной части побережья Чили, вблизи очага разрушительного землетрясения 1960 г. (эпицентр в точке  $47.3^\circ$  ю.ш.,  $254.9^\circ$  з.д.), в районе Папуа-Новой Гвинеи ( $7.4^\circ$  ю.ш.,  $156.6^\circ$  в.д.) и в районе Соломоновых островов ( $2.0^\circ$  ю.ш.,  $141.4^\circ$  в.д.).

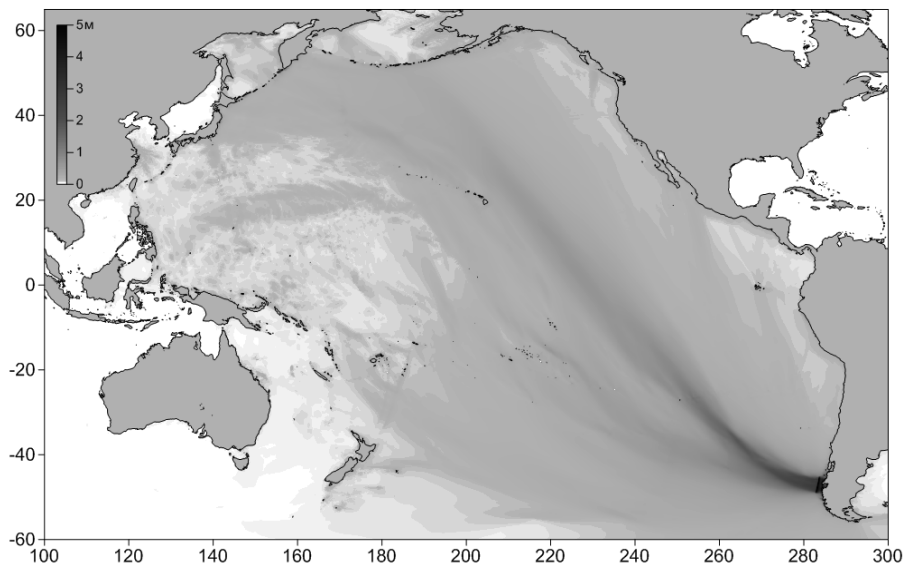


Рис. 2. Диаграммы свечения для модельного очага с магнитудой  $M_W = 9.0$ , расположенного у побережья Чили.

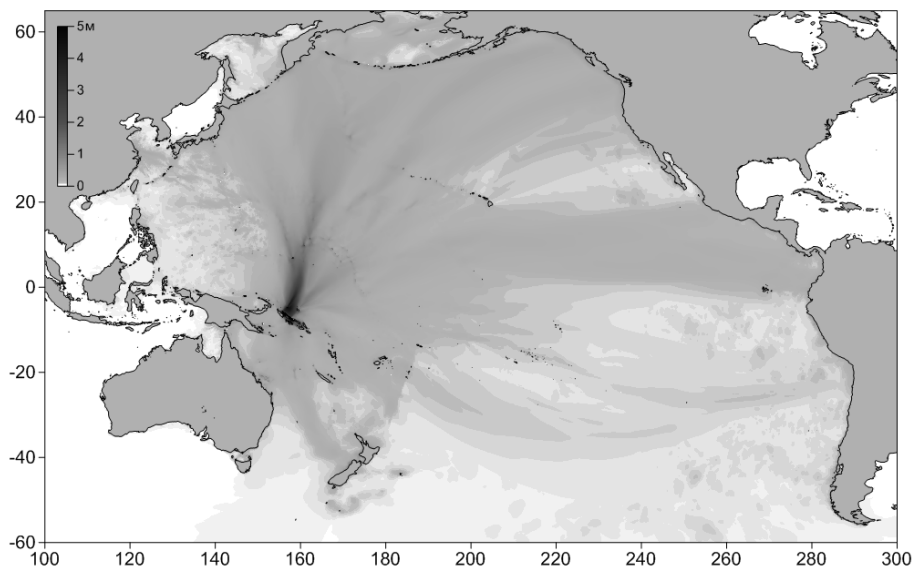


Рис. 3. Диаграммы свечения для модельного очага с магнитудой  $M_W = 9.0$ , расположенного у побережья Соломоновых островов.

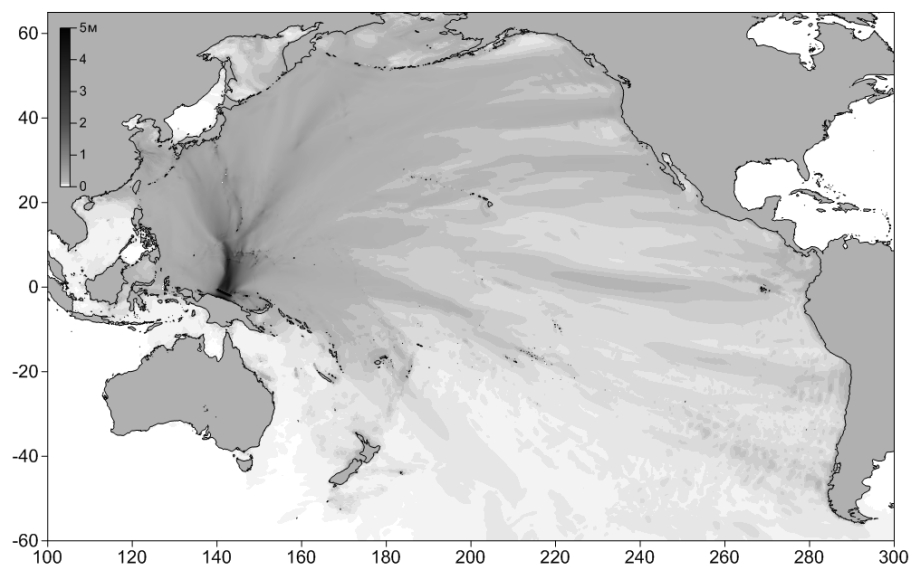


Рис. 4. Диаграммы свечения для модельного очага с магнитудой  $M_W = 9.0$ , расположенного у побережья Папуа-Новой Гвинеи.

Как следует из полученных результатов, наибольшую опасность представляет «чилийский» источник, при котором максимальные высоты волн на северо-востоке Сахалина, центральной части материкового побережья Охотского моря и юго-западной оконечности Камчатского полуострова составляют до 2 м и более. Немного меньшие высоты, порядка 1–1.5 м. наблюдаются от источников в районе Новой Гвинеи и Соломоновых островов.

При этом следует учесть довольно грубую разрешающую способность использованной в этих вычислительных экспериментах расчетной сетки с шагом 2 угловые минуты, которая позволяет оценить положение наиболее опасных очагов, но не достаточна для получения точных оценок ожидаемых высот волн на рассматриваемом побережье. Также стоит отметить различие между временами прихода первой и максимальной по амплитуде волн, в результате которого максимальные колебания уровня могут начинаться спустя десятки часов после ожидаемого времени прибытия головной волны. Это обстоятельство осложняет регламентацию процедуры объявления и отмены тревог цунами при удаленных событиях.

### **Заключение**

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

Представленные в статье результаты численного моделирования показывают, что опасные (с высотой более 0.5 м) колебания уровня от Курило-Камчатских землетрясений в западной части охотоморского побережья 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 вкост простирания островной дуги общей тенденцией является рост амплитуд волн на колымском побережье при приближении очага к островной дуге, который происходит даже при уменьшении средних глубин воды в очаговой области. При выходе очаговой области в задуговую (охотоморскую) сторону островной дуги, амплитуды колебаний достигают максимума.

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.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-05-00894, 12-07-00406), программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН (проекты 117А, 37Б) и Президентской программы «Ведущие научные школы РФ» (грант № НШ-6293.2012.9).

### **Список литературы**

1. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978, С. 23–51.
2. 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.
3. Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seis. Soc. Am. 1985. 75. No. 4. P. 1135–1154.