ОЦЕНКА ВАЖНОСТИ УЧЕТА ДИСПЕРСИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ В МОДЕЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ АКВАТОРИЯХ

С.А. Бейзель, О.И. Гусев, Г.С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров

Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, Россия beisel@ict.nsc.ru

При численном моделировании процессов распространения волн цунами обычно используются классические бездисперсионные уравнения мелкой воды – в декартовой системе координат в случае небольших акваторий и в сферической, с учетом сил Кориолиса, при моделировании распространения волн на большие, в том числе трансокеанские, расстояния.

Учет дисперсии происходит в основном при рассмотрении волн, порожденных оползнями, в то время как для сейсмогенных цунами, в силу их больших длин, предполагается, что вклад дисперсии невелик. В последние годы однако появляется все больше работ, в которых показывается, что добавление учета дисперсионных эффектов в случае относительно небольших магнитуд сейсмогенных землетрясений и/или больших расстояний, пройденных порожденными ими волнами, может приводить к существенному – вплоть до десятков процентов – изменению высот волн по сравнению с использованием бездисперсионных уравнений (работы [4, 5] и обзор литературы в них). При этом вклад дисперсии приводит, как правило, к уменьшению максимальной амплитуды головной волны, а высоту волн может как увеличивать, так и уменьшать.

В докладе представлены результаты, связанные с оценкой вклада дисперсии при численном расчете волн у побережья Дальнего Востока России от модельных землетрясений различной магнитуды. Рассматриваются случаи как ближних для российского побережья цунами, так и удаленных.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения важности учета дисперсионных эффектов при моделировании длинных поверхностных волн использовались две гидродинамические модели, записанные в сферической системе координат и учитывающие силу Кориолиса – классические нелинейные уравнения мелкой воды и полная нелинейно-дисперсионная модель [3]. Моделирование наката в представленных ниже расчетах не производилось, а вдоль береговой линии на глубине 10 – 20 м ставилось условие отражения.

Процесс генерации волн цунами подводным землетрясением воспроизводился в рамках «поршневой» модели дислокационного очага землетрясения [2]. Помимо таких модельных сейсмических источников, рассматривались и простейшие начальные возмущения свободной поверхности в форме экспоненциальных «шапочек» различной ширины.

Распространение волн моделировалось в областях как с дном постоянной глубины (4000 м), так и с неоднородным рельефом – в модельной акватории «К» с кусочно-линейным распределением глубин от 10 до 9000 м в одном из направлений, воспроизводящим основные особенности Курило-Камчатского глубоководного желоба, а также на реальных рельефах в акваториях, примыкающих к дальневосточному побережью России. Шаг расчетной сетки в области «К» составлял около 15 угловых секунд, в остальных случаях – 1 угловую минуту.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты расчетов распространения волн над ровным дном показали, что количественная мера вклада дисперсии существенным образом зависит от характерных размеров начального возмущения и удаления датчика от расположения этого возмущения. Так, на расстояниях до 500 км вклад дисперсии приводит к изменению высоты волн свыше 25% от очагов в виде «шапочки» – при ширине начального возмущения до 100 км, от модельных сейсмических источников (в направлении нормали к главной оси источника, где различия результатов максимальны) – при магнитудах Мw до 8.4. При увеличении ширины очага до 300 – 1000 км и магнитуды землетрясения до 9.0 вклад дисперсии начинает превышать 25% только на расстояниях свыше 1500 км.

Рассмотрение случая распространения волн от модельных сейсмических источников в акватории «К» в целом подтвердило выводы работ других авторов о слабом вкладе дисперсионных эффектов для близких очагов цунами. Вдоль границы области, воспроизводящей береговую линию, на которой ставилось условие отражения, разница в амплитудах, полученных по рассматриваемым гидродинамическим моделям, не превышала 5% напротив сейсмического очага даже от самых умеренных очагов магнитуды Mw = 7.2 – минимального порогового значения магнитуды, в случае превышения которого на российском дальневосточном побережье объявляется тревога цунами. Разница в амплитудах для такого очага начинает составлять около 20% только на расстояниях порядка 1000 км от очага вдоль линии побережья, где максимальные положительные амплитуды волн составляют, впрочем, всего 4 – 5 см (рис. 1).



Рис. 1. Сравнение мареограмм, полученных от очага с магнитудой Мw = 7.2 в акватории «К» напротив источника (а) и в 1000 км от него (б).

При увеличении магнитуды модельного землетрясения наблюдается тенденция к существенному (примерно в полтора раза вдоль береговой линии для очага 9.0) ослаблению дисперсионных эффектов. Здесь стоит отметить, однако, что даже при большой магнитуде Mw = 9.0 эффект дисперсии может стать достаточно значимым. Так, при некоторых механизмах очага (направлениях подвижки) или малых глубинах залегания гипоцентра очага (около 10 км), начальное смещение водной поверхности, полученное по модели Подъяпольского-Гусякова-Окады, может содержать высокочастотную компоненту («пик») на границе между положительной и отрицательной частями дипольного источника, влияние дисперсии на распад которой велико. Это говорит о том, что непосредственный перенос знаний о важности учета дисперсии с простейших (например, экспоненциальных) возмущений к сейсмическим источникам только по характерному размеру начального возмущения может привести к ошибочным выводам, и для получения адекватных реальным физическим процессам оценок необходим подробный параметрический анализ задачи.

Отметим также, что хотя относительная погрешность, вносимая отказом от учета дисперсии, с расстоянием, пройденным волной, увеличивается, ее абсолютное значение, как правило, уменьшается. А так как при определении цунамиопасности важны абсолютные величины амплитуд волн и погрешности в их определении, ниже основное внимание будет сосредоточено именно на них.

На следующем этапе исследования был выполнен переход от модельных акваторий к акваториям с реальным распределением глубин. В первую очередь, были рассмотрены очаги магнитудой Mw от 7.8 до 9.0, расположенные в ближней для дальневосточного побережья России зоне – напротив центральной части Курильской гряды, волны от которых проникали в Охотское море, а также очаги, лежащие напротив южной оконечности Камчатки.

Показанные на рисунке 2 разницы между максимальными положительными амплитудами, рассчитанными по бездисперсионной модели и модели, учитывающей дисперсионные эффекты, для слабого «южно-камчатского» очага Mw = 7.8 составляют всего около 25 см в пакете волн, распространяющемся от источника в сторону Тихого океана, а вдоль побережья Камчатки напротив очага не превышают 1 - 2 сантиметров при максимальных амплитудах здесь около 1 - 1.5 м. На «периферийных» участках распределения максимальных положительных амплитуд абсолютные значения разницы между результатами становятся еще меньше, хотя их относительное соотношение может достигать 40 - 50%. В случае «центрально-курильского» очага с магнитудой Mw = 7.8 картина в целом схожая: разница в результатах вдоль побережья составляет не больше 8 - 10 см в зоне максимальных положительных амплитуд в 1.5 м и быстро уменьшается при удалении от источника. Для модельных мега-землетрясений с магнитудами Mw = 9.0аналогичная разница составляет не более 20 см в зонах максимальных амплитуд 8 - 10 метров.



Рис. 2. Разница свечений для Камчатских очагов с магнитудами Мw = 7.8 (слева) и Mw = 9.0 (справа) на реальном рельефе.

Известно, что цунамиопасными для Дальневосточного побережья России являются не только ближние, но и удаленные землетрясения, эпицентры которых расположены вдоль сейсмического пояса Тихого океана. В работе [1] было показано, что наиболее опасными при этом являются волны, порожденные очагами сильнейших землетрясений класса М9 в районе южночилийского побережья, а также в районе Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновых островов, в то время как другие цунамигенные зоны Тихого океана, в силу их географического расположения, ориентации очагов и отсутствия выраженных волноводов вдоль трасс распространения цунами, не представляют опасности для российского побережья даже при предельно возможной магнитуде подводных землетрясений. Результаты исследования важности учета дисперсии при численном исследовании воздействия удаленных цунами продемонстрированы ниже на примере гипотетического «Папуа-Новогвинейского» модельного события с магнитудой Mw = 9.0, амплитуды волн от которого на севере Курильских островов и юге Камчатки могут превышать 4 м [1]. При магнитудном пороге, установленном для оповещения о тревоге в случае удаленных цунами отечественной службой предупреждения о цунами на уровне Mw = 8.5, в расчетах рассматривались также случаи модельных очагов Mw = 8.4.

Были рассмотрены случаи распространения волн над дном постоянной глубины (4000 м) и над реальным рельефом дна. При близких в обоих случаях абсолютных значениях амплитуд, здесь сильно различаются, во-первых, направление распространения основного волнового пакета: на ровном дне максимальные волны распространяются, что естественно, на северо-восток, в направлении, перпендикулярном главной оси источника, а на реальном – рассеиваются по акватории Тихого океана с фокусировкой одного из «пальцев» как раз в сторону Северных Курил и юга Камчатки. Разницы между максимальными положительными амплитудами, полученными по разным гидродинамическим моделям (рис. 3), в этих случаях также сильно отличаются: если на ровном дне недалеко от источника разница составляет до 0.5 м с постепенным уменьшением при удалении от него, то на реальном рельефе она во всей входящей в расчетную область северозападной части Тихого океана не превышает 10 – 20 сантиметров. На российском побережье в зоне максимальных амплитуд 2 – 4 метра разница находится в тех же пределах.



Рис. 3. Разница свечений для удаленного (Папуа-Новая Гвинея) модельного очага с магнитудой Мw = 9.0 на ровном дне (слева) и на реальном рельефе (справа).

Таким образом, авторами проведено сопоставление важности учета дисперсии на модельных акваториях и на рельефах с реальным распределением глубин. Получена предварительная оценка важности учета дисперсионных эффектов при решении задачи цунамирайонирования дальневосточного побережья России. При получении этой оценки рассмотрены модельные гипотетические землетрясения, представляющие цунамиопасность для российского побережья и расположенные в ближней и дальней относительно этого побережья зонах.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00219).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Оценка воздействия удаленных цунами на дальневосточное побережье России на основе результатов математического моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т 50, № 5. С. 578-590.
- 2. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условнокорректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23-51.
- 3. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Уравнения полной нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды на вращающейся сфере // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 6. С. 22-35.
- 4. Glimsdal S., Pedersen G.K., Harbitz C.B., Lovholt F. Dispersion of tsunamis: does it really matter? // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. Vol. 13. P. 1507-1526.
- 5. Kirby J.T., Shi F., Tehranirad B., Harris J.C., Grilli S.T. Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects // Ocean Modelling. 2013. Vol. 62. P. 39-55.