В.Н. Храмушин

*Всероссийское научно-инженерное общество судостроителей
имени А.Н. Крылова, Сахалинское отделение, Южно-Сахалинск,
Khram@mail.ru*

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЧАГА МОРСКИХ НАВОДНЕНИЙ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация. В настоящем исследовании рассматриваются компоненты гидромеханики в очагах опасных морских явлений, используемые в качестве начальных и граничных условий в построении высокоэффективных вычислительных экспериментов для прямого моделирования опасных морских наводнений, цунами, штормовых нагонов и экстремальных течений близи побережья, в том числе в бухтах и гаванях портов, на шельфе и на мелководьях рыбных и нефтепромыслов. Для быстрого построения гидродинамического очага в эпицентре землетрясения используются макросейсмические оценки по регрессионным зависимостям в проявлениях исторических цунами, при моделировании штормовых нагонов и экстремальных прибрежных течений задействуется регламентная и прогнозная информация синоптических карт. Серия ретроспективных вычислительных экспериментов подтверждает корректность результатов гидродинамического моделирования, также как и вполне адекватное графическое представление волновых процессов на море в ходе интерактивно управляемой визуализации результатов в реальном или опережающем времени. Весь комплекс программного обеспечения, документация к нему и исходные тексты программ предлагаются к свободному использованию в интересах морских научных исследований, также как и для морских регламентных и оперативных служб России.

Ключевые слова: гидродинамика, цунами, штормовой нагон, подводное землетрясение, атмосферный циклон, тайфун.

V.N. Khramushin
*Alexey Krylov Russian Scientific and Engineering Society
of Shipbuilders, Sakhalin Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,
Khram@mail.ru*

COMPUTING MODEL OF SOURCES OF SEA FLOOD FROM SEISMIC EARTHQUAKES AND ATMOSPHERIC TYPHOONS

Abstract. The present study examines the components in the source of hydromechanics marine hazards, used as initial and boundary conditions in the construction of highly efficient computational experiments for direct modeling of dangerous sea floods, tsunamis, storm surges and extreme currents near the coast, including in bays and harbors of ports, on the shelf and in shallow waters of fisheries and oil fields. A series of retrospective computational experiments confirms the correctness of the results of hydrodynamic modeling, as well as a quite adequate graphical representation of wave processes at sea during interactively controlled visualization of the results in real or preventing time. The entire range of software, its documentation and source codes of programs are offered for free use in the interests of marine scientific research, as well as for marine regulatory and operational services of Russia.

Key words: hydrodynamics, tsunami, storm surge, underwater earthquake, atmospheric cyclone, typhoon.

Введение

В действующих службах мореплавания и оперативных отделах гидрометеорологических прогнозов весьма актуально непрерывное ведение прямых вычислительных экспериментов с целью уточненной или интерполяционной оценки текущих гидродинамических процессов на всем протяжении подконтрольного морского побережья, на прибрежных и открытых морских каботажных фарватерах, на рыболовных банках и морских нефтепромыслах. Эффективность таких вычислительных экспериментов вполне обоснована [1, 2], а их реализация может востребоваться в случае ограниченного количества береговых гидрофизических постов и судовых метеостанций открытого моря, обеспечивающих оперативную доставку информации по телеметрическим каналам связи в реальном времени.

Важным компонентом такой системы непрерывного и вездесущего контроля состояния моря представляются также алгоритмы своевременной корректировки хода вычислительных экспериментов в случае необходимости своевременной выработки и обоснования штормовых предупреждений, опирающихся на упреждающие прогнозы развития опасных морских явлений, и для которых прямые вычислительные эксперименты представляются наилучшим и, фактически, единственно доступным инструментальным средством.

В настоящем исследовании рассматриваются отработанные на практике вычислительные модели очагов морских наводнений, возникающих при подводных землетрясениях [4], или при прохождении морских тайфунов [5] и других атмосферных аномалий. В глубоком открытом море такие возмущения поверхности океана обычно не представляют особой опасности, в отличие от аналогичных внешних возмущений на рыболовных банках, в прибрежном шельфе или вблизи отмелого берега. Проверка справедливости последнего тезиса с помощью серии вычислительных экспериментов [3] лежит в основе наиболее интересных результатов настоящего исследования, что образует основу для предложений об использовании новых вычислительных экспериментов в реальной морской практике.

Импульсный источник сейсмического цунами

Исходные теоретические исследования гидродинамического очага цунами для реализации оперативного или оценочного вычислительного эксперимента по моделированию распространения и воздействия волн цунами на побережье относятся к гидрометеорологии и наукам об Атмосфере, Океане и Земле, объединяемых методами вычислительной гидромеханики по моделированию их взаимодействия при проявлении морских наводнений, экстремальных течений и других опасных морских явлений в открытом океане и вблизи побережья.

Целью исследований ставится проработка методов для адекватных оценок начального проявления цунами вблизи побережья, с возможностью их уточнения в темпе поступления данных о наблюдениях опасного морского явления непосредственно в море и на побережье, сообразно регламенту оперативного контроля и прогноза усиления или

снижения опасности воздействия волн цунами на конкретных участках морского побережья, в бухтах и гаванях морских портов.

Практическая методология складывается из систематических ретроспективных вычислительных экспериментов по моделированию различных исторических наводнений сейсмического и синоптического происхождения, сводящихся к формализации способов адекватного представления главной составляющей гидродинамического возмущения водной поверхности под внешним воздействием. Физическое обоснование видится в возможности возникновения длинноволновых откликов на кратковременные сейсмические толчки, как результат дисперсионного отклика на аккумуляцию высокочастотной гидродинамической энергии при сотрясениях резонирующих участков морского дна (рис. 1), откуда направляется гидродинамический поток в сторону меньших давлений на мелководье.

Дополнительной энергетической составляющей для фронта волны цунами волны, особенно на свалах глубин на шельфе и вблизи побережья, служат оползневые процессы на наклонном дне (рис. 2), которые оказывают прямое длинноволновое воздействие на толщу воды в темпе перемещений больших объемов придонного грунта.

Рис. 1. Гидродинамический очаг дисперсионной трансформации волн на глубокой воде в длинноволновой скоростной поток в сторону отмелого берега, куда он направляется с отливной полуфазы, создавая, таким образом, наивысшую опасность цунами у ближайшего к очагу землетрясения морского побережья.

- 1 – океанский склон; 2 – континентальный шельф; 3 – эстуарий;
4 – береговой урез; 5 – зона сейсмической сотрясаемости
с образованием высокочастотных волн на глубокой воде;
6 – дисперсионное выполаживание длинных волн
с направление фронта в сторону берега

Рис. 2. Гидродинамический очаг цунами, возникающий в момент сползания донного оползня.

- 1 – океанский склон; 2 – континентальный шельф; 3 – зона эстуария;
 4 – береговой урез; 5 – формирование оползня на приглубом дне;
 6 – смыв разжиженного грунта с мелководного склона;
 7 – образование встречных потоков воды по условию неразрывности (сохранения объема жидкости); 8 – фронт волны цунами движется в сторону берега

Построение гидродинамического очага цунами может начинаться в момент поступления информации от сейсмологических служб о магнитуде и географических координатах очага землетрясения, а при малой удаленности от побережья становится полезной предварительная оценка глубины этого сейсмического очага. Размеры и превышение уровня моря в очаге определяются по регрессионным аппроксимациям многочисленных сейсмических событий цунами в заданном регионе по макросейсмической гипотезе, связывающей зарождение цунами с сотрясаемостью морского дна [2]. Параметры очагов цунами могут предварительно районироваться для конкретных прибрежных акваторий, однако, в интересах оперативной службы вполне достаточно расчетов с использованием осредненных значений. Гидродинамические особенности очага цунами, зависящие от формы рельефа морского дна, имеют существенно большее влияние и, как следствие, образуют главные компоненты в результатах прямых вычислительных экспериментов.

На участках морского дна с относительно одинаковой глубиной достаточно исходных построений макросейсмического очага цунами,

без нарушения его симметрии и без придания начальной скорости движения фронта волны. Такой «поршневой механизм» подъема морского дна может ориентироваться вдоль геологических разломов в земной коре, если местоположение таковых известно, либо очаг выравнивается равноудалено от берегового уреза, что предопределяет наиболее опасный вариант проявления цунами.

На наклонном фрагменте морского дна большая ось макросейсмического очага автоматически ориентируется по направлению преобладающих изобат, вдоль относительно равных глубин или равноудалено от берега. В сторону мелководья устраивается относительно небольшое снижение уровня воды, не более половины исходной макросейсмической высоты. Пропорционально величине и в направлении этого отлива инициируется импульс начального движения волны с больших глубин в сторону прибрежного мелководья. Выполняется деформация очага цунами (рис. 3) для перераспределения высот уровня моря и начальных скоростных потоков по аналогичным эллиптическим распределениям высот уровня моря и скоростных потоков воды, отчего макросейсмический очаг обретает повышение фронта исходной волны на удалении в сторону больших глубин.

Природа механизма формирования очага цунами при кратковременном сейсмическом событии определяется двумя факторами. При высокой сотрясаемости в несжимаемой водной толще вблизи морского дна образуются интенсивные пульсации, в том числе достигающие отрицательных давлений в фазе инерционного отрыва воды от грунта. Такой эффект проявляется сильнее на мелководьях, где давление воды в спокойном состоянии значительно меньше. Вязкий морской грунт разжижается и обретает способность перемещения на большие глубины – образуя подводные оползни. Гидродинамически это приводит к подъему уровня моря на больших глубинах, с соответствующим опусканием на мелководье (рис. 2), что для соблюдения условий неразрывности в жидкости отмечается потоком воды в сторону берега как для глубоководной положительной фазы волны, так и для ее отливной составляющей на мелководье.

Дополнительный импульс в формировании фронта волны цунами в сторону берега объясняется дисперсионными эффектами трансформации высокочастотной сотрясаемости водной толщи в длинные волны. На больших глубинах толща воды обретает значительно большую кинетическую энергию от сотрясаемости морского дна, которая может высвобождаться в направлении меньших гидростатических давлений на малых глубинах. Формально не существует однозначных механизмов преобразования высокочастотных колебаний морского дна в длинные волны цунами, энергия землетрясения должна поглощаться вязким сопротивлением воды на столь быстрых сейсмических колебаниях. Однако, вблизи мелководного побережья всегда существуют добротные длинноволновые осцилляторы с периодами порядка 3 мин., и на океанском шельфе – порядка 12 мин, и именно на этих участках морского дна проявляются резонансные свойства высокодобротных генераторов длинноволновых процессов, инициирующих потоки воды и волновые фронты в направлении берега, где и проявятся волны цунами на характерных для данного побережья собственных (сейшевых) периодах колебаниях уровня моря.

Изложенный способ генерации очага цунами в качестве отклика на кратковременные и интенсивные сейсмические сотрясения морского дна, в том числе сопровождающиеся оползневыми явлениями, сводится к модельной предуготовке его исходных параметров:

- макросейсмические оценки сводятся к эллиптической деформации с изначально плавным подъёмом уровня моря (рис. 3), при этом главные оси эллиптического очага ориентируются по направлениям преобладающих изобат или вдоль берегового уреза;

- в зависимости от крутизны свала глубин, в мористой зоне устраивается фронт волны цунами с подъёмом уровня моря, с частичным снижением высоты мелководной части до 25-30% от величины фронта на глубокой воде, с опусканием уровня вблизи побережья;

- на наклонном дне для положительной и отрицательной полуфазам волн придается начальный импульс движения в направлении меньших глубин, для чего очаг инициируется векторным полем до 30-40% от полного потока для прогрессивной волны;

– на ровном дне подъем уровня стационарный, начальных скоростей для перемещения исходного фронта не доопределяется.

Рис. 3. Очаг цунами на наклоне побережье вблизи Японии через десять минут после землетрясения с магнитудой 8,5. Основная энергия фронта волны направляется в сторону ближайшего Японского берега. На горизонтальном фрагменте морского дна эллиптичность макросейсмического очага не искажается (поршневой механизм). В этом случае большая ось очага может ориентироваться вдоль геологических разломов, если они известны и существенны, либо очаг вытягивается равноудалено от берегового уреза для создания наиболее опасного варианта проявления цунами

Построенный таким образом очаг цунами не привносит в результаты численного моделирования непредсказуемых неопределенностей, связанных со сложным рельефом дна или самовозбуждением сеточных аппроксимаций при нарушении интерполяционной гладкости волновых фронтов. Опыт инженерных построений аналогичных очагов цунами от исторических подводных землетрясений подтверждает в целом корректность моделируемых процессов зарождения, трансформации при распространении и последующего проявления морских наводнений и экстремальных течений на шельфе и прибрежных мелководьях, а также в закрытых прибрежных бухтах и гаванях морских портов.

Корабельные волны в следе атмосферного циклона

Простые перепады атмосферного давления при прохождении глубоких циклонов обычно не превышают 30–50 см водного столба. При этом в движении циклона, и особенно если скорость его перемещения превышает скорость распространения длинных волн по подстилающему мелководью, величины штормового нагона и скорости экстремальных течений растут без ограничений, что сдерживается лишь весьма слабым в морской воде придонным трением.

В теоретической части исследований обосновывается и проверяется корректность вычислительных экспериментов с использованием модельных построений геометрической формы и маршрутов прохождения атмосферных тайфунов и глубоких циклонов. Адекватность результатов проявляется при условии плавной (сплайновой) транс-формации гидродинамических параметров очага длинноволновых возмущений во времени и пространстве.

В проведенной серии вычислительных экспериментов интенсивность и маршруты моделируемых циклонов и тайфунов выбиралась с синоптических карт, в том числе с прогнозных, где геометрические характеристики очага формализуются по замкнутым изобарам. В исходные данные включалась также максимальная скорость ветра.

В практической методике предлагается к использованию главной части гидродинамического возмущения по градиентам атмосферного давления и спирального распределения циклонических ветров, возникающих над морскими акваториями при прохождении тайфунов и глубоких циклонов. Активное действие таких атмосферных аномалий проявляется в форме корабельных волн, аккумулирующих значительную кинетическую энергию при формировании длинноволновых фронтов морских наводнений над относительно мелководными акваториями, и особенно где скорость перемещения атмосферного возмущения становится соизмеримой или большей скорости движения свободных длинных волн по подстилающей акватории, либо когда размеры циклонических вихрей становятся соизмеримыми с пучностями собственных колебаний уровня моря в зоне влияния собственных прибрежных резонаторов с высокодобротными частотными характеристиками.

Геометрические размеры атмосферного тайфуна или глубокого циклона могут быть выбраны с гидрометеорологических карт, в том числе прогнозных, по последней замкнутой изобаре. Обычно это соответствует величине 1000 мбар, от которой отсчитывается величина подъема уровня моря в центре циклона (1 мбар = 1 см). Поверхностное напряжение штормового ветра [2] задается максимальной скоростью на высоте 10 м, и эмпирическим коэффициентом CA – с величиной 0,002 для теплых морей, или CA 0,001 для дальневосточных морей в холодные сезоны года.

Формализованный гидродинамический очаг не привносит в результаты численного моделирования непредсказуемых неопределенностей, связанных со сложным рельефом дна или самовозбуждением сеточных аппроксимаций при нарушении интерполяционной гладкости волновых фронтов. На вновь образуемых фронтах корабельных волн циклонического происхождения присутствуют компоненты высокочастотных длинноволновых возмущений, которые возбуждают шельфовые и близбереговые длинноволновые резонаторы. В зависимости от длительности штормового воздействия, резонансные явления приводят к образованию локальных метеоцунами с периодами волн порядка 3-5 минут вблизи прибрежных мелководий, и – порядка 12 минут при возбуждении длинных волн над шельфовыми акваториями с глубинами порядка 100-200 м. Подтверждением корректности моделируемых процессов прибрежной гидромеханики служит соответствие выявляемых резонансных периодов волн в вычислительных экспериментах и натурных наблюдениях за сейсмическими цунами на Дальнем Востоке России.

Опыт инженерных построений подвижных очагов атмосферных возмущений от исторических циклонов над Японским и Охотским морями, над Тихоокеанскими акваториями шельфа Курильских островов, подтверждает в целом физическую адекватность и корректность моделируемых процессов зарождения, трансформации при распространении и последующем проявлении морских наводнений и экстремальных течений вблизи контролируемых прибрежных акваторий, а также в закрытых бухтах и гаванях морских портов.

Способ построения гидродинамической модели очага штормовых нагонов предусматривает возможность выбора наиболее вероятных или потенциально опасных маршрутов атмосферных тайфунов и глубоких циклонов над открытым морем, при этом:

- возмущение уровня моря задается в дифференциальных приращениях атмосферного давления в форме гауссова источника–колокола внутри окружности на равноугольной меркаторской карте;

- подвижный очаг атмосферного давления дополняется ветровыми напряжениями со спиральным затягиванием поверхностных вод к центру циклонического вихря;

- для исключения ударных нагрузок на водную поверхность, все геометрические элементы формы и траектории атмосферного вихря, так же как и все его аэрогидродинамические характеристики, плавно распределяются с помощью гладких сплайновых аппроксимаций между контрольными географическими пунктами на произвольно выбираемом маршруте атмосферного тайфуна или глубокого циклона.

- применяемые методы сплайн-интерполяции геометрических и гидрометеорологических параметров построены на индексах контрольных точек во времени, что формально допускает возможность временной остановки движения циклона, в том числе с последующим возвратом его на пройденную траекторию (рис. 4), при этом ударные нагрузки на поверхности моря также не проявляются.

На батиметрической карте Татарского пролива, Охотского моря в Северо-Западной части Тихого океана (рис. 4, слева) приведен маршрут с контрольными местоположениями циклона через каждые 6 часов физического времени от начала вычислительного эксперимента. Горизонтальной дужкой внутри круга активного действия циклона показан характер изменения уровня моря; вертикальная кривая отмечает циклоническое направление ветра по спирали против часов стрелки в северном полушарии Земли. Большая кривизна траектории или практически обратное направление движение циклона связано с его шестичасовым стоянием в одном месте над Татарским проливом.

Рис. 4. Геометрическое моделирование маршрута циклона (слева) и результат прямого вычислительного эксперимента (справа)

Прохождение циклона над глубоководными акваториями (рис. 4, справа) не приводит к активным длинноволновым откликам. Опасное формирование корабельных волн, аккумулирующих значительную кинетическую энергию для морских наводнений над относительно мелководными акваториями, где скорость перемещения атмосферного возмущения становится соизмеримой или большей скорости движения свободных длинных волн по подстилающей водной акватории. На рисунке видны собственные длинноволновые колебания уровня моря вблизи побережья, действующие после прохождения циклона в форме захваченных сейшевых волновых процессов.

Заключение

Вычислительные эксперименты востребуются в прогнозах опасности сейсмических цунами, штормовых нагонов и экстремальных течений вблизи морского побережья. Ретроспективное моделирование цунами и штормовых нагонов в целом подтверждает достоверность результатов по времени фактического проявления и интенсивности опасного гидродинамического воздействия цунами, тайфунов и глубоких циклонов в открытом море и вблизи побережья.

Гидродинамическая модель сейсмического очага цунами служит способом оценочного определения гидростатических и гидродинамических параметров зарождающегося морского наводнения с использованием макросейсмических оценок исторических цунами в прибрежных акваториях дальневосточных морей России. Быстрый запуск вычислительного эксперимента допускает использование минимума оперативной информации, доступной сейсмическим службам непосредственно в момент начала регистрации подводного землетрясения.

Алгоритмическое обеспечение вычислительных экспериментов включает моделирование гидроаэромеханики взаимодействия океана и атмосферы, выполняемое под интерактивным контролем маршрута движения, интенсивности приводного ветра и геометрии очага возмущения водной поверхности при прохождении тайфунов и глубоких циклонов. Вычислительные эксперименты снова опираются на минимум доступных данных о погоде над морем, необходимых для выработки достоверных прогнозов морских наводнений и экстремальных течений вблизи морского побережья, включая бухты и гавани портов.

Вычислительные эксперименты реализованы в составе алгоритмов программного комплекса «Ani» [3], и представляются графическими процедурами для интерактивного формирования очагов цунами, маршрутов и параметров атмосферных тайфунов и циклонов. Собственно программный комплекс и сопутствующие утилиты опубликованы на корабельном портале: www.ShipDesign.ru/SoftWare/ для открытого пользования, и предлагаются к включению в регламентную и оперативную работу морских служб прогноза и предупреждения о потенциально опасных морских явлениях.

Литература

1. Судольский А. С. *Динамические явления в водоемах*. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 263 с.

2. *Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России*. Поплавский А. А., Храмушин В. Н., Непоп К. И., Королев Ю. П. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с. (Shipdesign.ru/Pub/Poplavsky/Book)

3. Храмушин В. Н. «Ани» – Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья. СахГУ. Роспатент № 2010615848 от 2010.09.08. (Shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html)

4. Храмушин В. Н. Гидродинамическая модель очага цунами. Роспатент № RU 2 652 643-C1, от 28 апреля 2018 г, бюл. № 13. (Shipdesign.ru/Invent/15.html)

5. Храмушин В. Н. Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна. Роспатент № RU 2 652 642-C1, от 28 апреля 2018 г, бюл. № 13. (Shipdesign.ru/Invent/14.html)

Reference

1. Sudol'sky A.C. *Dinamicheskie yavleniya v vodoemah* [Dynamic phenomena on water fields]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. 263 p.

2. *Operativniy prognoz navodneniy na morskikh beregah Dal'nego Vostoka Rossii* [Operational flood forecast on the seashores of the Russian Far East]. Poplavsky A.A., Khramushin V.N., Nepop K.I., Korolev Yu.P. Yuzhno-Sakhalinsk, FEB RAS, 1997. 272 p.

3. Khramushin V.N. "Ani" - *Pryamye vychislitel'nye eksperimenty dlya modelirovaniya tsunami, shtormovyh nagonov, ekstremal'nyh techeniy i prilivnogo rezhima v otkrytom okeane i vblizi poberezh'ya* ["Ani" – Direct computational experiments for modeling tsunamis, storm surges, extreme currents and tidal regimes in the open ocean and near the coast]. SakhSU. Rospatent. no. 2010615848, dated September 08, 2010. (Shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html)

4. Khramushin V.N. *Gidrodinamicheskaya model' ochaga tsunami* [Hydrodynamic model of the tsunami source]. Rospatent. no. RU 2 652 643-C1, dated April 28, 2018. (Shipdesign.ru/Invent/15.html)

5. Khramushin V.N. *Gidrodinamicheskaya model' istochnika shtormovyh nagonov i ekstremal'nyh techeniy pod vozdeystviem podvizhnogo atmosfernogo tayfuna* [Hydrodynamic model of a source of storm surges and extreme currents under the influence of a moving atmospheric typhoon]. Rospatent. No. RU 2 652 642-C1, dated April 28, 2018. (Shipdesign.ru/Invent/14.html)