

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.466.6 (265.72)

Нгуен Хонг Лан

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЮЖНО-КИТАЙСКОМ МОРЕ**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2005

Диссертация выполнена на кафедре Комплексного управления прибрежными зонами (КУПЗ) Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель:

- Кандидат географических наук, доцент Николай Леонидович Плинка.

Официальные оппоненты:

- Доктор физико-математических наук,
профессор Константин Алексеевич Клеванный.
- Доктор географических наук,
профессор Алексей Всеволодович Некрасов.

Ведущая организация:

- Санкт-Петербургское отделение института океанологии им. Ширшова П. П. РАН.

Защита диссертации состоится "24" ноября 2005 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. 812.444-41-56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Автореферат разослан "22" октября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



В. Н. Воробьев

2006-4
18993

2191435

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из направлений обеспечения устойчивого развития прибрежных зон является развитие комплексного подхода к управлению этим развитием. Прибрежная зона рассматривается как единая система, включающая природную, экономическую и социальную компоненты, которые взаимодействуют между собой путем образования и трансформации различных материальных, финансовых и информационных потоков.

Важной задачей системы комплексного управления прибрежными зонами является управление рисками от воздействия стихийных бедствий, связанное прежде всего с затоплением сухого берега, вызванного подъемами уровня в результате образования длинных волн синоптического масштаба. Причинами таких неперидических подъемов уровня могут быть штормовые нагоны и волны цунами. Примером негативных последствий, вызванных штормовым нагоном на побережье Вьетнама, может служить недавний тайфун Дамрей (сентябрь, 2005), причинивший не только значительный ущерб экономике Вьетнама, но и вызвавший человеческие жертвы.

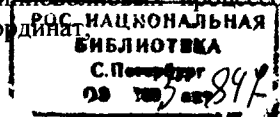
Для оценки экстремальных подъемов уровня могут быть использованы результаты наблюдений о предшествующих проявлениях этих природных явлений в прибрежной зоне. Однако такой подход не всегда является эффективным, поскольку лимитирован достаточно ограниченным объемом имеющихся экспериментальных данных. Поэтому в качестве основного инструмента получения исходной информации в процессе управления рисками возникновения катастрофических подъемов уровня следует рассматривать математическое моделирование длинноволновых процессов. Таким образом, использование результатов численного моделирования, учитывающих особенности гидродинамики длинноволновых процессов в конкретных географических регионах, в данном случае в Южно-Китайском море, будет способствовать общему научному обоснованию системы мероприятий по управлению рисками в прибрежной зоне Вьетнама.

Цель и задачи исследования.

Основной целью настоящей диссертационной работы является разработка и реализация численной гидродинамической модели с использованием сетки криволинейных координат для диагноза и прогноза колебаний уровня в прибрежной зоне Вьетнама, адаптированной к использованию в рамках геоинформационной системы, ориентированной на создание единой службы предупреждения экстремальных подъемов уровня.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Создание базы данных для расчетов;
2. Разработка гидродинамической модели для длинноволновых процессов в Южно-Китайском море в криволинейной системе координат.



3. Реализация гидродинамической модели в виде программы для расчета колебаний уровня и течений на основании двумерных гидродинамических уравнений, усредненных по глубине, а так же уравнения неразрывности;

4. Проведение расчетов колебаний уровня и течений для реальных случаев штормовых нагонов и верификация численной модели;

5. Реализация процедуры районирования побережья Вьетнама по интенсивности проявления сгонно-нагонных явлений, как примера практического использования разработанной численной модели в интересах развития системы комплексного управления прибрежной зоны Вьетнама.

Научная новизна работы

Новые результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Впервые для Южно-Китайского моря разработана и реализована с использованием ГИС технологий гидродинамическая модель длинноволновых процессов (штормовых нагонов и цунами), основанная на использовании сетки криволинейных координат;

2. Предложена и реализована процедура оптимального сглаживания криволинейных координатных линий на границе стыковки двух сеточных областей, обеспечивающая гладкость решения при переходе из одной сеточной области в другую в рамках единой композиционной криволинейной сетки;

3. Впервые предложена единая система программ оперативной океанологии с целью предупреждения экстремальных подъемов уровня, направленная на развитие системы комплексного управления прибрежной зоной Вьетнама;

4. Составлена схема районирования побережья Вьетнама по интенсивности сгонно-нагонных явлений;

5. Для наиболее опасного участка побережья Вьетнама – прибрежной зоны залива Бакбо предложена схема оперативной оценки подъемов уровня при различной интенсивности тайфуна.

Научное и практическое значение работы

Полученные в работе результаты могут служить основой для изучения проблемы наводнения в различных районах побережья Южно-Китайского моря. Результаты могут быть использованы в таких отраслях народного хозяйства как проектирование, строительство и эксплуатация морских гидротехнических сооружений, поиск и добыча нефти и других полезных ископаемых, судоходство и рыболовство, а также при создании службы предупреждения о морских стихийных бедствия в рамках общего гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства.

Апробация результатов

Результаты выполненной работы опубликованы и докладывались на Итоговой сессии Ученого совета Российского государственного гидрометеорологического университета в январе 2005 года.

На защиту выносятся

На защиту выносятся следующие положения:

1. Гидродинамическая модель длинноволновых процессов в Южно-Китайском море с использованием сетки криволинейных координат;
2. Метод построения композиционной сетки, использованной в моделировании длинноволновых процессов в Южно-Китайском море;
3. Анализ основных факторов формирования колебаний уровня в прибрежной зоне Вьетнама, вызванных морскими стихийными бедствиями (штормовыми нагонами и цунами);
4. Общая схема системы КУПЗ для прибрежной зоны Вьетнама;
5. Метод оперативной оценки подъемов уровня, вызванных тайфунами различной интенсивности, для прибрежной зоны залива Бакбо.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, содержащих обзор литературы, описание гидродинамической модели и ее реализации, результатов расчетов и их анализа, а также заключения, содержащего основные выводы, списка использованных источников из 81 наименования и трех приложений на 39 листах. Общий объем работы составляет 132 страницы, включая 104 страниц текста и формул, 38 рисунков, 6 таблиц, 2 схемы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается общая характеристика района исследования, обосновывается актуальность и цель работы, формулируются задачи, практическое значение и другие положения диссертационной работы.

В первой главе излагается общая характеристика Южно-Китайского моря, дается краткий обзор результатов исследований режима колебания уровня моря (приливы, штормовые нагоны, цунами), описываются гидрометеорологические условия района исследований.

Общая характеристика района исследования

Южно-Китайское море относится к бассейну Тихого океана. Берега Южно-Китайского моря вдоль побережья Вьетнама, в основном, достаточно высокие и крутые, характерной особенностью побережья является сложная конфигурация береговой черты. Структура рельефа дна Южно-Китайского моря является достаточно сложной и расчлененной из-за наличия в рельефе разнообразных морфометрических форм. Одновременно существуют глубоководные впадины с глубиной в нескольких тысячах метров и обширные мелководные зоны шельфа с глубиной в нескольких десятках метров.

Гидрометеорологические условия Южно-Китайского моря.

Тропические циклоны (ТЦ) принадлежат к одному из самых разрушительных природных явлений. Северо-западная часть Тихого океана – одна из самых активных областей тропического циклогенеза. В среднем ежегодно в данном

регионе зарождается около 26 ТЦ, из них примерно 6 ТЦ (около 23 % общего числа) выходят или воздействуют на шельф Вьетнама. ТЦ, выходящие на шельф Вьетнама, зарождаются над огромной акваторией Южно-Китайского и Филиппинского морей, а также над открытой частью тропической зоны Тихого океана, граничащей с Филиппинским морем. Автором приведены повторяемости различных циклонов по значению минимального давления в центре: циклоны средней интенсивности (с давлением 970 гПа) имеет повторяемость 15.3 %; циклоны с давлением в центре 950 гПа и 990 гПа имеют повторяемость соответственно 5 % и 19.4 %. Большинство циклонов (67%) проходят по траекториям, расположенным в северной части Южно-Китайского моря. Они наблюдаются в летний период и воздействуют, главным образом, на побережье залива Бакбо. Осенью и зимой тайфуны чаще наблюдаются в центральной и южной частях моря, где их количество составляет соответственно 15 %, 18 % от общего числа зарегистрированных случаев.

Режим колебаний уровня.

Колебания уровня на побережье Вьетнама определяются наличием ярко выраженных приливных колебаний, а также непериодических колебаний, связанных с штормовыми нагонами и волнами цунами.

Структура изученности режима колебаний уровня в Южно-Китайском море является довольно типичной. Приливные явления как в Южнокитайском море в целом, так и в заливе Бакбо изучены достаточно полно и широко представлены в работах вьетнамских и зарубежных специалистов. В работе Нгуен Тхи Бай предложен подход к исследованию приливного режима в заливе Бакбо, основанный на численном решении уравнений теории мелкой воды. В этой работе для реализации приливной модели впервые для данного района была использована криволинейная сетка, состоящая из 19 x 51 точек. Однако расчет был выполнен только для залива Бакбо и не охватывал остальную акваторию Южно-Китайского моря.

Несколько хуже изучены штормовые нагоны Южно-Китайского моря. В работе А. В. Савельева реализован способ получения ежечасных значений уровня моря путем обычной интерполяции данных срочных наблюдений для выделения бесприливной составляющей из суммарных колебаний уровня. Статистический анализ высоты и продолжительности нагонов позволил определить, что наибольшая часть нагонов (75 %) имеет высоту 0.2 – 0.5 м. Повторяемость высоты нагонов в диапазоне от 0.7 до 0.8 м не превышает 8 %. Теоретические основы гидродинамической модели для расчета штормовых нагонов и анализ изменчивости колебаний уровня в зависимости от различных средних траекторий движения тайфунов и его параметров приведены в работе До Нгок Кунь в 1982 г, являющейся до настоящего времени единственной работой наиболее полно отражающей исследования штормовых нагонов, вызванных прохождением тайфунов в Южно–Китайском море. В этой работе До Нгок Кунь использовал метод численного моделирования, основанный на применении прямоугольной сетки и позволяющий рассчитать величины колебаний уровня вдоль побережья Вьетнама. В результате выполненных расчетов автором этой работы выделено 4 зоны побережья Вьетнама, отличающихся величиной

штормовых нагонов.

Главной особенностью Южно-Китайских цунами является локальный характер их проявления. В настоящее время не известно ни одного события, которое охватило бы значительную часть побережья. Всего имеются данные о проявлении 62 случаев цунами в Южно-Китайском море и прилегающих районах и о 11 случаях, которые можно идентифицировать как цунами, однако, данные о положении очага землетрясения этих возможных цунами пока отсутствуют. В тоже время анализ данных наблюдений позволяет сделать вывод, что проблема возникновения цунами в Южно-Китайском море является вполне реальной. Наиболее цунамиопасными являются землетрясения, которые происходят в восточной части Южно-Китайского моря.

Во второй главе излагаются метод построения криволинейных сеток для Южно-Китайского моря, формулируется задача о моделировании длинноволновых процессов в криволинейных координатах, а также рассматривается возможность использования географических информационных систем (ГИС) при моделировании длинноволновых процессов в Южно-Китайском море.

Метод построения криволинейных сеток для Южно-Китайского моря.

Для повышения точности решения краевых задач в произвольной области $\Omega(x,y)$ с границей $\partial\Omega$, возможен переход к криволинейным координатам $\xi_1 = \xi_1(x,y), \xi_2 = \xi_2(x,y)$ согласованным с конфигурацией Ω и отображающим ее на простую область Ω^* . Исходя из сформулированных требований при реализации численной модели в криволинейных координатах автором была использован принцип построения, так называемой «композиционной» сетки. Поскольку для моря, имеющего большую протяженность и сложные очертания береговой линии, достаточно трудно построить криволинейную сетку, оптимальным образом аппроксимирующим береговую линию на всем твердом контуре, акватория моря была разделена на две подобласти. В данном случае исходя из цели работы и с учетом морфологических характеристик Южно-Китайского моря - на западную и восточную области с общей границей, проходящей с севера на юг в центральной части моря. Сетка строилась отдельно для каждой подобласти, что позволяет, в частности, получить хорошую аппроксимацию береговой линии в прибрежной зоне Вьетнама. Затем обе сетки «стыкуются» вдоль общей границы, формируя таким образом единую композиционную сетку, которая и используется при дальнейшем моделировании. Однако при «стыковке» двух сеток требуется специальная процедура сглаживания координатных линий, которая была реализована автором работы в виде специального алгоритма расчета, позволяющего оптимизировать эту процедуру. Расчет криволинейной сетки может быть реализован путем решения краевой задачи для системы эллиптических уравнений с граничными условиями, определяемыми соответствием значений декартовых координат на плоскости Ω значениям криволинейных координат на трансформированной плоскости Ω^* . Простейшим вариантом такого подхода является построение криволинейной сетки путем решения краевой задачи для уравнений Лапласа:

$$\xi_{1,x} + \xi_{1,y} = 0; \quad \xi_{2,x} + \xi_{2,y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{с граничными условиями:} \quad \xi_{1,2}|_{\partial\Omega} = \xi_{1,2}|_{\partial\Omega} \quad (2)$$

Интегрируя (1) на прямоугольной сетке в области Ω^* при заданных значениях $r_{m,n}$ в узлах контура $\partial\Omega^*$, определим координаты x, y во внутренних узлах сетки. Преимущества использования криволинейных координат должны проявляться в областях сложной конфигурации, в зонах, где решение (например, отклонение уровня) может иметь большие градиенты, в значительной степени, определяемые локальной геометрией дна и берега. В таких зонах необходимо сгущение сетки. Управление сеткой, т. е. подвижку координатных линий, ведущую к перераспределению узлов, можно осуществить, заменив (1) на уравнения Пуассона:

$$\nabla^2 \xi_1 = P(\xi_1, \xi_2); \quad \nabla^2 \xi_2 = Q(\xi_1, \xi_2) \quad (3)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа а включенные в правые части P, Q выступают как управляющие функции. Сеточные линии определяются как линии уровня, удовлетворяющие условие (4). Удобным методом построения композиционных сеток является метод Томаса – Миддлкофа, поскольку он предоставляет возможность строить управляющие функции $P(x, y), Q(x, y)$ такими, чтобы координатные линии пересекали границу под заданным углом θ . По Вольцингеру Н. Е. получим формулы для управляющих функций в общем случае на линиях $\xi_1 = const$ для P и $\xi_2 = const$ для Q :

$$\begin{aligned} P &= -2(\sin \theta)_{\xi_1} / \sin \theta - \\ &- \left[(x_{\xi_1} - y_{\xi_1} \operatorname{ctg} \theta) x_{\xi_1 \xi_1} + (y_{\xi_1} + x_{\xi_1} \operatorname{ctg} \theta) y_{\xi_1 \xi_1} \right] / g_{11} \\ Q &= -2(\sin \theta)_{\xi_2} / \sin \theta - \\ &- \left[(x_{\xi_2} - y_{\xi_2} \operatorname{ctg} \theta) x_{\xi_2 \xi_2} + (y_{\xi_2} + x_{\xi_2} \operatorname{ctg} \theta) y_{\xi_2 \xi_2} \right] / g_{22} \end{aligned} \quad (4)$$

Для генерирования сетки рассмотрим краевую задачу для системы двух квазилинейных эллиптических уравнений (5) в области Ω^* с граничными условиями на контуре $\partial\Omega^*$.

$$L(r) = g_{22} r_{\xi_1 \xi_1} - 2g_{12} r_{\xi_1 \xi_2} + g_{11} r_{\xi_2 \xi_2} = -J^2 (Pr_{\xi_1} + Qr_{\xi_2}), \quad (5)$$

$$J = g_{11} g_{22} - g_{12}^2 > 0 \text{ – якобиан.}$$

где: L – векторное уравнение;

$$r = xi + yj; \quad g_{11} = x_{\xi_1}^2 + y_{\xi_1}^2 = |r_{\xi_1}|^2; \quad g_{22} = x_{\xi_2}^2 + y_{\xi_2}^2 = |r_{\xi_2}|^2;$$

$$g_{12} = g_{21} = x_{\xi_1} x_{\xi_2} + y_{\xi_1} y_{\xi_2} = r_{\xi_1} r_{\xi_2}$$

Уравнение (5) решается методом последовательной релаксации для нахождения r , т.е. значений декартовых координат x, y в каждой точке композиционной криволинейной сетки.

С использованием этого метода была построена композиционная сетка для Южно-Китайского моря, представленная на рисунке 1. В данном случае, как уже отмечалось, расчетная область предварительно была разбита на две подобласти, для которых были рассчитаны криволинейные сетки, имеющие общую границу.

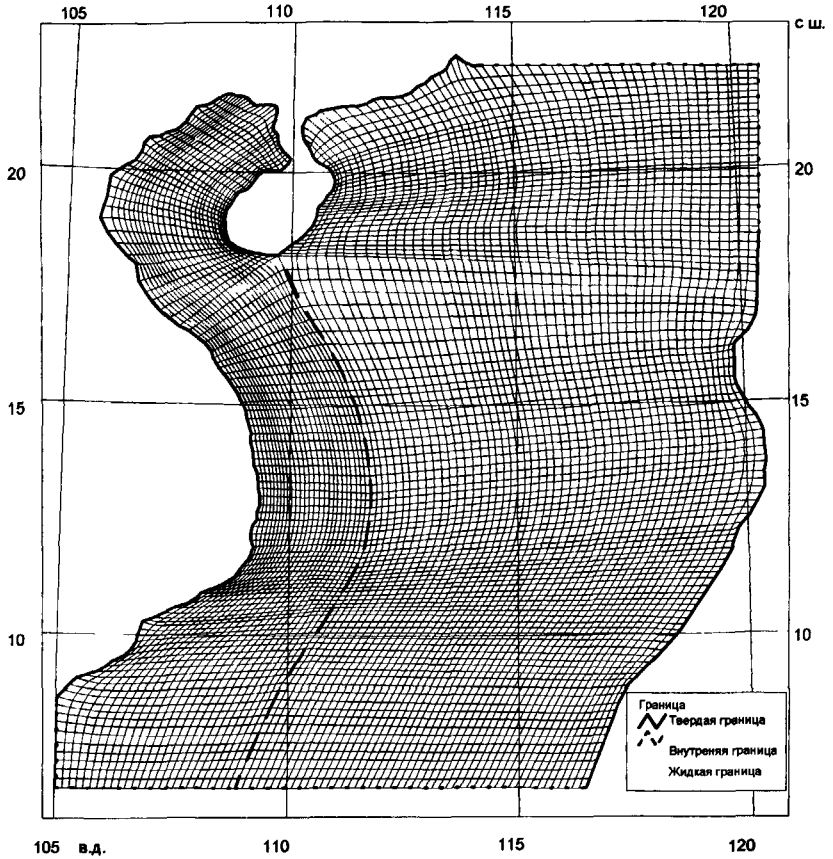


Рисунок 1 – Вид композиционной сетки, построенной для численного моделирования длинноволновых процессов в Южно-Китайском море

Основные уравнения гидродинамики, уравнения теории мелкой воды.

Для моделирования длинноволновых процессов в Южно-Китайском море в качестве уравнений гидродинамической модели используется система уравнений теории мелкой воды и уравнения неразрывности, имеющая вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - lv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{\tau_a^x}{\rho H} - \frac{\tau_b^x}{\rho H}; \end{aligned} \right.$$

(6)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + lu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{\tau_a^y}{\rho H} - \frac{\tau_b^y}{\rho H}; \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0. \end{aligned} \right.$$

где: $u = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(z) dz$; $v = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(z) dz$ – горизонтальные компоненты скорости;

$$H = h + \zeta;$$

ζ – отклонение уровня воды;

h – глубина моря;

g – свободное ускорение падения;

ρ – плотность воды;

$l = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса;

ω – угловая скорость вращения земли;

φ – широта;

p_a – давление воздуха на уровне моря;

τ_a^x, τ_a^y – касательные напряжения ветра на поверхности;

τ_b^x, τ_b^y – касательные напряжения трения на дне.

Расчет составляющих касательного напряжения ветра проводился с использованием формул (7):

$$\tau_a^x = c \rho_a w_x |w|; \tau_a^y = c \rho_a w_y |w| \quad (7)$$

где $c = (1.1 + 0.04w) \cdot 10^{-3}$ – коэффициент сопротивления;

ρ_a – плотность воздуха;

w – вектор скорости приводного ветра.

w_x, w_y – составляющие скорости ветра по соответственным осям.

Для определения касательного напряжения на дне использовался квадратичный закон трения в виде (8):

$$\tau_b^x = r \rho u \sqrt{u^2 + v^2}; \tau_b^y = r \rho v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

где r – коэффициент трения.

Граничные условия на границах области расчета:

- на твердой границе задается условие непротекания, в виде: $u=v=0$

- на жидком контуре используется условие полного излучения, в виде:

$$u, v = \pm \zeta \frac{\sqrt{g(h + \zeta)}}{H} = \pm \zeta \sqrt{\frac{g}{H}} \quad (9)$$

Таким образом, формулы (7, 8, 9) полностью замыкают систему уравнений (6).

Математическая постановка задачи моделирования длинноволновых процессов в криволинейных координатах.

Уравнение неразрывности в криволинейных координатах:

$$JH_\tau + p_{\xi_1} + q_{\xi_2} = 0 \quad (10)$$

Уравнения движения в криволинейных координатах:

$$\begin{cases} p_\tau + \gamma \zeta_{\xi_1} - \beta \zeta_{\xi_2} = \psi_1 \\ q_\tau + \alpha \zeta_{\xi_2} - \beta \zeta_{\xi_1} = \psi_2 \\ J \zeta_\tau + p_{\xi_1} + q_{\xi_2} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

где $\gamma = gHJ^{-1}g_{22}$; $\alpha = gHJ^{-1}g_{11}$; $\beta = gHJ^{-1}g_{12}$.

Правая часть уравнений движения (ψ_1, ψ_2) представляет собой сумму слагаемых, определяющих соответственно влияние : адвекции, градиента давления, силы Кориолиса, касательного напряжения ветра и придонного трения.

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{\text{adv1}} + \psi_{p1} + \psi_{k1} + \psi_{w1} + \psi_{T1} \\ \psi_2 = \psi_{\text{adv2}} + \psi_{p2} + \psi_{k2} + \psi_{w2} + \psi_{T2} \end{cases} \quad (12)$$

С учетом правил дифференцирования, для расчета указанных слагаемых в криволинейных координатах, получаем следующие выражения:

$$\begin{cases} \psi_{\text{adv1}} = -\left[(pU)_{\xi_1} + (pV)_{\xi_2} + J^{-1}H^{-1}(p^2\Gamma_{11}^1 + 2pq\Gamma_{12}^1 + q^2\Gamma_{22}^1) \right] \\ \psi_{\text{adv2}} = -\left[(qU)_{\xi_1} + (qV)_{\xi_2} + J^{-1}H^{-1}(p^2\Gamma_{11}^2 + 2pq\Gamma_{12}^2 + q^2\Gamma_{22}^2) \right] \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \psi_{p1} = -\frac{1}{\rho}HJ^{-1}\left(g_{22}\frac{\partial p_a}{\partial \xi_1} - g_{12}\frac{\partial p_a}{\partial \xi_2} \right) \\ \psi_{p2} = -\frac{1}{\rho}HJ^{-1}\left(g_{11}\frac{\partial p_a}{\partial \xi_2} - g_{12}\frac{\partial p_a}{\partial \xi_1} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \psi_{k1} = fJ^{-1}(g_{12}p + g_{22}q) \\ \psi_{k2} = -fJ^{-1}(g_{11}p + g_{12}q) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \psi_{w1} = \frac{1}{\rho}(\tau^x y_{\xi_2} - \tau^y x_{\xi_2}) \\ \psi_{w2} = \frac{1}{\rho}(-\tau^x y_{\xi_1} + \tau^y x_{\xi_1}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \psi_{T1} = -J^{-1}\frac{r}{H^2}p\sqrt{g_{11}p^2 + 2g_{12}pq + g_{22}q^2} \\ \psi_{T2} = -J^{-1}\frac{r}{H^2}q\sqrt{g_{11}p^2 + 2g_{12}pq + g_{22}q^2} \end{cases} \quad (17)$$

При переходе к ковариантной метрике уравнения в форме (11) оказываются удобными для численного интегрирования.

В третьей главе представлены численная реализация гидродинамической модели с использованием сетки криволинейных координат.

Переход к криволинейным координатам, отвечающим конфигурации области, не меняет тип уравнений. Для интегрирования системы уравнений мелкой воды (11) в вычислительном прямоугольнике Ω^* , на который отображается произвольная область $\Omega(x, y)$, использовалась полунявная схема расчета, при которой градиенты уровня аппроксимируются неявно, а слагаемые, характеризующие адвекцию – явно. Численная реализация этого метода сводится к трехточечной прогонке для одной из переменных на каждом временном промежутке и определению двух других переменных по явным формулам на разнесенной сетке.

Система (11) интегрируется методом переменных направлений на разнесенной

сетке (рисунок 2). На первом полушаге вычисляются:

$$p^{k+\frac{1}{2}} \Rightarrow \zeta^{k+\frac{1}{2}} \Rightarrow q^{k+\frac{1}{2}}, \text{ а на втором: } q^{k+1} \Rightarrow \zeta^{k+1} \Rightarrow p^{k+1},$$

при этом адвективные члены в (11) $\psi_{\text{адв1}}$ и $\psi_{\text{адв2}}$ аппроксимируются явно и берутся с нижнего слоя по времени, а градиент уровня – с верхнего. Общая схема расчета представлена на рисунке 3.

Реализация полунявной схемы сводится в этом случае к обращению трехдиагональных матриц методом прогонки с учетом условий на границах:

$$p, q = 0 \text{ на твердой и } p = \frac{JHu - q' x_{\xi_2}}{x_{\xi_1}} \text{ и } q = \frac{JHv - p' y_{\xi_1}}{y_{\xi_2}} \text{ на жидкой границах.}$$

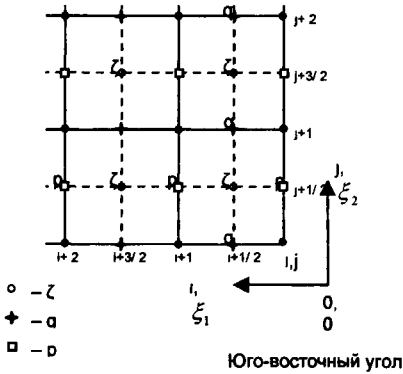


Рисунок 2 – Общий вид расчетной сетки, используемой при моделировании штормовых нагонов в Южно-Китайском море

Условие устойчивости: Ограничение на устойчивость, возникающее при достаточно больших значениях числа Куранта $Cr = \chi \sqrt{gH}$ связаны с явной формой аппроксимации членов, входящих в правую часть ψ^* . Однако во многих случаях ограничение на

допустимые значения Cr может диктоваться не столько соображениями устойчивости схемы, сколько требованием невыхода задачи за критический режим самого движения, что определяется выражениями (18), (19):

$$p \leq CH \sqrt{g_{22}}; \quad q \leq CH \sqrt{g_{11}} \text{ где } C = \sqrt{gH} \quad (18)$$

$$\text{для шага по времени } \Delta t < \frac{\min JH}{\Omega^* p + q} \quad (19)$$

Схема с центральными разностями не диссипативна. Поскольку решение требует сглаживания для предупреждения высокочастотных осцилляций, в правую часть уравнений должен быть включен оператор сглаживания

$$\nabla_{\xi_1 \xi_2}^2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial \xi_2^2}. \text{ В нашем случае предлагается сглаживание } p, q \text{ после}$$

$$\text{каждого полушага: } p = p' + \varepsilon \cdot \nabla_{\xi_1 \xi_2}^2 p'; \quad q = q' + \varepsilon \cdot \nabla_{\xi_1 \xi_2}^2 q', \quad (20)$$

где ε – коэффициент сглаживания принимается равным 0.1.

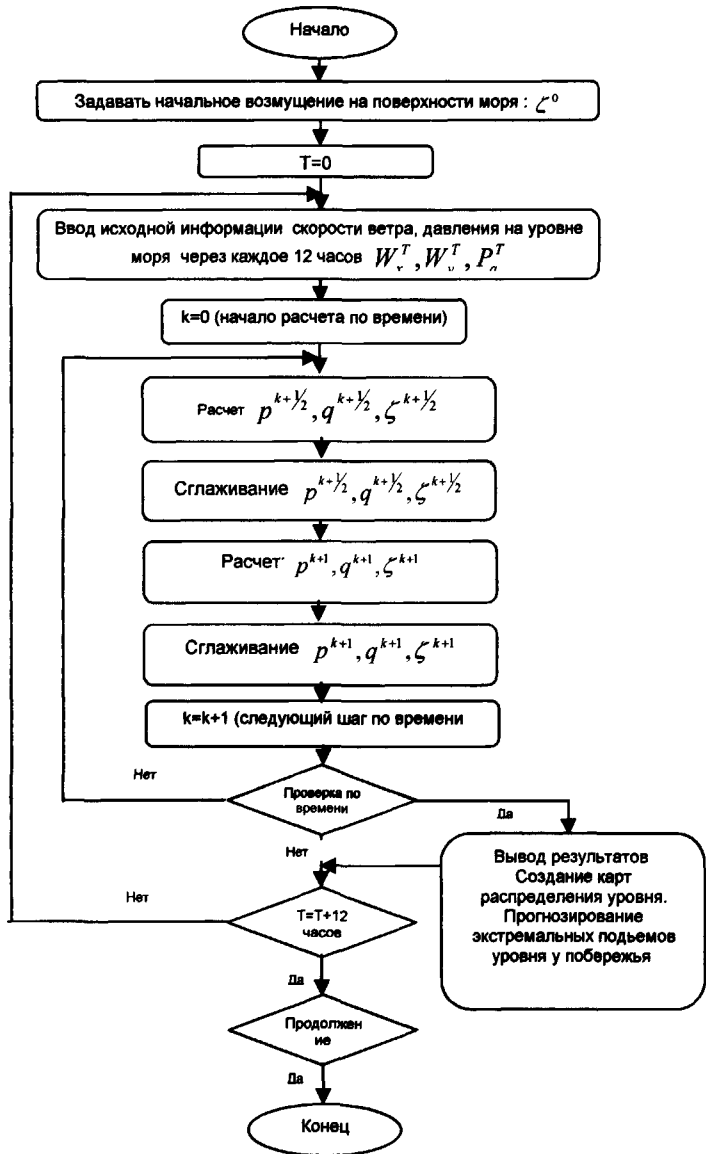


Рисунок 3 – Общая схема расчета

В четвертой главе приводятся результаты гидродинамического моделирования. С использованием разработанной численной модели длинноволновых процессов применительно к условиям Южно-Китайского моря был выполнен ряд численных экспериментов, моделирующих условия распространения свободных и вынужденных волн. В задачи этих численных экспериментов входили:

- верификация численной модели на основе выполнения модельных численных экспериментов и сопоставления результатов расчета с аналитическими решениям;
- изучение на примере свободных волн, влияния особенностей морфометрии дна на формирование длинноволновых колебаний в Южно-Китайском море;
- проверка численной модели путем сравнения результатов, полученных в результате моделирования реального случая штормового нагона в Южно-Китайском море, с данными наблюдений;
- оценка эффективности использования криволинейных координат для моделирования длинноволновых процессов, путем сравнения результатов, полученных с использованием разработанной криволинейной модели и модели с прямоугольной сеткой (До Нгок Кунь) на примере тайфуна Винии;
- получение расчетных данных для построения обобщенной схемы районирования побережья Вьетнама по интенсивности проявления сгонно-нагонных явлений, связанных с прохождением тайфунов.

В первой параграфе рассмотрены результаты моделирования свободных волн. Для проверки вычислительной схемы, использующей криволинейную сетку координат был выполнен численный расчет для модельного бассейна, имеющего криволинейные (реальные) очертания береговой черты и дно с постоянной глубиной, равной 3000 м. Шаг по времени с учетом величины пространственного шага и ограничения (19) принимался равным 180 с. Расчет выполнялся на 3 часа физического времени распространения волны. Коэффициент трения τ принимался равным 0.0026; коэффициент сглаживания $\varepsilon=0.1$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что численная модель правильно воспроизводит основные физические механизмы формирования длинноволновых процессов, а основные характеристики распространения волны соответствуют теоретическим представлениям.

Затем модель с начальными условиями для образования свободной волны была использована для анализа особенностей условий распространения волны за счет влияния морфометрии. С этой целью была выполнена серия из трех численных экспериментов, отличающихся положением начального возмущения. Очаги возмущения в виде положительной денивеляции уровня располагались в зонах с различными типами морфометрии дна: в глубоководной зоне, на бровке шельфа и мелководье. С практической точки зрения такая постановка близка к задаче моделирования волн цунами. Выполненные численные эксперименты показали, что рельеф дна играет важную роль в процессе распространения длинных волн. В частности, было показано, что особенности рельефа дна при определенных условиях распространения (т.е. в зависимости от положения очага) могут привести к формированию вдольбереговых потоков, частичному захвату волновой энергии, рефракционному развороту и другим эффектам, связанным с

трансформацией волнового поля. По результатам анализа полей уровня отмечены районы с возможным проявлением резонансных свойств шельфа. Отмеченные особенности трансформации волнового поля, связанные с влиянием особенностей рельефа дна Южно-Китайского моря, следует учитывать при анализе условий формирования длинноволновых колебаний уровня любого происхождения, включая штормовые нагоны.

Во втором параграфе рассмотрены результаты моделирования реальных случаев штормовых нагонов. Для выполнения численных расчетов, были выбраны четыре случая штормовых нагонов, связанных с прохождением циклонов по наиболее типичным для Южно-Китайского моря траекториям. При этом для трех случаев нагонов использовались фактические поля атмосферного давления и скорости ветра с дискретностью 12 часов, представленные в виде GRIB файлов, которые использовались в модели для задания значений градиента атмосферного давления и расчета касательного напряжения ветра. В качестве четвертого варианта прохождения циклона, использовались данные, соответствующие тайфуну Винни, параметризованные в работе До Нгок Куна, в виде концентрической области понижения атмосферного давления, перемещающейся с заданной скоростью. Для оценки достоверности полученных результатов было проведено сопоставление расчетных данных с данными наблюдений на станции Хонзау (залив Бакбо). Сравнение расчетных и фактических данных показывает хорошее совпадение результатов. Коэффициент корреляции между двумя рядами, т.е. рассчитанными и фактическими данными составил 0.967, средне-квадратичная ошибка составляет 19 см. Далее, автором был рассмотрен методический вопрос, связанный с сопоставлением результатов, полученных с использованием различных подходов к построению расчетной сетки. С этой целью были сопоставлены данные расчетов, представленные в упоминавшейся работе До Нгок Куна с результатами, полученными автором для той же параметрической модели циклона, но с использованием при расчете сетки криволинейных координат. Сравнение, выполненное на примере двух карт пространственного распределения уровня иллюстрирует хорошее качественное совпадение структуры волновых полей, положение зон с максимальными подъемами уровня, знака денивиляции уровня. Качественное совпадение результатов подтверждается и более обширным сопоставлением результатов моделирования, выполненного До Нгок Куном и автором диссертационной работы, например, по моментам достижения максимальных подъемов уровня в заливе Бакбо. Однако сравнение абсолютных величин показывает, что в значениях подъемов уровня возникает различие, которое может достигать 50 %, причем результаты расчетов на прямоугольной сетке всегда характеризуются большими значениями подъемов уровня по сравнению с расчетом на криволинейной сетке. По мнению автора такая закономерность имеет физическое обоснование, связанное с тем, что аппроксимация береговой черты отрезками прямоугольной сетки (в виде ломаной линии) фактически препятствует формированию вдольбереговых потоков, что в конечном итоге, и приводит к «завышению» подъемов уровня в полузамкнутом заливе Бакбо при расчете на прямоугольной сетке. Результаты режимных наблюдений над уровнем

подтверждают этот вывод. Так для пункта Хонзау (залив Бакбо) данные расчета по прямоугольной сетке дают максимальную величину подъема уровня превышающую 1 м, данные расчет по криволинейной сетке – 0.5 м. Как уже отмечалось статистический анализ режимных характеристик, выполненный Савельевым по данным наблюдений для этого пункта, показал, что наибольшая часть нагонов (75 %) в этом районе имеет высоту 0.2 – 0.5 м, а нагоны превышающие 0.7 – 0.8 м встречаются только в 8% случаев. Таким образом, учитывая, что тайфун Винни не является примером катастрофического урагана, можно сделать вывод о том, что расчет с использованием криволинейной сетки дает более реалистичный результат, что свидетельствует о преимуществах использования метода криволинейных сеток и подтверждает адекватность разработанной численной модели. Обобщение результатов моделирования реальных ситуаций прохождения циклона по различным траекториям, анализ мареограмм колебаний уровня в 11 точках, расположенных вдоль вьетнамского побережья, позволили выделить наиболее опасные траектории распространения тайфунов а также участки побережья, характеризующиеся для соответствующей синооптической ситуации, сгонными или нагонными явлениями.

В третьей параграфе в качестве примера рассмотрена возможность использования разработанной численной модели применительно к некоторым задачам комплексного управления прибрежной зоной. Автором предложена схема районирования прибрежной зоны Вьетнама по интенсивности сгонно-нагонных явлений. Для районирования по величине нагона при построении схемы было использовано 4 градаций: слабый нагон (до 20 см), средний нагон (до 40 см), значительный нагон (до 80 см) и экстремальный нагон (до 180 см). Для характеристик сгона, имеющих меньшие (по сравнению с нагонами) значения денивеляции уровня, использовались 4 градации: отсутствие сгона, слабый, средний и экстремальный сгон. Полученные картосхемы носят режимный характер, поскольку объединяют варианты прохождения циклонов по различным типам траекторий и соответствуют прохождению циклона средней интенсивности (с давлением в центре, равным 970 гПа и повторяемостью 50 %) Однако они могут быть использованы для оценки степени риска негативных воздействий, связанных к экстремальным подъемам уровня. Как показали расчеты, наиболее опасным с точки зрения появления больших нагонов является движение циклона по траектории, направленной к северу залива Бакбо. Для этой наиболее опасной траектории тайфуна с использованием гидродинамической модели и параметрической модели циклона были выполнены дополнительные расчеты моделирующие прохождение тайфунов с различной интенсивностью. При расчетах задавались модельные циклоны со значениями атмосферного давления в центре, равными соответственно 950 гПа и 990 гПа. Поскольку, как было показано ранее, наиболее опасным с точки зрения возможности появления больших нагонов является побережье залива Бакбо, Для пяти пунктов (пункты П1-П5) побережья залива Бакбо, являющегося зоной наибольшего проявления сгонно-нагонных явлений, с использованием результатов расчетов были определены коэффициенты усиления нагона за счет увеличения интенсивности тайфуна. Коэффициент усиления определялся как отношение величины нагона

при тайфуне данной интенсивности к величине нагона при тайфуне, принятого в качестве стандартного. Результаты расчета представлены на рисунке 4. На вертикальной оси представленного на рисунке графика показаны относительные максимальные подъемы уровня в различных пунктах залива Бакбо, а на горизонтальной - относительное давление в центре циклона. В качестве стандартного тайфуна был принят циклон, имеющий давление в центре, равное 970 гПа. Расчет проводился для наиболее опасной траектории прохождения тайфуна. Автором диссертационной работы была, также, предложена аналитическая формула для определения коэффициента усиления в зависимости от относительного давления, которая имеет вид:

$$\frac{A_f}{A_s} = \exp \left[k \left(1 - \frac{P_f}{P_s} \right) \right] \quad (20)$$

В качестве стандартного значения давления использована величина 970 гПа. С учетом результатов расчетов коэффициент k принимает значение 29.7, 20.7, 17.5, 14.5, 10.5 для пунктов с П1 по П5 соответственно.

Как было показано по результатам моделирования, наибольшие подъемы уровня могут наблюдаться в северной части залива Бакбо, Однако, в контексте КУПЗ степень риска будет определяться еще такими дополнительными факторами, как плотность населения, морфометрические характеристики берега и другие. С учетом такого комплексного подхода, в качестве зоны наибольшего риска негативных последствий экстремальных подъемов уровня следует отнести южную часть прибрежной зоны залива Бакбо, характеризующуюся пологим профилем береговой зоны и высокой плотностью населения.

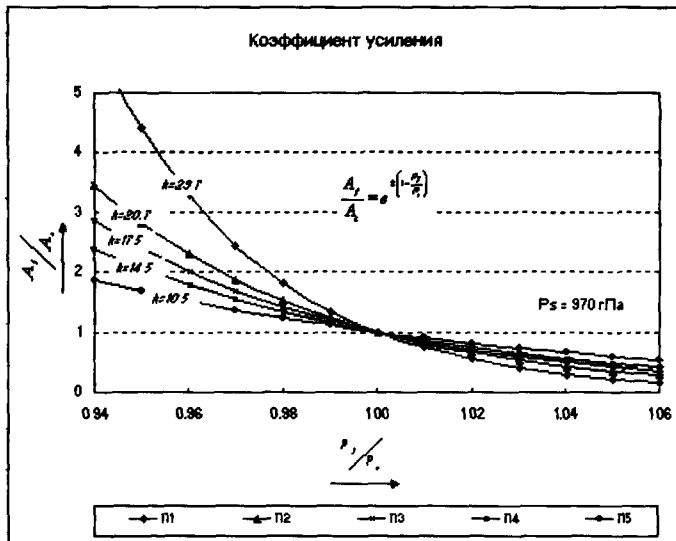


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления от величины относительного давления в центре тайфуна

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации.

Основные выводы и результаты заключаются в следующем:

1. Разработанная численная модель, основанная на использовании сетки криволинейных координат, правильно воспроизводит процесс формирования длинноволновых колебаний уровня в Южно-Китайском море. Выполнение модельных расчетов, расчетов, связанных с моделированием реальных случаев прохождения тайфуна, сравнение результатов расчетов с теоретическими оценками, данными наблюдений, результатами, полученными с использованием других моделей, физическая интерпретация результатов моделирования подтверждают возможность использования численной модели для анализа и прогноза длинноволновых колебаний уровня в прибрежной зоне Вьетнама.

2. Использование построенной для всей акватории Южно-Китайского моря композиционной криволинейной сетки дает возможность повышения точности численного решения уравнений гидродинамической модели. При этом реализованный в оболочке ГИС общий метод построения криволинейной расчетной сетки может быть использован в дальнейшем для развития гидродинамических методов расчета океанологических процессов не только в Южно-Китайском море, но и применительно к другим районам Мирового океана.

3. По результатам выполненных расчетов выполнен анализ условий формирования длинноволновых колебаний уровня с учетом реальной морфометрии Южно-Китайского моря, построены схемы районирования прибрежной зоны Вьетнама по величине штормовых нагонов и сгонов, предложен метод оперативной оценки величины штормового нагона, связанного с прохождением тайфунов различной интенсивности для наиболее опасного участка побережья Вьетнама – залива Бакбо.

4. С учетом результатов гидродинамического моделирования и анализа климатических траекторий прохождения тайфунов в Южно-Китайском море, на побережье Вьетнама выделена зона наибольшего риска, связанного с повышением уровня, сделан ряд рекомендаций по управлению рисками в контексте развития системы комплексного управления прибрежной зоной Вьетнама.

5. В общем виде рассмотрена структура и состав мероприятий, направленных на развитие системы комплексного управления прибрежной зоной Вьетнама.

6. Разработанная гидродинамическая модель может быть внедрена в оперативную службу гидрометеорологического обеспечения Вьетнама.

Благодарности:

Работа, результаты которой представлены в диссертации, проводилась с помощью коллег в Российском государственном гидрометеорологическом университете. Автор выражает сердечную признательность и благодарность научному руководителю Н. Л. Плинку, коллективам кафедры КУПЗ РГГМУ.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Плинк Н. Л., Кашарский М. В., Нгуен Хонг Лан. Методология учета колебаний уровня при комплексном управлении прибрежными зонами. // Колебание уровня в морях. – Спб.: РГГМУ, 2003. – С. 5 –20.
2. Нгуен Хонг Лан, Плинк Н. Л. Использование численной модели в криволинейных координатах для моделирования штормовых нагонов в Южно-Китайском море. // Итоговая сессия Ученого Совета РГГМУ, 25 – 26 января 2005 г. – Тезисы докладов. – Спб.: РГГМУ, 2005. – С. 110 – 111.
3. Нгуен Хонг Лан, Плинк Н. Л. Численная модель для расчета штормовых нагонов и цунами в Южно-Китайском море с использованием системы криволинейных координат // Труды РГГМУ. – Спб.: РГГМУ (в печати).

АВТОРЕФЕРАТ

Нгуен Хонг Лан



ЛР № 065394 от 08.09.97

Подписано в печать 20.10.2005. Формат 60×90 1/16
Ул. печ. л. 1.2. Тираж 100 экз. Заказ № 2211

Отпечатано в издательстве «

№ 21107

РНБ Русский фонд

2006-4

18993