

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ

№ 1
2014
ISSN: 2072-9952

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Крапухин В.Б., Кулемин В.В., Красавина Е.П., Лавриков В.А., Кулюхин С.А., Велешко И.Е., Велешко А.Н.

Использование камнелитых контейнеров для хранения остеклованных радиоактивных отходов 4

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Солдатов В.Ю., Крапивин В.Ф.

Алгоритм классификации фазовых состояний системы «океан–атмосфера» на основе последовательного анализа Вальда 12

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Тюгин Д.Ю., Наумов А.А., Куркина О.Е., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н.

Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами 20

Барановский А.В., Бодрова И.В., Иванов Е.С.

Математическое моделирование ожидаемой продолжительности жизни в рязанской популяции сизого голубя 29

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНОЕ СЫРЬЕ

Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З.

К вопросу об экономической и экологической целесообразности использования отходов углеобогащения углистых аргиллитов в производстве теплоизоляционных материалов на основе межсланцевой глины 35

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Шакирова В.В., Садомцева О.С., Елина В.В., Садомцев А.Ю., Цаплин Д.Е.

Исследование процессов сорбции фенолов на различных сорбентах 43

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Чечнева Е.С.

Метод расчета пылевой нагрузки на атмосферу и почвенный покров территории с учетом длительности существования пыли в атмосфере 49

Правила публикации 56

Учредитель и издатель:

ООО Издательство «Научтехлитиздат»

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1132
Подписной индекс ОАО «Роспечать» 79218
Подписной индекс «Пресса России» 27866

Главный редактор д-р техн. наук, проф. Т.Г. САМХАРАДЗЕ

Редакция:

Сердюк В.С., Боброва Е.А.,
Краснова Л.М., Паляева Ю.С.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Аксенов Ю.П., д-р техн. наук
Гавардашвили Г.В., д-р техн. наук, проф.
Галченко Ю.П., д-р техн. наук
Голубятников И.В., д-р техн. наук, проф.
Гузайров М.И., д-р техн. наук, проф.
Галиев А.Л., д-р техн. наук, проф.
Гуляев Ю.В., акад. РАН
Ицхак Д., д-р философии, проф., Израиль
Карась В.И., д-р физ.-мат. наук, Украина
Лаверов Н.П., акад. РАН
Лошак Ж., д-р физики, президент Фонда Луи де Бройля, член Парижской АН, Франция
Матвеев В.А., д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники РФ
Михайлов Ю.Б., д-р техн. наук, проф.
Мовсун-заде Э.М., д-р хим. наук, Азербайджан
Натишвили О.Г., д-р техн. наук, акад. Национальной АН Грузии
Проходская В.Ю., канд. биол. наук.
Проходский Ю.М., д-р техн. наук
Романов А.А., д-р техн. наук
Рыбин В.М., д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники РФ
Самхарадзе Т.Г., д-р техн. наук, проф.
Тагасов В.И., д-р техн. наук, проф.
Трубецкой К.Н., акад. РАН
Федик И.И., чл.-корр. РАН
Филенко О.Ф., д-р биол. наук.
Харгиттай И., д-р философии, член Национальной АН Венгрии
Чебышов С.Б., д-р техн. наук, проф.
Щербаков Н.С., д-р техн. наук., проф., заслуженный деятель науки РФ

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

Публикация статей бесплатная. Правом внеочередной публикации пользуются аспиранты и докторанты.

Материалы, опубликованные в настоящем журнале, не могут быть полностью или частично воспроизведены, тиражированы и распространены без письменного разрешения редакции.

При перепечатке отдельных частей статей ссылка обязательна.

Подписано в печать 17.12.13.

Формат 60×88 1/8. Бумага кн.-журн. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 14,3. Усл. кр.-отг. 32,1. Уч.-изд. л. 19,2. Зак. 444. Тираж 2 700 экз.

✉ Адрес редакции:

107258, Москва, Алымов пер., д. 17, стр. 2.

☎ Тел.: 8 (499) 168-04-95,

факс: 8 (499) 168-23-58. Бухгалтерия: 8 (499) 168-24-28.

✉ E-mail: esip_99@mail.ru

<http://www.tgizd.ru>

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены

ООО Издательство «Научтехлитиздат»

Отпечатано в ООО Издательство «Научтехлитиздат».

107258, Москва, Алымов пер., д. 17, стр. 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Д.Ю. Тюгин

канд. физ.-мат.

А.А. Наумов

студент

(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)

О.Е. Куркина

канд. физ.-мат. наук, доцент

(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)

(Национальный исследовательский университет Высшая
школа экономики)

А.А. Куркин

доктор физ.-мат. наук, профессор

E-mail: aakurkin@gmail.com

(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)

Е.Н. Пелиновский

доктор физ.-мат. наук, профессор

(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)

(Институт прикладной физики РАН)

г. Нижний Новгород, Российская Федерация

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПРИДОННОМ СЛОЕ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ АНОМАЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ

Моделирование аномально больших внутренних волн, генерируемых бароклинным приливом, в настоящее время достаточно актуально вследствие возросшего количества морских платформ, установленных на шельфовых месторождениях нефти и газа. Высоты внутренних волн во многих районах Мирового океана могут достигать 100 м, и такие волны становятся действительно опасными. Все это указывает на необходимость исследования возможных динамических и катастрофических явлений, сопровождающих распространение внутренних волн большой амплитуды. В вычислительном плане анализ нестационарных волновых движений является весьма сложной задачей. Сейчас разработан и получил широкое применение численный код MIT, решающий полные уравнения гидродинамики с учетом реального рельефа дна, вращения Земли и турбулентных процессов. Однако данная модель требует больших компьютерных ресурсов, оправданных для решения ряда практических задач океанологии. Тем не менее, даже такие полные модели пока еще не учитывают существующей на практике относительно стабильной фоновой горизонтально-неоднородной стратификации, которая характерна для реальных океанских условий. Именно поэтому в научных исследованиях и анализе новых явлений широко применяются асимптотические модели, основанные на уравнении Кортевега де Вриза и его обобщениях. В работе применяются асимптотические модели для анализа двух наиболее важных эффектов в придонном слое, индуцированных внутренними волнами: изменения давления на дно и транспорта донных осадков. Перемещение донных осадков и размывы дна около опор хорошо известны для штормовых волн в прибрежной зоне. Специфика внутренних волн заключается в их большей длине (несколько километров), так что такие волны всегда «достают» до дна даже далеко от берега и могут приводить к размывам опор нефтяных платформ в глубоководных районах. Особо опасны аномально большие волны, поскольку характеристики размывов пропорциональны кубу амплитуды внутренней волны. В нашей стране пока еще эффекты внутренних волн на устойчивость морских сооружений не регламентируются. Здесь необходима активная проработка этой проблемы в теоретическом плане и накопление данных об опасных внутренних волнах в районах, где стоят нефтяные и газовые платформы.

Ключевые слова: внутренние волны; придонный слой; бароклинный прилив; неоднородная стратификация; уравнение Кортевега де Вриза.

DYNAMIC EFFECTS IN THE BOTTOM LAYER INDUCED BY ABNORMAL INTERNAL WAVES

D.Y. Tyugin

Cand. of Phys.-Math. Sciences

A.A. Naumov

Student

(Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev)

O.E. Kurkina

Cand. of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor

(Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev)

(Higher School of Economics National Research University

Nizhny Novgorod)

A.A. Kurkin

Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor

E-mail: aakurkin@gmail.com

(Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev)

E.N. Pelinovsky

Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor

(Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev)

(Institute of Applied Physics)

Nizhny Novgorod, Russian Federation

Simulation of abnormally large internal waves generated by the baroclinic tide is now quite important due to the increased number of offshore platforms installed on offshore oil and gas fields. The height of the internal waves in many areas of the oceans can be up to 100 m, and these waves become really dangerous. All of this points to the need to study the possible dynamic and catastrophic phenomena accompanying the propagation of internal waves of large amplitude. In terms of the computational analysis of transient wave motion is a very complex task. There was designed widely used numerical code MIT, decisive full hydrodynamic equations with the real bottom topography, the Earth's rotation and turbulent processes. However, this model requires a lot of computing resources, a number of viable solutions to the practical problems of Oceanology. However, even such a complete model is not yet take into account the current practice relatively stable background horizontal-nonuniform stratification, which is typical for the real ocean conditions. That is why the research and analysis of new phenomena is widely used asymptotic model based on the Korteweg-de-Vries equation and its generalizations. In this paper we use the asymptotic model for the analysis of the two most important effects in the bottom layer, induced by internal waves: the change in pressure at the bottom and sediment transport. Moving the sediment and erosion of the bottom near the supports are well known to storm surges in the coastal zone. The specifics of the internal waves is their greater length (a few kilometers), so that such waves are always «get» to the bottom, even far from the coast and can lead to erosion of supports oil platforms in deep water. Particularly dangerous abnormally large waves, since the characteristics of erosion is proportional to the cube of the amplitude of the internal wave. In our country, yet the effects of internal waves on the stability of marine structures are not regulated. What is needed is an active study of this problem in theoretical terms, and the accumulation of data on the hazards of internal waves in areas where there are oil and gas platforms.

Keywords: internal waves; bottom layer; baroclinic tide; nonuniform stratification; Korteweg-de-Vries equation.

Моделирование аномально больших внутренних волн, генерируемых бароклинным приливом, в настоящее время достаточно актуально вследствие возросшего количества морских платформ, установленных на шельфовых месторождениях нефти и газа. Можно отметить некоторые случаи повреждения этих платформ внутренними волнами большой амплитуды в Андаманском море, когда одна из опор платформы в октябре 1997 г. была изогнута сдвиговым течением во внутренней волне (рис. 1, взятый из работы [1]). Для Южно-Китайского моря, как богатого нефтью района, проделаны сравнительные оценки воздействия на платформы внутренних и поверхностных ветровых волн [2]. Показано, что нагрузки от внутренних волн, действующие на подводные части платформы в вертикальном направлении в 30 раз превосходят нагрузки от ветровых волн. Действие внутренних волн также может приводить к мощному транспорту наносов и размывам дна, особенно в глубоководных районах, где влияние

ветровых, в том числе штормовых волн, пренебрежимо мало. Все это привело к осознанию необходимости построения систем оповещения об аномально больших внутренних волнах в океане типа службы цунами в Тихом океане. Прототип такой системы оповещения о приближении опасных внутренних волн в Андаманском море, основанный на измерении донного давления, уже разработан [3]. Эта система, получившая название системы раннего обнаружения солитонов (Soliton Early Warning System), находится в опытной эксплуатации в Андаманском море с ноября 2008 г. По-существу, система работает по тому же принципу, что и служба цунами, регистрируя вариации гидростатического давления в длинных волнах на морском дне.

Высоты внутренних волн во многих районах Мирового океана могут достигать 100 м [4], и такие волны становятся действительно опасными. Все это указывает на необходимость исследования возможных динамических и катастрофических явлений,

сопровождаящих распространение внутренних волн большой амплитуды.

Внутренние волны, существующие в океане вследствие стратификации ее вод, являются принципиально двумерными, а во многих случаях – и трехмерными. В вычислительном плане анализ двумерных и трехмерных нестационарных волновых движений является весьма сложной задачей. Сейчас разработан и получил широкое применение численный код MIT, решающий полные уравнения гидродинамики с учетом реального рельефа дна, вращения Земли и турбулентных процессов [5]. Эта модель разработана специалистами Массачусетского технологического института (США). Она активно используется в разных странах, в том числе в нашем коллективе. Однако данная модель требует больших компьютерных ресурсов, оправданных для решения ряда практических задач океанологии. Тем не менее, даже такие полные модели пока еще не учитывают существующей на практике относительно стабильной фоновой горизонтально-неоднородной стратификации, которая характерна для реальных океанских условий (для этого необходимо вводить внешние силы, ее удерживающие; параметризация которых пока еще не вполне ясна). Именно поэтому в научных исследованиях и анализе новых явлений широко применяются асимптотические модели, основанные на уравнении Кортевега де Вриза и его обобщениях. Ранее такие модели использовались для оценок волнового поля в двухслойном стратифицированном потоке [6...8]. Позднее, она была обобщена в работах нашего коллектива и включает в себя

произвольную горизонтально-неоднородную стратификацию вращающегося океана [9...12]. Эта численная модель реализована в виде специального пакета IGW Research [13], на которую получен патент. Здесь мы применим асимптотические модели для анализа динамических эффектов в придонном слое, индуцированных внутренними волнами.

Вариации донного давления, вызванные внутренними волнами

Поскольку, как уже указывалось, вариации донного давления могут служить индикатором прохождения интенсивных внутренних волн, рассмотрим, прежде всего, связь между вариациями донного давления и смещениями во внутренней волне.

Исходным для анализа являются известные уравнения Эйлера для несжимаемой стратифицированной жидкости

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z}.$$

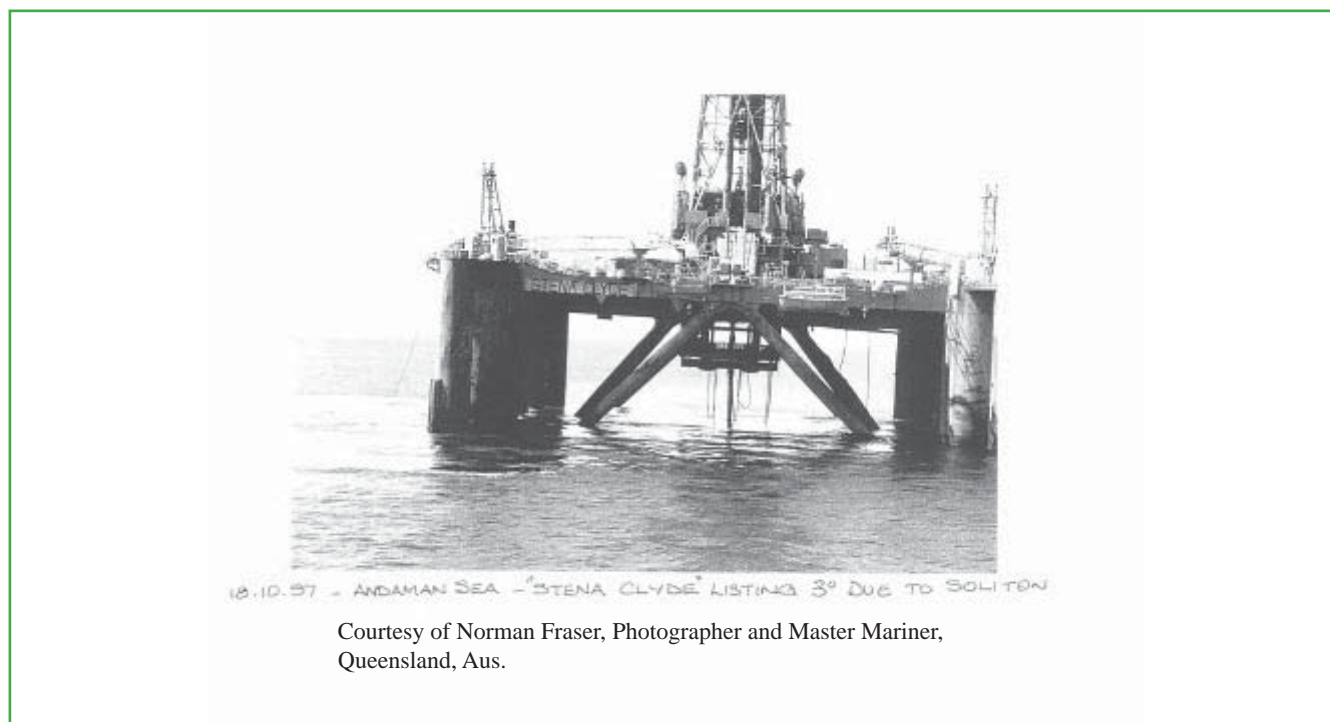


Рис. 1. Накрененная платформа в Андаманском море после повреждения ее внутренними волнами в октябре 1997 г. [1]

Здесь $u(x, z, t)$ и $w(x, z, t)$ – горизонтальная и вертикальная компоненты поля течений (мы предполагаем волновое движение двумерным); $p(x, z, t)$ и $\rho(x, z, t)$ – давление и плотность соответственно; g – ускорение силы тяжести; ось z направлена вертикально вверх, и начало координат лежит на невозмущенной водной поверхности.

Уравнения Эйлера должны быть дополнены граничными условиями на морском дне ($z = -H$), предполагаемым горизонтальным

$$w = 0 \Big|_{z=-H}, \quad (5)$$

и на морской поверхности ($z = 0$), где мы используем приближение твердой крышки

$$w = 0 \Big|_{z=0}. \quad (6)$$

Удобно исключить постоянную гидростатическую компоненту давления

$$P_0(z) = P_{atm} - g \int_z^0 \rho_0(z) dz,$$

где индекс 0 указывает на невозмущенные значения параметров и предполагается постоянным атмосферное давление. В результате, уравнения (1)...(3) упрощаются

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial z} = -g \frac{\rho'}{\rho_0 + \rho'}, \quad (8)$$

$$\frac{d\rho'}{dt} + w \frac{d\rho_0}{dz} = 0, \quad (9)$$

где штрих показывает волновые возмущения давления и плотности.

При анализе волновых возмущений обычно исключают плотность и давление и получают уравнения для скорости или смещения пикноклина. Наша цель – выразить волновые вариации давления через смещения пикноклина. Рассмотрим сначала простейший вариант этих связей для неподвижного океана и малоамплитудных волн. В этом случае уравнения (7)...(9) линеаризуются

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0(z)} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0(z)} \frac{\partial p'}{\partial z} = -g \frac{\rho'}{\rho_0(z)},$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + w \frac{d\rho_0}{dz} = 0,$$

и вкуче с уравнениями (4...6) образуют полную систему линейных уравнений. Разделяя переменные типа

$$u(x, z, t) = U(z) \exp[i(\omega t - kx)],$$

легко получить краевую задачу для вертикальной скорости $W(z)$

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + [N^2(z) - \omega^2] \frac{k^2}{\omega^2} W = 0 \quad (11)$$

с граничными условиями (5) и (6) для определения как структуры поля скорости, так и дисперсионного соотношения $\omega(k)$. Здесь

$$N(z) = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz}}$$

частота Вайсяля-Брента или частота плавучести. Подробности вывода краевой задачи (11) в так называемом приближении Буссинеска можно найти, например, в классической книге Миропольского [14]. До дна обычно «достают» только длинные (низкочастотные) волны, поэтому уравнение (11) еще упрощается

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c^2} W = 0, \quad (12)$$

где c – скорость распространения длинных внутренних волн, найденное как собственное значение при решении краевой задачи (12). Учитывая, что вертикальное смещение пикноклина определяется из кинематического условия

$$w(x, z = \zeta, t) = \frac{d\zeta}{dt}, \quad (13)$$

очевидно, что вертикальная структура смещения остается такой же, как и в поле вертикальной скорости, так что собственно внутренняя волна имеет вид

$$\zeta(x, z, t) = \eta(x, t) W(z) = A W(z) \exp[i(\omega t - kx)],$$

где A – произвольная константа, имеющая смысл амплитуды волны, если рассматривать смещение на горизонте максимума моды, для которого можно положить $\max[W(z)] = 1$.

Свяжем теперь вариации давления со смещением пикноклина. Из уравнения (10) следует, что поле давления в длинной внутренней волне синфазно полю горизонтальной скорости

$$p'(x, z, t) = \rho_0(z) c U(z) \exp[i(\omega t - kx)].$$

Используя теперь формулу (4), получаем окончательное выражение

$$p'(x, z, t) = \rho_0(z) c^2 A \frac{dW}{dz} \exp[i(\omega t - kx)].$$

Итак, флуктуации давления также синфазны с колебаниями пикноклина, но их вертикальная структура не повторяет структуру смещений изопикн стратифицированного океана. Отметим, что в работе [15] приводилась аналогичная формула, однако в качестве определяющей характеристики там было выбрано смещение морской поверхности, которое ничтожно во внутренних волнах (не превышает нескольких сантиметров) и неудобно для оценочных расчетов. Здесь же мы имеем формулу связи с вариациями пикноклина, хорошо измеряемыми и достигающими в наблюдениях несколько десятков метров.

Учитывая, что связь между давлением и смещением не зависит от частоты в силу гидростатичности длинных волн, можно написать переход от спектральных характеристик к «настоящим»

$$p'_b(x, t) = \rho_0(z)c^2 \eta(x, t) \frac{dW}{dz} \Big|_{z=-H}. \quad (14)$$

Формула (14) имеет важное значение для приложений, поскольку существующие сейчас модели расчета внутренних волн ориентированы на вычисление функции $\eta(x, t)$, смотри например, [9...13]. Следовательно, с помощью (14) можно объединить в рамках одной численной модели вычисление как внутренних волн, так и вариации донного давления, вызываемые внутренними волнами. Для оценки величины вариаций донного давления приведем явные выражения для двух стратификаций океана.

Двухслойный океан: толщины верхнего слоя h_1 и нижнего слоя h_2 , так что $H = h_1 + h_2$. В этом случае краевая задача (12) легко решается и формула (23) преобразуется в

$$\frac{p'_b(x, t)}{\rho_0(z)c^2} = \frac{\eta(x, t)}{h_2}.$$

Учитывая, что внутренние волны могут достигать больших высот, относительные вариации придонного давления могут быть весьма значительными и достигать 50 % и более. В то же время абсолютные вариации донного давления, связанные с внутренними волнами, пропорциональны множителю ρc^2 , который примерно на два порядка меньше аналогичного множителя для поверхностных волн $\rho(c_{\text{пов}})^2 = \rho gH$. Именно с этим связаны проблемы регистрации внутренних волн донными датчиками давления, и они могут быть разрешимы с использованием частотной фильтрации (частота внутренних волн значительно меньше частоты ветровых волн).

Непрерывно стратифицированный океан с постоянной частотой плавучести N . В этом случае краевая задача (12) также легко решается и выражение (14) упрощается

$$\frac{p'_b(x, t)}{\rho_0(z)c^2} = \frac{\pi \eta(x, t)}{H}.$$

Вариации донного давления, обусловленные внутренними волнами в непрерывно стратифицированном океане, имеют в принципе тот же порядок, что и в двухслойном океане.

Ранее мы получили расчетную формулу для вариаций донного давления, вызванных внутренними волнами, в рамках линейной теории длинных волн. При этом временная запись донного давления полностью повторяет форму внутренней волны. Так, если в пикноклине распространяется положительная волна – гребень (пикноклин смещается вверх), давление усиливается, а если отрицательная волна – то убывает. В этом смысле запись вариаций донного давления позволяет судить однозначно о форме внутренней волны, распространяющейся в пикноклине. Учет нелинейности и дисперсии внутренних волн приводит к появлению добавочных слагаемых в уравнении (14), пропорциональных η^2 (нелинейность) и второй пространственной производной от η (дисперсия), как это получается во всех асимптотических рядах, используемых в нелинейной теории внутренних волн [11]. Если, однако, амплитуда внутренней волны не очень большая, то нелинейность и дисперсия необходимы для получения эволюционного уравнения типа Кортевега де Вриза для внутренней волны, но могут быть опущены в формуле для донного давления.

Итак, распространение внутренних волн в океане приводит к вариациям донного давления на морском дне, что важно для разработки методов регистрации внутренних волн, защищенных от шума ветровых волн на морской поверхности.

Вариации придонной скорости, вызванные внутренними волнами

Наряду с давлением на дно, внутренние волны вызывают также напряжения трения, способные перемещать донные осадки. Оценим сначала скорости течений на дне в рамках линейной теории. Из уравнения неразрывности (4) и связи (13) вытекает дифференциальное уравнение для скорости течений

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z \partial t} = 0.$$

Учитывая, что в линейной теории длинных волн волны распространяются со скоростью c , определяемой из краевой задачи (12), отсюда сразу следует

$$u(x, z, t) = c \eta(x, t) \frac{dW}{dz}.$$

В результате, получаем явную формулу для расчета придонной скорости течений, вызванных внутренними волнами

$$u_b(x, t) = c\eta(x, t) \frac{dW}{dz} \Big|_{z=-H}. \quad (15)$$

Как видно, по своей структуре формула (15) сходна с формулой для придонного давления (14). Поэтому часть выводов может быть сделано сразу. Вариации скорости течения синфазны внутренним волнам, поэтому течения направлены в сторону распространения под гребнем внутренней волны и в противоположную сторону – под ее впадиной. Относительные вариации скорости течений во внутренних волнах (по сравнению со скоростью ее распространения) могут быть достаточно большие – до 50 % и выше. Скорость внутренних волн может достигать в прибрежных районах 1 м/с, так что и абсолютные значения индуцированных скоростей течения могут быть велики – несколько десятков сантиметров в секунду. Таких скоростей достаточно, чтобы привести в движение донные осадки, особенно, если они состоят из мелкозернистого кварца. К этому вопросу вернемся далее.

Донная скорость течений, индуцированных внутренними волнами, описывается простой формулой (15) и может легко быть учтена в существующих моделях расчета внутренних волн без особой модификации численного пакета. Учет нелинейности и дисперсии внутренних волн ведет к добавочным членам в выражении (15). Наиболее просто оценить нелинейные эффекты в двухслойной жидкости. Воспользуемся для этого законом сохранения массы воды в нижнем слое

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h_2 + \eta) u_2] = 0, \quad (16)$$

где η – смещение границы раздела слоев разной плотности (интерфейс); u_2 – усредненная по глубине скорость течения в нижнем слое (в рамках гидростатической теории легко показать, что скорости течений в каждом слое являются однородными по глубине [16]).

В случае распространения волны с заданной скоростью, уравнение (16) можно проинтегрировать явно

$$u_2(x, t) = c \frac{\eta(x, t)}{h_2 + \eta(x, t)}.$$

Как видим, под гребнем внутренней волны скорость течения уменьшается, а под впадиной – возрастает (этот эффект очевиден из сохранения расхода воды). Таким образом, даже если волна синусоидальная, то распределение скоростей в ней не является симметричным и возникает средняя скорость

течения, направленная против направления распространения волны. Этот эффект известен для поверхностных волн и приводит к транспорту донных осадков в море, в то время как волна распространяется к берегу. В силу полной аналогии уравнения сохранения массы для однородного слоя, этот эффект должен сохраняться и во внутренних волнах. Однако, если внутренние волны не симметричны, в частности если они представляют собой последовательность солитонов, то, разумеется, направление среднего течения зависит только от полярности солитонов.

Ранее мы сделали расчет придонной скорости течений в идеальной жидкости. С учетом вязкости скорость течения на дне должна быть нулевой. Однако, как известно из теории придонного пограничного слоя [17], на верхней его границе скорость течения совпадает с «невязким» значением, поэтому мы можем использовать формулу (15) для оценки скорости течения на верхней границе придонного слоя, пренебрегая в (15) различиями в dW/dz в тонком пограничном слое. Именно эта скорость и входит в модели транспорта донных осадков.

Транспорт донных осадков (bed-load transport) в направлении, перпендикулярном к берегу, описывается дифференциальным уравнением в частных производных [17]

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1\lambda} \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad (17)$$

где $z_b(x, t)$ – высота донных осадков; λ – пористость; q – поток транспорта наносов.

Для потока транспорта донных осадков существует много эмпирических выражений [17...19]. Наиболее распространенной является следующая аппроксимация

$$q(x, t) = \alpha \sqrt{sgd^3} [\Psi(x, t) - \Psi_{cr}]^{3/2} \text{sign}(u_b).$$

Здесь безразмерный параметр

$$\Psi(x, t) = \frac{u_*^2}{sgd}$$

есть параметр Шильдса (Shields), определяющий сдвиговые напряжения на дне; Ψ_{cr} – критическое число Шильдса, соответствующее началу смещения донных осадков; s – плотность осадочных материалов; d – характерный размер донных частиц; u_* – так называемая скорость трения; α – безразмерный коэффициент, который может быть принят равным 21 [20].

Скорость трения может быть вычислена через придонную скорость течения с использованием различных приближений на характер течения в придонном слое (логарифмический или степенной профиль), смотри [17...19]. Грубо можно считать, что

$$u_* = \beta |u_b|$$

с коэффициентом пропорциональности около 5 %.

Уравнение сохранения осадочного материала (17) должно решаться совместно с уравнениями гидродинамики. Но если считать поле скорости заданным, то уравнение (17) легко интегрируется. В частности, стационарное движение внутренней волны сопровождается волновыми вариациями толщины слоя донных осадков, и наиболее простая формула получается для интенсивных внутренних волн, когда критическим значением параметра Шильдса можно пренебречь

$$z_b(x-ct) = \frac{q(x-ct)}{c(1-\lambda)} = \frac{\alpha\beta^3}{(1-\lambda)csgd^3} u_b^3(x-ct).$$

Разумеется, данная модель весьма приближенная, поскольку считается, что невозмущенная глубина океана постоянна. Это, конечно же, не выполняется в прибрежной зоне, где донные осадки могут «сваливаться» на глубину под действием силы гравитации. Однако уже из этой простой модели видно, что наиболее сильно воздействуют на дно интенсивные внутренние волны, поскольку эффект пропорционален кубу амплитуды. Учитывая, что критическое значение параметра Шильдса отлично от нуля, это означает, что сильный размыв дна будет наблюдаться под подошвой внутренней волны, а бар будет намываться под гребнем волны.

Итак, прохождение интенсивных внутренних волн сопровождается двумя наиболее важными эффектами в придонном слое: 1) изменением давления на дно; 2) транспортом донных осадков.

Вариации донного давления позволяют использовать донные датчики давления для регистрации внутренних волн аналогично тому, как это делается для волн цунами. Мы уже приводили разрабатываемую систему раннего обнаружения солитонов внутренних волн (Soliton Early Warning System). Ее эффективность пока еще не вполне ясна, т.к. в отличие от волн цунами, внутренние волны не распространяются уж на очень большие расстояния. Во всяком случае, после разрушительного воздействия на платформу в 1997 г. аналогичные катастрофические события не отмечались. Кроме того, изменение гидродинамического давления на дно ведет к взмучиванию донных осадков и переходу части из них из влекомых во взвешенные осадки. Эти эффекты, также хорошо известные для размывов дна и берегов во время штормов, пока еще не исследованы для внутренних волн с такой же степенью детализации.

Перемещение донных осадков и размывы дна около опор хорошо известны для штормовых волн

в прибрежной зоне. Специфика внутренних волн заключается в их большей длине (несколько километров), так что такие волны всегда «достают» до дна даже далеко от берега и могут приводить к размывам опор нефтяных платформ в глубоководных районах. Особо опасны аномально большие волны, поскольку характеристики размывов пропорциональны кубу амплитуды внутренней волны. В нашей стране пока еще эффекты внутренних волн на устойчивость морских сооружений не регламентируются. Здесь необходима активная проработка этой проблемы в теоретическом плане и накопление данных об опасных внутренних волнах в районах, где стоят нефтяные и газовые платформы.

Представленные результаты получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (№ 14.В37.21.0642), грантов РФФИ (12-05-00472, 13-05-90424_Укр_ф_а, 13-05-97037_Р_Поволжье), а также проекта Научного фонда НИУ ВШЭ № 12-01-0103.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fraser N. Surfing an oil rig. Energy Rev. 1999. Vol. 20. № 4.
2. Song Z.J., Teng B., Gou Y. et al. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses. Applied Ocean Res. 2011. Vol. 33. Pp. 120...129.
3. Stober U., Moum J.N. On the potential for automated real-time detection of nonlinear internal waves from seafloor pressure measurements. Applied Ocean Res. 2011. Vol. 33, pp. 275...285.
4. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. Modeling internal solitary waves in the coastal ocean. Survey in Geophysics. 2007. Vol. 28. № 2, pp. 273...298.
5. Vlasenko V., Stashchuk N. Three-dimensional shoaling of large-amplitude internal waves. J. Geoph. Res. 2007. Vol. 112, pp. C11018.
6. Liu A., Holbrook J., Apel J. Nonlinear internal wave evolution in the Sulu Sea. Jour. Phys. Oceanogr. 1985. Vol. 15, pp. 1613...1624.
7. Liu A.K., Chang Y.S., Hsu M.-K., Liang N.K. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. J. Geoph. Res. 1998. Vol. 103, pp. 7995...8008.
8. Orr M.H., Mignerey P.C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves. J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. № C3, pp. 3064.

9. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf. *J. Phys. I Oceanogr.* 1997. Vol. 27. № 6, pp. 871...896.
10. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. A Generalized Korteweg-de-Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. № C8, pp. 18333...18350.
11. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves. Chapter 2 in the book: *Environmental Stratified Flows* (Ed. By R. Grimshaw). Kluwer Acad. Publ. 2001, pp. 29...60.
12. Пелиновский Е.Н., Полухин Н.В., Талипова Т.Г. Моделирование характеристик поля внутренних волн в Арктике. В кн.: *Поверхностные и внутренние волны в Арктических морях*. С.-Пб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 235...279.
13. Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е. Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013// *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5. № 3. С. 89...95.
14. Миропольский Ю.З. *Динамика внутренних гравитационных волн в океане*. Л.: Гидрометиздат, 1981.
15. Нефедов Л.М., Пелиновский Е.Н., Соустова И.А. Флуктуации давления, вызванные внутренними волнами // *МГЖ*. 1987. № 1. С. 63...64.
16. Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. *Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
17. Nielsen P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Sci., Singapore. 1992.
18. Fredsoe J., Deigaard R. *Mechanics of coastal sediment transport*. *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Sci., Singapore. 1992.
19. Sleath J.F.A. *Sea bed mechanics*. John Wiley & Sons. 1984.
20. Takahashi T., Shuto N., Imamura F., Asai D. Modeling Sediment Transport due to Tsunamis with Exchange Rate between Bed Load and Suspended Load Layers. *ASCE*. 2000. Vol. 2, pp. 1508...1519.
2. Song Z.J., Teng B., Gou Y. et al. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses. *Applied Ocean Res.* 2011. Vol. 33. Pp. 120...129.
3. Stober U., Mowm J.N. On the potential for automated real-time detection of nonlinear internal waves from seafloor pressure measurements. *Applied Ocean Res.* 2011. Vol. 33, pp. 275...285.
4. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. Modeling internal solitary waves in the coastal ocean. *Survey in Geophysics*. 2007. Vol. 28. № 2, pp. 273...298.
5. Vlasenko V., Stashchuk N. Three-dimensional shoaling of large-amplitude internal waves. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, pp. C11018.
6. Liu A., Holbrook J., Apel J. Nonlinear internal wave evolution in the Sulu Sea. *Jour. Phys. Oceanogr.* 1985. Vol. 15, pp. 1613...1624.
7. Liu A.K., Chang Y.S., Hsu M.-K., Liang N.K. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, pp. 7995...8008.
8. Orr M.H., Mignerey P.C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. № C3, pp. 3064.
9. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf. *J. Phys. I Oceanogr.* 1997. Vol. 27. № 6, pp. 871...896.
10. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. A Generalized Korteweg-de-Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. № C8, pp. 18333...18350.
11. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves. Chapter 2 in the book: *Environmental Stratified Flows* (Ed. By R. Grimshaw). Kluwer Acad. Publ. 2001, pp. 29...60.
12. Pelinovskij E.N., Poluhin N.V., Talipova T.G. Моделирование характеристик поля внутренних волн в Арктике [Modeling the characteristics of the field of internal waves in the Arctic]. В кн.: *Поверхностные и внутренние волны в Арктических морях*. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат. С.-Пб.: Гидрометеоздат [St. Petersburg: Publishing house «Gidrometeoizdat»]. 2002, pp. 235...279.
13. Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е. Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel®

REFERENCES

1. Fraser N. Surfing an oil rig. *Energy Rev.* 1999. Vol. 20. № 4.

- Parallel Studio XE 2013 [Productivity increasing for the program complex of simulation of internal gravity waves IGW Research by Intel ® Parallel Studio XE 2013]. Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika [Fundamental and Applied hydrophysics]. 2012. Vol. 5. № 3. pp. 89...95.
14. Miropol'skij Ju.Z. Dinamika vnutrennih gravitacionnyh voln v okeane [Dynamics of internal gravity waves in the ocean]. L.: Gidrometizdat [Leningrad: Publishing house «Gidrometeoizdat»], 1981.
 15. Nefedov L.M., Pelinovskij E.N., Soustova I.A. Fluktuacii davlenija, vyzvannye vnutrennimi volnami [The pressure fluctuations caused by internal waves]. *MGZh* [Marine Hydrophysical Journal]. 1987. № 1, pp. 63...64.
 16. Liapidevskii V.J., Teshukov V.M. Mathematical model of long waves in an inhomogeneous liquid [Mathematical model of long waves in an inhomogeneous fluid]. Novosibirsk: Publishing House of SO RAN [Novosibirsk: Publishing house «Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences »]. 2000.
 17. Nielsen P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering. World Sci., Singapore. 1992.
 18. Fredsoe J., Deigaard R. Mechanics of coastal sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering. World Sci., Singapore. 1992.
 19. Sleath J.F.A. Sea bed mechanics. John Wiley & Sons. 1984.
 20. Takahashi T., Shuto N., Imamura F., Asai D. Modeling Sediment Transport due to Tsunamis with Exchange Rate between Bed Load and Suspended Load Layers. ASCE. 2000. Vol. 2, pp.1508...1519.

Информация об авторах

Тюгин Дмитрий Юрьевич, канд. физ.-мат., младший научный сотрудник

Наумов Александр Александрович, студент

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Куркина Оксана Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Куркин Андрей Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор

E-mail: aakurkin@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Пелиновский Ефим Наумович, доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Институт прикладной физики РАН

603950, ГСП-41, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

Information about the authors

Tyugin Dmitrii Yurevich, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Junior Researcher

Naumov Aleksandr Aleksandrovich, Student

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev

Kurkina Oksana Evgenjevna, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev

Higher School of Economics National Research University Nizhny Novgorod

Kurkin Andrei Aleksandrovich, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor

E-mail: aakurkin@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev

Pelinovsky Efim Naumovich, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Principle Researcher

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev

Institute of Applied Physics

603950, Russian Federation, GSP-41, Nizhny Novgorod, Minin st., 24