

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ

№ 3
2014
ISSN: 2072-9952

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

- Барановский Н.В., Янкович Е.П.**
Методические и технические основы
использования данных наземной таксации
лесных массивов в целях количественной
оценки лесной пожарной опасности 3
- Асфандиярова Л.Р., Даминов Р.Р.,
Галиев А.Л., Юнусова Г.В.**
Применение ГИС-технологий с целью визуализации
результатов мониторинга снежного покрова
промышленного города 13

ЗАГРЯЗНЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АНАЛИЗ И ОХРАНА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Шабанов В.А., Шабанова А.В.**
Оценка загрязненности городских водоемов Самары
соединениями железа 20

ЭКОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

- Талипова Т.Г., Куркина О.Е., Терлецкая Е.В.,
Куркин А.А., Рувинская Е.А.**
Моделирование внутренних волн
в прибрежной зоне Баренцева моря 26

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

- Костарев С.Н., Середа Т.Г., Михайлова М.А.**
Программно-аппаратный комплекс управления качеством
фильтрационных стоков 39
- Лунев Г.Г.**
Анализ и оценка роли строительного-демонтажных работ
в повышении эффективности переработки
вторичных строительных ресурсов 47
- 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., Палаева 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
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
Лагарьков А.Н., акад. РАН
Лаверов Н.П., акад. РАН
Люшак 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.
Мовсуни-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
Хомич В.Ю., акад. РАН
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 20.02.14.

Формат 60×88 1/8. Бумага кн.-журн. Печать офсетная.

Усл.-печ. л. 14,3. Усл. кр.-отт. 32,1. Уч.-изд. л. 19,2. Зак. 446.

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

ЭКОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Т.Г. Талипова

доктор физ.-мат. наук
(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)
(Институт прикладной физики РАН)

О.Е. Куркина

канд. физ.-мат. наук, доцент
(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)
(Национальный исследовательский университет
Высшая школа экономики)

г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Е.В. Терлецкая

канд. физ.-мат. наук
E-mail: kterletska@gmail.com
(Институт математических машин
и системных проблем НАНУ)

Киев, Украина

А.А. Куркин

доктор физ.-мат. наук, профессор
E-mail: aakurkin@gmail.com

Е.А. Рувинская

канд. физ.-мат. наук
(Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева)
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Необходимость исследования внутренних волн большой амплитуды в Баренцевом море связана с их возможным катастрофическим воздействием на морские платформы, мощным транспортом донных осадков и размывом дна, что неизменно сказывается на общей экологической ситуации. В работе численное моделирование генерации и распространения внутренних волн в Баренцевом море выполнено в рамках двумерной версии полно нелинейных уравнений Эйлера для плоского слоя идеальной стратифицированной жидкости с учетом вращения Земли. Механизмом генерации внутренних волн является трансформация баротропного прилива на свале глубин. Высота приливной волны в береговой зоне оценивается порядка 1,5...2 м, а средние скорости приливной волны в районе Кольского п-ва составляют 20...25 см/с. Такой прилив приводит к генерации внутренних волн с высотами до 15 м. Расчеты выполнены для трех разрезов вблизи южной части Кольского п-ва около пункта Восточная Лица, отличающихся гидрологией и глубиной. Учитывалась только плотностная стратификация океана. Сделаны статистические оценки возможных амплитуд внутренних волн в этом регионе.

Ключевые слова: Баренцево море; приливные внутренние волны; нелинейные короткопериодные внутренние волны; численное моделирование; статистика амплитуд; гистограммы.

T.G. Talipova

Doctor of Phys.-Math. Sciences

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

*(Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences)*

O.E. Kurkina

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

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

*(Higher School of Economics National Research University
Nizhny Novgorod)*

Nizhny Novgorod, Russian Federation

E.V. Terletsкая

Cand. of Phys.-Math. Sciences

E-mail: kterletska@gmail.com

*Institute of Mathematical Machines
and Systems Problems of the NASU*

Kiev, Ukraine

A.A. Kurkin

Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor

E-mail: aakurkin@gmail.com

E.A. Rouvinskaya

Cand. of Phys.-Math. Sciences

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

Nizhny Novgorod, Russian Federation

MODELLING OF INTERNAL WAVES IN THE COASTAL ZONE OF THE BARENTS SEA

Necessity of study of the internal waves of large amplitude in the Barents Sea related to their possible catastrophic effects on offshore platforms, powerful transport sediments and bottom erosion, which invariably affects on the overall environmental situation. In this paper, numerical simulation of the generation and propagation of internal waves in the Barents Sea in the framework of the two-dimensional version of the full nonlinear Euler equations for a plane layer of ideal stratified fluid taking into account the Earth's rotation is made. The transformation of the barotropic tide at depth break is mechanism of internal wave generation. The height of the tidal wave in the coastal area is estimated at about 1,5...2 m, and the average speeds of the tidal wave in the Kola Peninsula are amounted to 20...25 cm/s. This tide leads to generation of internal waves with heights up to 15 m. Calculations are performed for three incisions near the southern part of the Kola Peninsula near the point of Vostochnaya Litsa differing on hydrology and depth. Only density stratification of the ocean is considered. Statistical estimates of the possible amplitudes of internal waves in this region are made.

Keywords: Barents Sea; tidal internal waves; nonlinear short-period internal waves; numerical modeling; statistics of amplitude; histograms.

По некоторым оценкам, Российский арктический континентальный шельф содержит до 25 % мировых запасов углеводородов, а Баренцево море – одну треть реальных запасов. Прогнозные запасы нефти в Баренцевом море составляют 13 млн т, газа – 52 млрд м³. При этом степень разведанности этой акватории составляет только 8,7 % по газу и 3 % – по нефти. Первая полностью российская морская платформа строится сейчас в Северодвинске. Большая часть нефтяных запасов лежит у северного побережья Норвегии, к югу от о. Шпицберген и к западу от архипелага Новая Земля, а также в Печерском море. Газовые месторождения покрывают практически всю площадь Баренцева моря. По заявлениям правительственных источников, к 2030 г. в России будет построено 40 нефтяных и 14 газодобывающих морских платформ ледового класса [1].

Все это требует тщательного исследования гидрологических полей Баренцева моря и расчета нагрузок, которые могут воздействовать

на морские платформы. Одной из таких нагрузок на опоры платформы является нагрузка от внутренних волн, которой зачастую пренебрегают по сравнению с нагрузкой от ветровых волн и ветра. Однако инциденты, когда интенсивные внутренние волны влияют на буровые установки и приводят к размыву дна при подводной прокладке труб, уже зарегистрированы [2]. Оценки, сделанные на основе численного моделирования в Южно-Китайском море [3] показали, что нагрузки от внутренних волн, действующие на подводные части платформы в вертикальном направлении в 30 раз превосходят нагрузки от ветровых волн. Действие внутренних волн приводит к мощному транспорту донных осадков и размывам дна, что неизменно сказывается на общей экологической ситуации.

Внутренние волны в Баренцевом море, особенно в зоне закритических широт, исследуются сравнительно недавно. Имеющиеся наблюдения показывают, что в закритических широтах возможна генерация внутренних волн значительных амплитуд

[4...6]. Как и во многих регионах Мирового океана основные энергонесущие внутренние волны генерируются в результате взаимодействия баротропного прилива с неоднородностями морского дна на подводных банках, хребтах и на других особенностях шельфовых зон.

Данные наблюдений внутренних волн в морях Северного Ледовитого океана очень немногочисленны, поэтому для оценки высот внутренних волн активно используются численные методы. Численные эксперименты [7...9] показали, что баротропный прилив генерирует так называемые «подветренные» внутренние волны (термин введен в работе [10]), которые могут достигать амплитуд 20...40 м при глубине средней части моря порядка 100...200 м. Амплитуды волн достаточно значительны, чтобы такими волнами можно было пренебречь при анализе динамики арктических морей. Поля скорости, которые возникают в придонном слое при действии этих волн, достаточны, чтобы привести в движение донные осадки. В докритических широтах также имеются наблюдения распространяющихся солитоноподобных внутренних волн и солиборов, к примеру, в Печерском море [11].

Работа посвящена моделированию поля внутренних волн в южной части Баренцева моря и оценке амплитуд возникающих там внутренних волн. Моделирование проведено на основе численной модели, реализующей уравнения Эйлера с учетом вращения Земли.

Баротропный прилив

Оценки смещения уровня баротропного прилива в районе Южного берега Баренцева моря даны

в работе [12], где высота приливной волны в береговой зоне оценивается порядка 1,5...2 м, а средние скорости приливной волны в районе Кольского п-ва составляют 20...25 см/с.

Учитывая известные данные о приливных составляющих, представим приливной цикл в виде модулированной синусоиды

$$u = U_0 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) [1 + m \sin(\omega_2 t + \varphi_2)], \quad (1)$$

где частоты составляют: $\omega_1 = 1,41 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,85 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; ω_1 – частота полусуточного прилива (период 12,4 ч); ω_2 – частота 15-суточной модуляции (360 ч). Глубина модуляции может достигать $m = 1/3$. Мы принимаем среднюю скорость течения равной 23 см/с. Временная зависимость скорости течения в баротропном приливе показана на рисунке 1.

Как известно, баротропный прилив генерирует внутренние волны в зонах, где глубина моря меняется [13]. Поэтому приливное течение (1) является «входным параметром» в модели генерации внутренних волн.

Гидрология и батиметрия исследуемого района

Для исследования генерации внутренних волн вблизи южного берега Кольского п-ва в районе пункта Восточная Лица (68°38' сев. шир., 37°48' вост. долг.) было выбрано три разреза, отличающихся по рельефу дна и плотностной стратификации. Разрезы показаны на карте (рис. 2). Изменение глубины вдоль каждого разреза показано на рисунках 3, а...5, а. Рельеф дна на каждом разрезе выбирался по

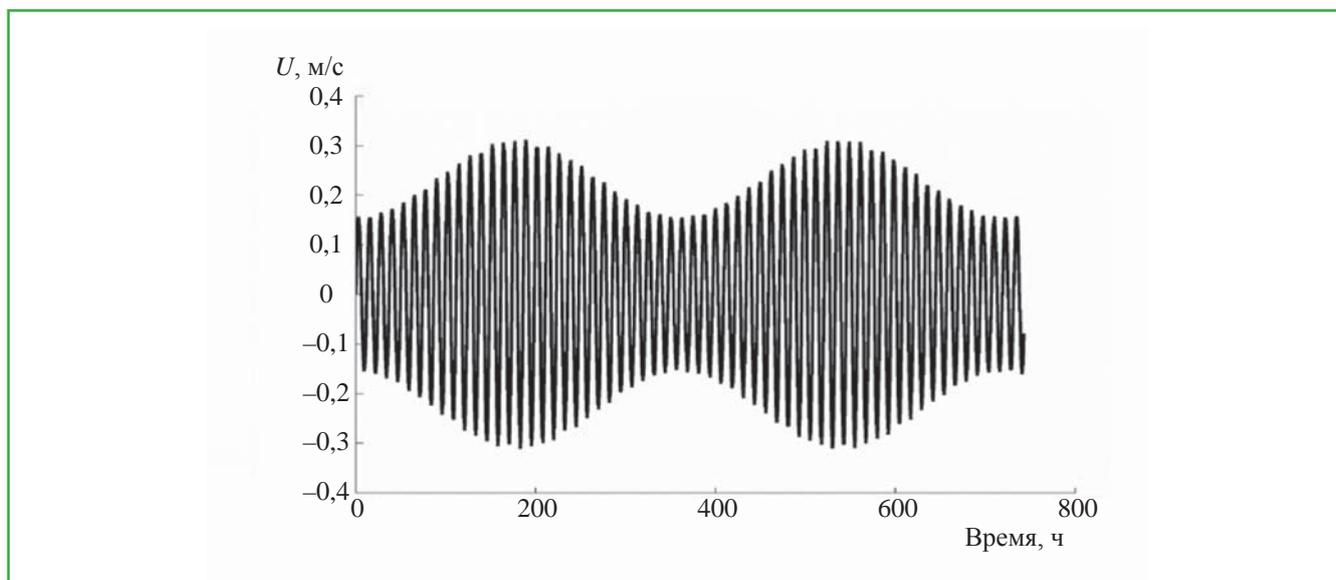


Рис. 1. Горизонтальная скорость баротропного прилива

базе данных [14]. Он аппроксимировался полиномиальной зависимостью для удобства расчетов. Стратификация вод в этом регионе выбиралась для летнего сезона из базы данных [15] в точке, наиболее близкой к выбранному разрезу. Частота Вьяйсяля–Брента (частота плавучести) также аппроксимировалась полиномиальной зависимостью; она представлена на рисунках 3, б...5, б.

Разрез 1 является наиболее мелководным, его глубина не превышает 100 м в области провала перед берегом. Пик частоты Брента–Вьяйсяля

находится на глубине 35 м и достигает 10^{-2} Гц. На втором разрезе в среднем глубина больше, чем на первом разрезе, и составляет около 150 м с провалом до 200 м у берега. Пик частоты Брента–Вьяйсяля здесь находится на глубине 36 м. Разрез 3 – наиболее глубокий, он расположен в сторону открытого моря по сравнению с разрезами 1 и 2. Максимальная глубина этого разреза составляет 210 м, и на нем имеется достаточно высокая подводная банка, глубина над которой составляет всего 100 м, а затем к берегу опять идет провал до 200 м. Частота Брента–Вьяйсяля на этом разрезе

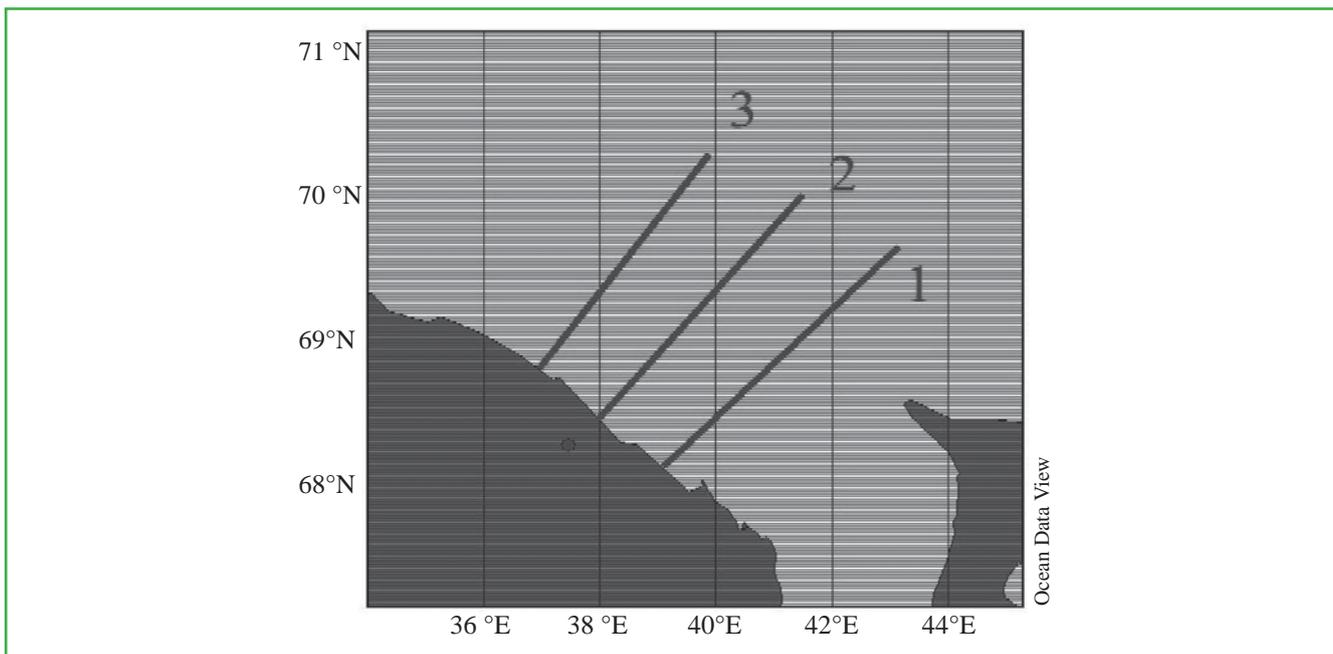


Рис. 2. Выбранные разрезы около пункта Восточная Лица (помечена точкой)

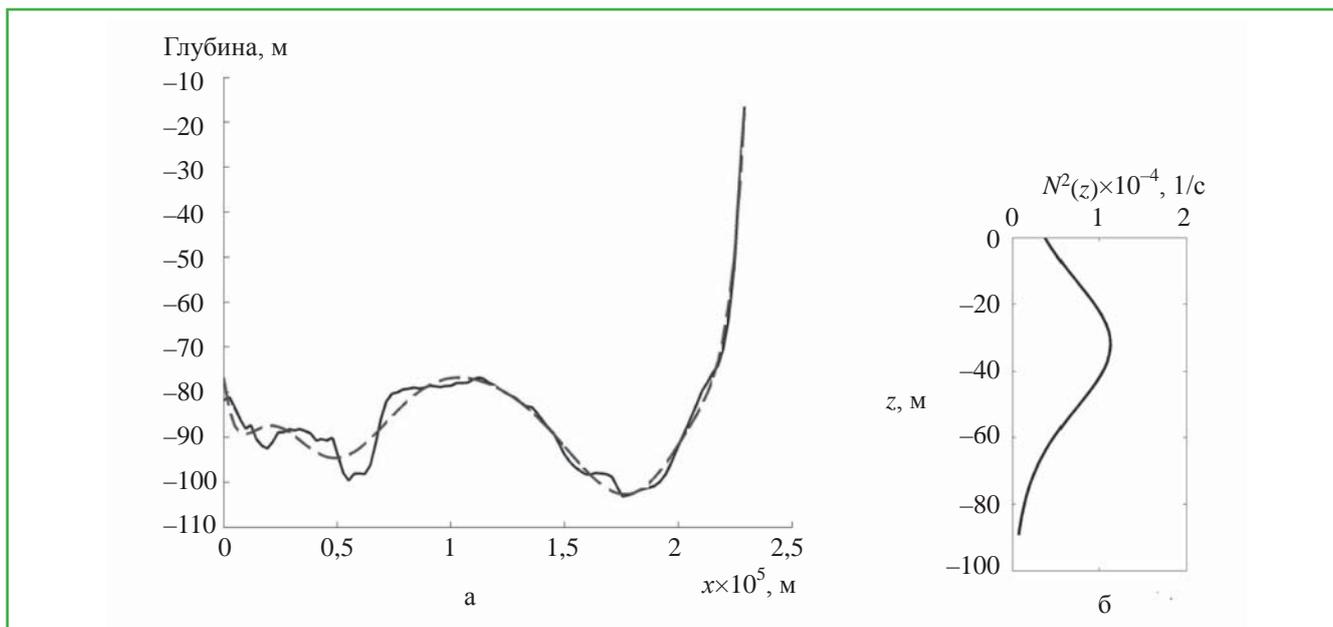


Рис. 3. а – рельеф дна вдоль разреза 1 (прямая линия – по данным атласа батиметрии на разрезе 1, пунктирная линия – полиномиальная аппроксимация); б – квадрат частоты Вьяйсяля–Брента.

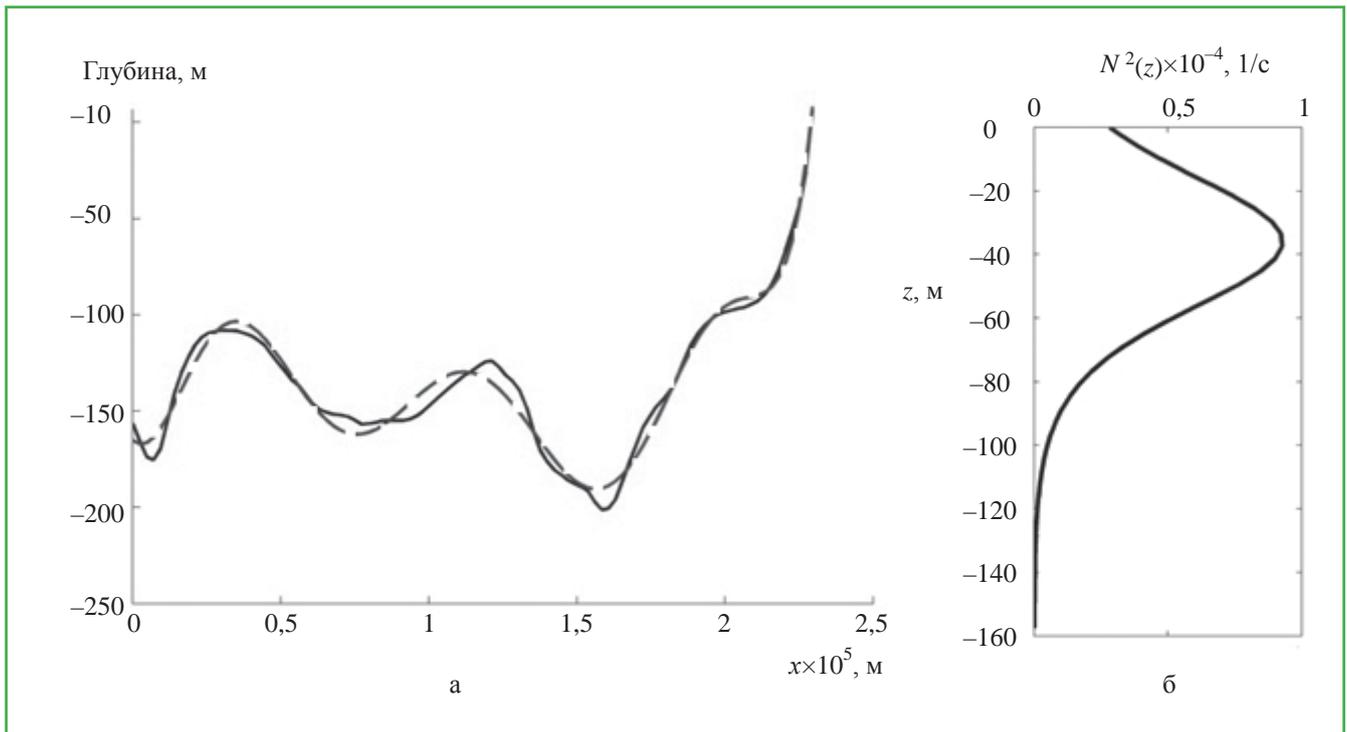


Рис. 4. *a* – рельеф дна вдоль разреза 2 (прямая линия – по данным атласа батиметрии на разрезе 2, пунктирная линия – полиномиальная аппроксимация); *б* – квадрат частоты Вьяйсяля–Брента.

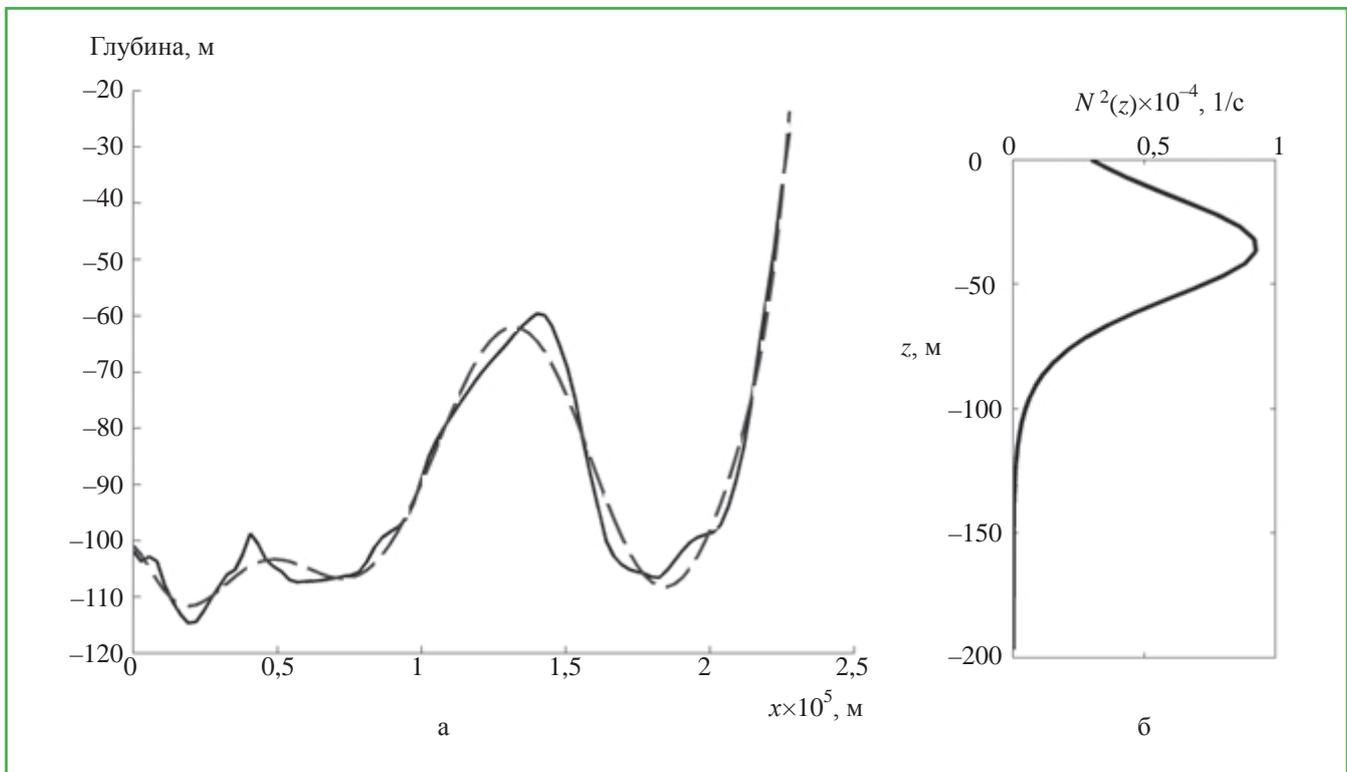


Рис. 5. *a* – рельеф дна вдоль разреза 3 (прямая линия – по данным атласа батиметрии на разрезе 3, пунктирная линия – полиномиальная аппроксимация); *б* – квадрат частоты Вьяйсяля–Брента.

отлична от нуля только до глубины 150 м, ниже плотностная стратификация отсутствует.

Численная модель

Уравнения Эйлера, описывающие движения невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости в вертикальной плоскости имеют вид [16]

$$\rho_f (\vec{U}_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} - f v \vec{i}) = -\vec{\nabla} p_d - \rho_f g \vec{k}, \quad (2)$$

$$v_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} v + f u = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \rho_f = 0, \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0. \quad (5)$$

Здесь $\vec{U} = (u, w)$ – вектор скорости в вертикальной плоскости (x, z) ; u – скорость вдоль горизонтальной оси x ; w – скорость вдоль вертикальной оси z ; v – компонента скорости в поперечном направлении y ; $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор градиента;

t – время; ρ_f и p_d – плотность и давление соответственно; g – гравитационное ускорение; f – параметр Кориолиса; \vec{i} и \vec{k} – единичные орты по осям x и z .

Эти уравнения решаются в пространстве размерности 2+1, т.е. все физические величины являются функциями x, z и t .

Изменения плотности морской воды с глубиной очень незначительны, поэтому можно записать

$$\rho_f = \rho_0 (1 + \rho),$$

где ρ_0 – постоянная характерная плотность; ρ – безразмерная.

Полагая

$$p_d = \rho_0 (p - gz),$$

можно переписать исходные уравнения (2), (4)

$$(1 + \rho) (\vec{U}_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} - f v \vec{i}) = -\vec{\nabla} p - \rho g \vec{k}, \quad (6)$$

$$\rho_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \rho = 0. \quad (7)$$

Учитывая, что в океане $\rho \ll 1$ уравнение (6) можно упростить, заменяя множитель $(1 + \rho)$ на 1 (приближение Буссинеска)

$$\vec{U}_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} - f v \vec{i} = -\vec{\nabla} p - \rho g \vec{k}. \quad (8)$$

Разработанный нами программный комплекс [17] численно решает систему уравнений (3), (5), (7), (8).

Пространственная расчетная область имеет горизонтальный размер L , вертикальный – H . Дно описывается функцией $z = h(x)$, где $h(x)$, как правило, имеет наименьшие значения, равные нулю, так что H – максимальная глубина бассейна. Естественным ограничением является то, что $h(x)$ должно быть всюду меньше H . Таким образом, уравнения модели решаются в области

$$R = \{(x, z): 0 \leq x \leq L, h(x) \leq z \leq H\}.$$

На поверхности океана используется приближение «твердой крышки». Граничное условие на дне ставится как условие непротекания. Правая (выход на мелководье) и левая (открытое море) границы являются открытыми. Процедура численного решения системы основана на введении проецирующего оператора и сигма-координатной сетки, повторяющей рельеф дна. Для инициализации модели задается топография дна (функция $h(x)$), горизонтально-однородное поле плотности морской воды $\rho_{\text{mean}}(z)$, а также начальное поле скоростей баротропного прилива.

Для расчетов бралась пространственная сетка с 2 000 точками по горизонтали и 40 – по вертикали. Максимальное значение временного шага равно 30 с. Такие значения удовлетворяют условию устойчивости численной схемы Куранта–Фридрихса. Длина области расчета – 250 км.

Начальные условия соответствуют состоянию покоя, когда изопикны горизонтальны. Из открытой части океана (на левой границе расчетной области) на мелководную область «набегает» баротропная приливная волна. Взаимодействие ее с областью больших градиентов глубины приводит к генерации бароклинных волновых возмущений, распространяющихся от места генерации в открытую часть океана и на шельф в виде прогрессивных волн.

Далее описаны результаты расчетов параметров внутренних волн в шельфовой зоне района Восточная Лица (68°38' сев. шир., 37°48' вост. долг.).

Внутренние волны на первом разрезе

Для генерации внутренних волн на разрезе I в нулевой момент времени в качестве начальной выбрана фаза максимума прилива. Генерация интенсивных нелинейных солитоноподобных волн с длинами порядка два-пять километров в основном

идет на свале глубин от мелководной береговой зоны (20 м) в зону более глубокой воды (100 м). Однако подводная банка также вносит свой вклад в генерацию, и над ней генерируются довольно слабые длинные внутренние волны. Развитие волнового поля со временем приведено на рисунке 6.

Заметные волны возникают после 40 ч (три приливных цикла).

Со временем выходящие из зоны генерации внутренние волны начинают заполнять расчетную область (40...150 ч) и к и к середине цикла (180...200 ч) заполняют всю расчетную область.

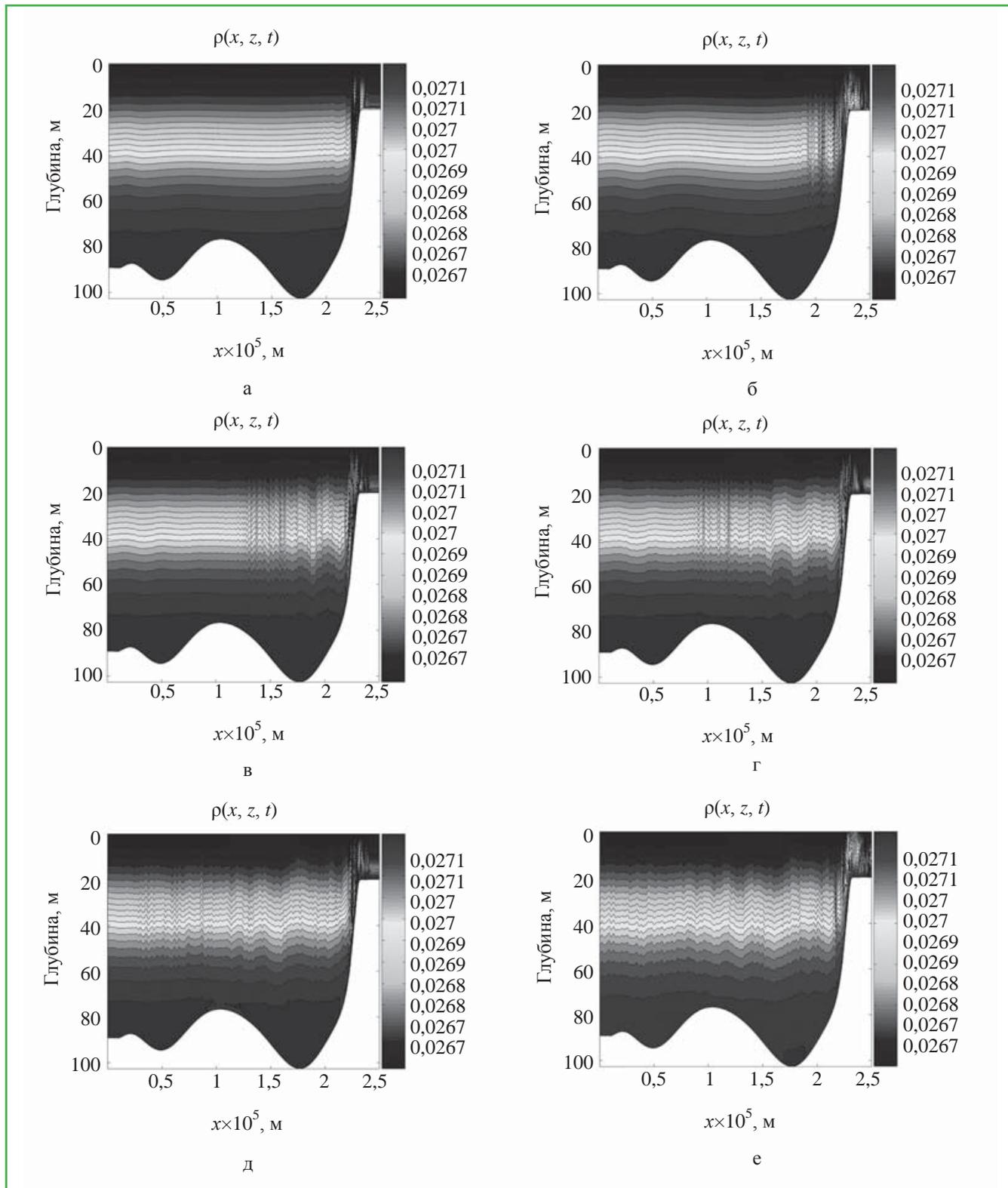


Рис. 6. Поле внутренних волн на первом разрезе в различные моменты времени: а – $t = 40$ ч; б – $t = 80$ ч; в – $t = 150$ ч; г – $t = 200$ ч; д – $t = 270$ ч; е – $t = 330$ ч.

Эти волны по мере распространения трансформируются над неоднородным дном. Как и следует ожидать, длина коротких нелинейных солитонобразных импульсов возрастает при их распространении в более глубокую воду, а также падает их амплитуда по сравнению с амплитудой в зоне генерации; достаточно сравнить рисунок – $t = 80$ ч и $t = 200$ ч. На краю мелководной области наблюдается заплеск (на 40...50 м вверх!) более плотной воды и последующее перемешивание, причем этот процесс занимает практически всю двадцатиметровую толщу воды в этой зоне. Генерация волн идет в основном на низшей моде. Вследствие нелинейности возникает «детектирование» отрицательных импульсов в нижней части расчетной области, у дна, и «детектирование» положительных импульсов у поверхности. В рамках слабонелинейной теории эти характерные особенности за счет нелинейной поправки к структуре моды описаны в работах [18, 19].

Для того чтобы иметь представление о высотах внутренних волн, была сделана первичная

статистическая обработка результатов расчета, и построены гистограммы амплитуд смещений изопикны, находящейся в максимуме линейной моды (для разреза I максимум находится на горизонте 40 м) (рис. 7). На гистограммах приведена плотность распределения амплитуд

$$f = \frac{n}{N},$$

где n – число волн с амплитудой, попадающей в выбранный интервал амплитуд и N – общее число волн.

Гистограммы, построенные для волн в начале счета до момента времени 80...100 ч, нерепрезентативны, поскольку волн в исследуемой расчетной области крайне мало. Следует отметить, что на гистограмме в момент времени 60 ч отмечено появление волны с амплитудой свыше 8 м. В момент времени 100 ч максимум положительной амплитуды выше 6 м, отрицательной – около –3 м. С течением времени максимум отрицательной амплитуды сначала растет (по модулю) от –1 м до –3 м,

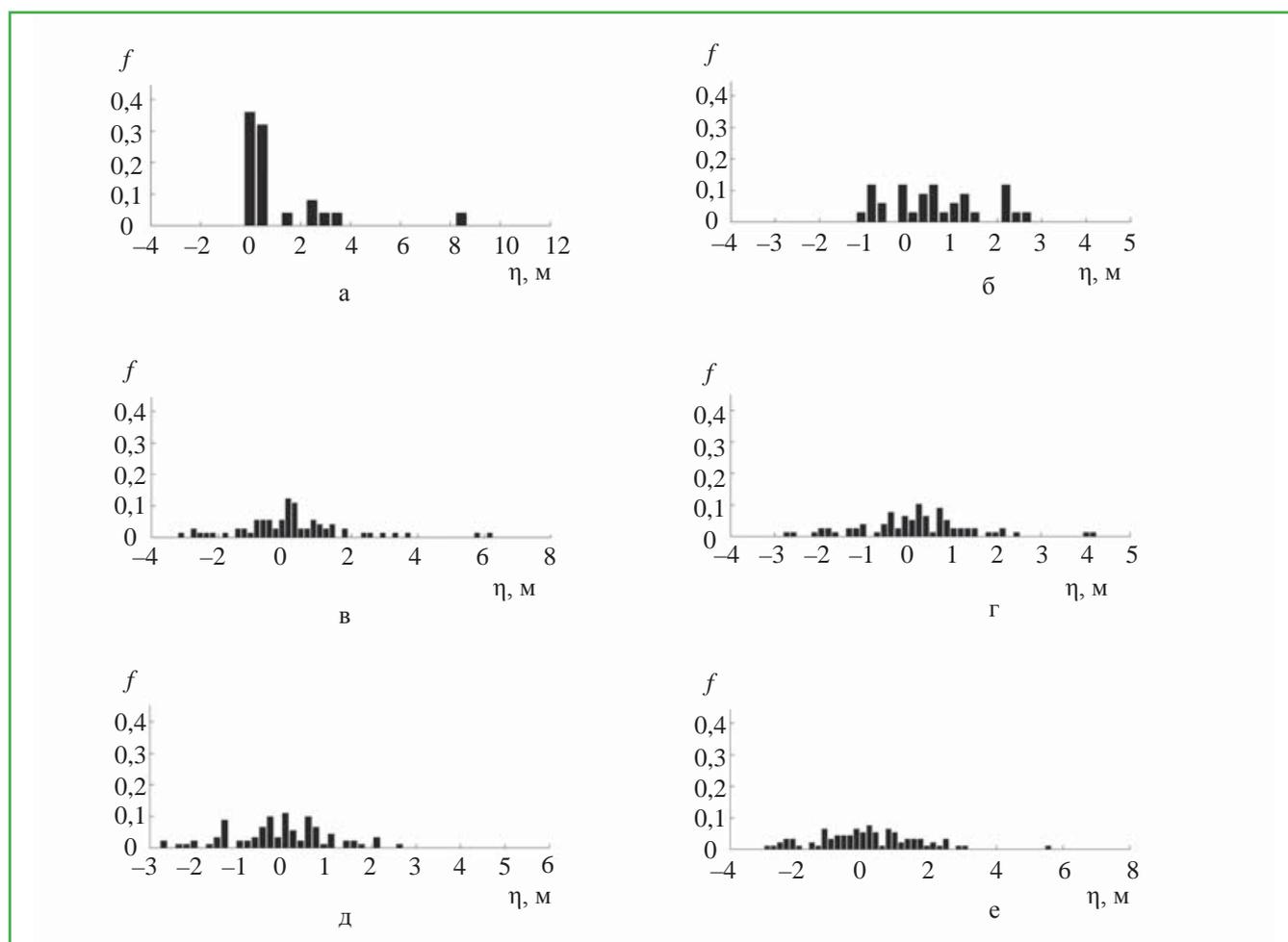


Рис. 7. Гистограммы амплитуд внутренних волн на первом разрезе для различных моментов времени: а – $t = 40$ ч; б – $t = 80$ ч; в – $t = 150$ ч; г – $t = 200$ ч; д – $t = 270$ ч; е – $t = 330$ ч.

а затем спадает к -2 м, в то время как максимум положительной амплитуды спадает от 6 м до тех же 3 м. Со временем гистограммы становятся более однородными.

Поскольку волны движутся довольно медленно, проходя примерно 25 км в сутки, то исследуемый интервал 250 км вдоль разреза содержит волны, которые сгенерированы в различные фазы модулированного прилива, поэтому после переходного периода гистограммы

испытывают некоторые временные вариации. Наибольшие амплитуды за период модуляции 360 ч на первом разрезе составляют -3 м и $+9$ м.

Внутренние волны на втором разрезе

Для генерации внутренних волн на втором разрезе в качестве начальной фазы также выбрана фаза максимума прилива. Время расчета 360 ч соответствует периоду модуляции приливных

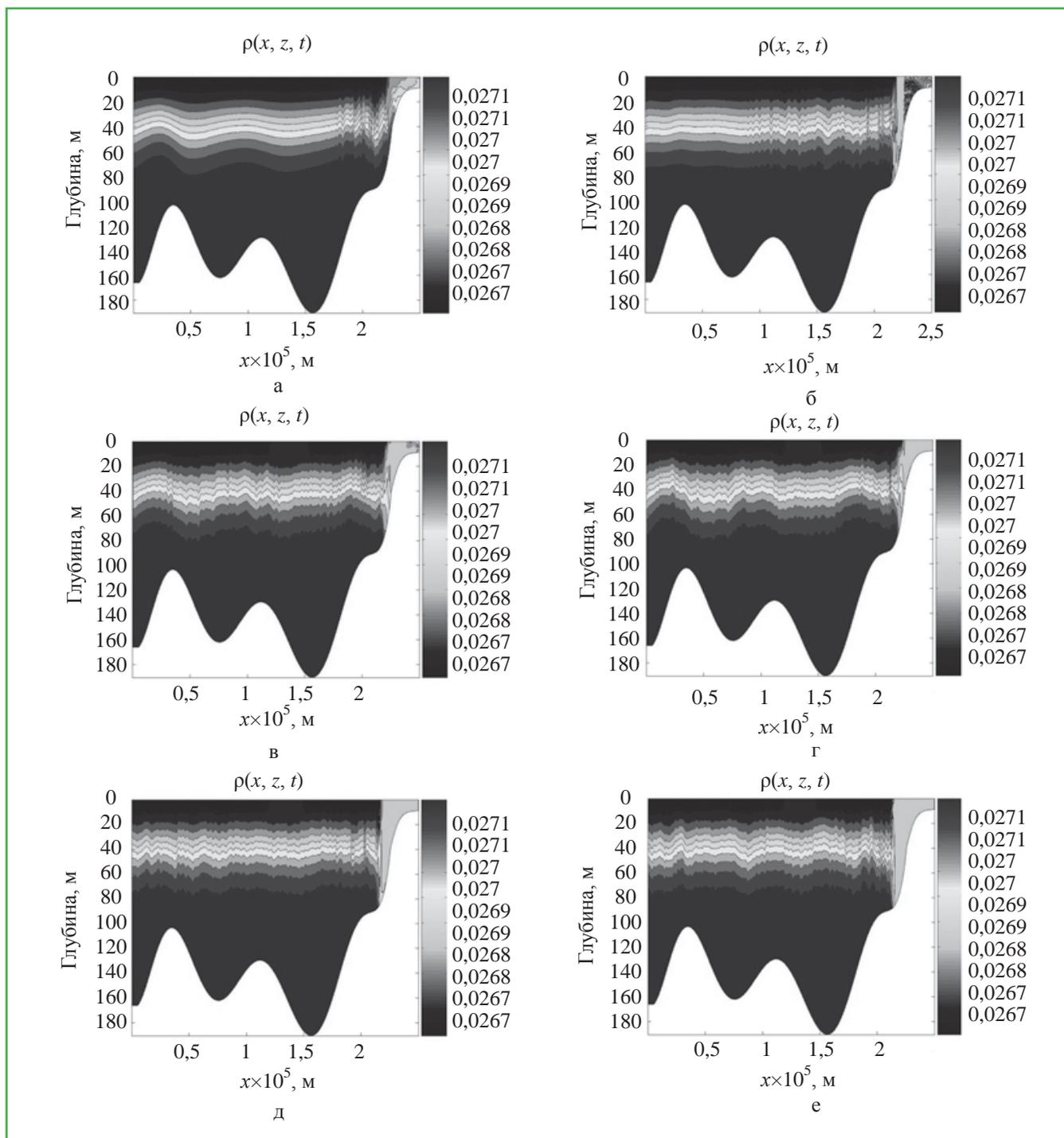


Рис. 8. Поле внутренних волн на втором разрезе для различных моментов времени: а – $t = 80$ ч; б – $t = 160$ ч; в – $t = 240$ ч; г – $t = 280$ ч; д – $t = 320$ ч; е – $t = 360$ ч.

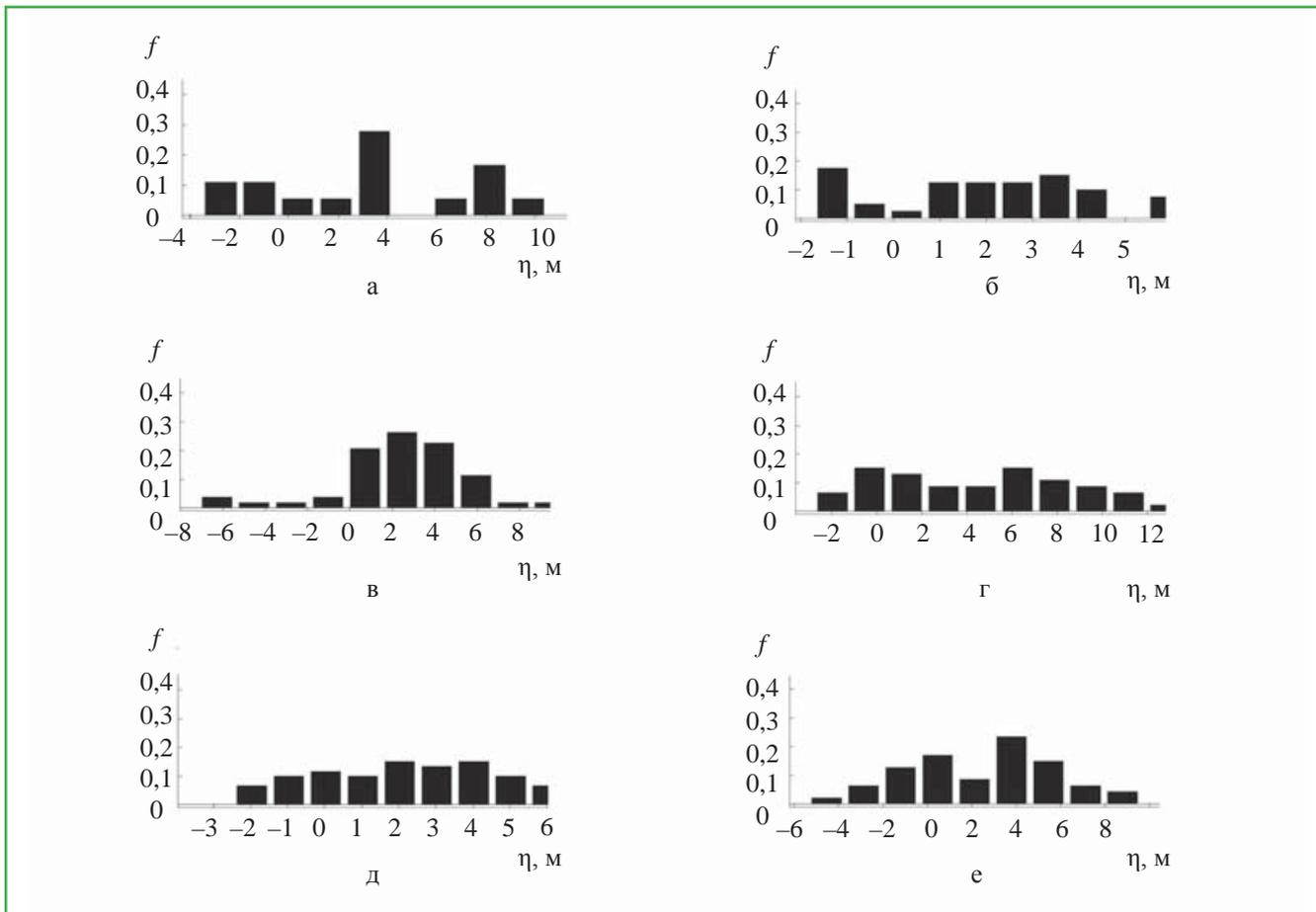


Рис. 9. Гистограммы амплитуд внутренних волн на втором разрезе для различных моментов времени: а – $t = 80$ ч; б – $t = 160$ ч; в – $t = 240$ ч; г – $t = 280$ ч; д – $t = 320$ ч; е – $t = 360$ ч.

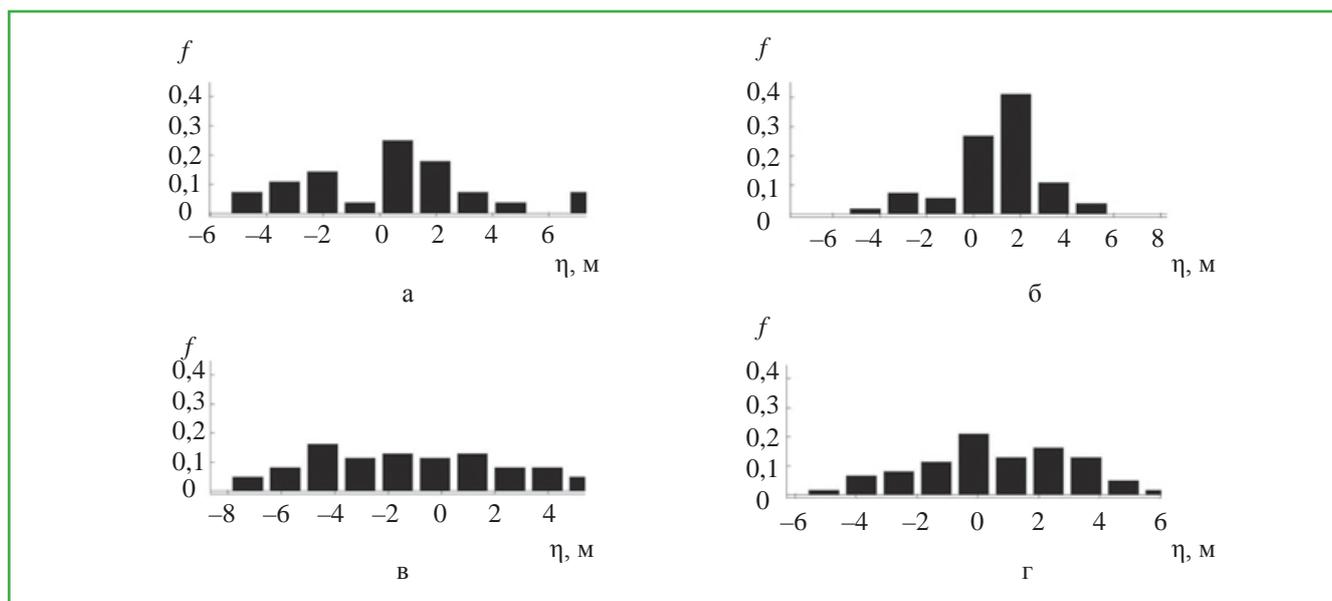


Рис. 10. Гистограммы амплитуд внутренних волн на третьем разрезе для различных моментов времени: а – $t = 80$ ч; б – $t = 160$ ч; в – $t = 293,3$ ч; г – $t = 360$ ч.

колебаний. Развитие поля внутренних волн со временем на этом разрезе показано на рисунке 8.

Следует отметить, что здесь прилив довольно быстро приводит к полному перемешиванию воды в мелководной области, и после четырех суток зона генерации внутренних волн смещается с края мелководной зоны на склон, как видно из сравнения рисунков 8, а...е. Здесь также идет генерация длинных внутренних волн на подводных банках, и на склоне образуются более короткие сильно нелинейные волны. Как следствие, о достаточно развитом поле волн можно говорить уже через 160 ч.

Гистограммы волновых амплитуд показаны на рисунке 9. Поведение гистограмм аналогично предыдущему, т.е. после переходного периода максимальная амплитуда на гистограммах немного колеблется, но прямой зависимости параметров гистограммы от фазы модулированного прилива также не наблюдается. Однако, в среднем на этом разрезе максимальная амплитуда сгенерированных внутренних волн выше, чем на первом разрезе; она колеблется в основном между 6 и 10 м для положительных и между –3 м и –5 м для отрицательных значений. Наибольшие значения наблюдаемых амплитуд внутренних волн на этом разрезе за период модуляции составляют –8 м и +12 м.

Внутренние волны на третьем разрезе

Для последнего третьего разреза приведем только гистограммы амплитуд внутренних волн (рис. 10). Максимальные амплитуды внутренних волн на этом разрезе колеблются от –6 м до +8 м, а наибольшие амплитуды за время наблюдения составили –8 м для отрицательных амплитуд и +15 м – для положительных.

Заключение

Выполнены расчеты параметров внутренних волн на трех разрезах у южного берега Баренцева моря. Они продемонстрировали генерацию относительно короткопериодных нелинейных волн и позволили оценить амплитуды внутренних волн в зоне 250 км. Первичная статистическая обработка поля внутренних волн, в частности построенные гистограммы амплитуд внутренних волн на каждом разрезе показали, что ожидаемые амплитуды внутренних волн в этом районе не превышают –8 м для отрицательных и +15 м – для положительных волн, что является довольно значительной величиной при глубине моря менее

180 м. Такие волны нелинейны и интенсивны и могут влиять на экологию Баренцева моря.

Представленные результаты получены при поддержке грантов РФФИ (12-05-00472-а, 13-05-90424_Укр_ф_а), а также проекта Научного фонда НИУ ВШЭ № 12-01-0103.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиниченко А. Баренцево море: нефть, газ и бункер. Первый всероссийский форум «Современное состояние и перспективы развития российского рынка бункеровки судов» 26–27 июня 2008 г. Санкт-Петербург, Россия. http://mrbunker.ru/my-files/forum08/Barentsevo_bunkering.pdf
2. Fraser N. Surfing an oil rig. *Energy Rev.* 1999. Vol. 20. № 4.
3. 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.
4. Писарев С.В. Низкочастотные внутренние волны у кромки шельфа Арктического бассейна // *Океанология.* 1996. Т. 36. № 6. С. 819...826.
5. Козубская Г.И., Коняев К.В., Плюдеман А., Сабинин К.Д. Внутренние волны на склоне желоба острова Медвежий по данным эксперимента Полярный фронт Баренцева моря. (BSPF-92) // *Океанология.* 1999. Т. 39. № 2. С. 165...173.
6. Коняев К.В., Плюдеман А., Сабинин К.Д. Внутренний прилив на плато Ермак в Северном Ледовитом океане // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2000. Т. 36. № 4. С. 542...552.
7. Морозов Е.Г., Писарев С.В. Внутренний прилив в арктических широтах (Численный эксперимент) // *Океанология.* 2002. Т. 42. № 2. С. 165...173.
8. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude. *Deep-Sea Res.* 2003. Vol. 50. Pt. I, pp. 317...338.
9. Kurkina O., Talipova T. Huge internal waves in the vicinity of Spitsbergen Island (Barents Sea). *Natural Hazards Earth System Sciences.* 2011. Vol. 11, pp. 981...986.
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Hitter K. Baroclinic tides. Cambridge Univ. Press. Cambridge, 2005.
11. Шапиро Г.И., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др. Влияние внутренних волн на распределение взвешенного вещества в Печорском море // *Доклады Академии Наук.* 2000. Т. 373. № 1. С. 105...107.
12. Padman L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean. *Geoph. Res. Letters.* 2004. Vol. 31, pp. L02303.

13. Baines P.G. On internal tides generation models. *Deep Sea Res.* 1982. Vol. 24. № 3, pp. 307...338.
14. Joint U.S. – Russian Atlas of the Arctic Ocean. University of Colorado, Boulder, CO P.B. 449, 80309-0449, 1998.
15. IBCAO Beta release of Arctic Ocean bathymetry. <http://www.ngdc.noaa.gov/bathymetry/arctica/ibcaobetagrid.html>
16. Lamb K.G. Numerical experiments of internal waves generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, pp. 843...864.
17. 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® // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2012. Т. 5. № 3. С. 89...95.
18. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf. *J. Physical Oceanography.* 1997. Vol. 27. № 6, pp. 871...896.
19. 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.
- (BSPF-92)]. *Okeanologiya [Oceanology].* 1999. Vol. 39. № 2, pp. 165...173.
6. Konyaev K.V., Plyudeman A., Sabinin K.D. Vnutrenniy priliv na plato Yermak v Severnom Ledovitom okeane [Internal tide on the Yermak Plateau in the Arctic Ocean]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics].* 2000. Vol. 36. № 4, pp. 542...552.
7. Morozov Ye.G., Pisarev S.V. Vnutrenniy priliv v arkticheskikh shirotaxh (Chislennyy eksperiment) [Internal tide in the Arctic (numerical experiment)]. *Okeanologiya [Oceanology].* 2002. Vol. 42. № 2, pp. 165...173.
8. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude. *Deep-Sea Res.* 2003. Vol. 50. Pt. I, pp. 317...338.
9. Kurkina O., Talipova T. Huge internal waves in the vicinity of Spitsbergen Island (Barents Sea). *Natural Hazards Earth System Sciences.* 2011. Vol. 11, pp. 981...986.
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Hitter K. *Baroclinic tides.* – Cambridge Univ. Press. Cambridge, 2005.
11. Shapiro G.I., Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Serebryanyy A.N., Politova N.P., Akivis T.M. Vliyanie vnutrennikh voln na raspredelenie vzheshennogo veshchestva v Pechorskom more [Influence of internal waves on the distribution of particulate matter in the Pechora Sea]. *Doklady Akademii Nauk [Doklady of the Academy of Sciences].* 2000. Vol. 373. № 1, pp. 105...107.
12. Padman L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean. *Geoph. Res. Letters.* 2004. Vol. 31, pp. L02303.
13. Baines P.G. On internal tides generation models. *Deep Sea Res.* 1982. Vol. 24. № 3, pp. 307...338.
14. Joint U.S. – Russian Atlas of the Arctic Ocean. University of Colorado, Boulder, CO P.B. 449, 80309-0449, 1998.
15. IBCAO Beta release of Arctic Ocean bathymetry. <http://www.ngdc.noaa.gov/bathymetry/arctica/ibcaobetagrid.html>
16. Lamb K.G. Numerical experiments of internal waves generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, pp. 843...864.
17. Tjugin D.Ju., Kurkin A.A., Pelinovskij E.N., Kurkina O.E. Povyshenie proizvoditel'nosti programmno kompleksa dlja modelirovanija vnutrennih gravitacionnyh voln IGW Research s pomoshh'ju Intel® Parallel Studio XE 2013 [Productivity increasing

REFERENCES

1. Kalinichenko A. Barentsevo more: neft, gaz i bunker [Barents Sea: oil, gas and bunker]. *Pervyy vserossiyskiy forum «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya rossiyskogo rynka bunkerovki sudov» 26-27 iyunya 2008 g.* Sankt – Peterburg, Rossiya. http://mrbunker.ru/myfiles/forum08/Barentsevo_bunker-ing.pdf
2. Fraser N. Surfing an oil rig. *Energy Rev.* 1999. Vol. 20. № 4.
3. 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.
4. Pisarev S.V. Nizkochastotnye vnutrennie volny u kromki shelfa Arkticheskogo basseyna [Low-frequency internal waves at the shelf edge of the Arctic Basin]. *Okeanologiya [Oceanology].* 1996. Vol. 36. № 6, pp. 819...826.
5. Kozubskaya G.I., Konyaev K.V., Plyudeman A., Sabinin K.D. Vnutrennie volny na sklone zheloba ostrova Medvezhiy po dannym eksperimenta Polyarnyy front Barentseva morya. (BSPF-92) [Internal waves on the slope of the trench Bear Island from the experimental data the Polar Front in the Barents Sea.

- 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.
18. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf. J. Physical Oceanography. 1997. Vol. 27. № 6, pp. 871...896.
19. 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.

Информация об авторах

Талипова Татьяна Георгиевна, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Институт прикладной физики РАН

Куркина Оксана Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Терлецкая Екатерина Валериевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
E-mail: kterletska@gmail.com
Институт математических машин и системных проблем НАНУ
03680, Украина, г. Киев, пр-т Академика Глушкова, 42

Куркин Андрей Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор
E-mail: aakurkin@gmail.com

Рувинская Екатерина Александровна, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, ГСП-41, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

Information about the authors

Talipova Tatyana Georgievna, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Leading Researcher
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences

Kurkina Oksana Evgenyevna, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Assistant Professor
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev
Higher School of Economics National Research University Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Terletskaya Ekaterina Valerievna, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Senior Researcher
E-mail: kterletska@gmail.com
Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the NASU
Academician Glushkova Avenue 42, 03680, Kiev, Ukraine

Kurkin Andrei Aleksandrovich, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor
E-mail: aakurkin@gmail.com

Rouvinskaya Ekaterina Aleksandrovna, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Junior Researcher
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev
603950, Russian Federation, GSP-41, Nizhny Novgorod, Minin Str., 24