

УДК 519.624.2, 532.59, 534.2, 556

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ “КЛИМАТИЧЕСКОГО АТЛАСА АРКТИКИ 2004”

© 2010 г. А.Н. Соловьев^{1,2}, С.М. Хартиев^{1,3}, А.А. Соловьева^{1,3}, К.С. Григоренко^{1,3},
член-корреспондент РАН Д.Г. Матишов^{1,3}

В основе базы данных NOAA Atlas NESDIS 58 анализируется пространственно-временное изменение стратификации плотности и скорости звука в Северном море. Разработаны конечноэлементные модели распространения внутренних и звуковых волн в океане с произвольной стратификацией. С помощью этих моделей проведены расчеты характеристик волнового движения в акватории Северного моря, соответствующей нулевому меридиану.

Ключевые слова: климатический атлас, стратификация плотности, внутренние волны, звуковые волны.

Одним из основных факторов, оказывающих существенное воздействие на различные гидродинамические процессы и вертикальный обмен водных масс в северных районах Мирового океана, являются внутренние волны. Устойчивая стратификация, затрудняя турбулентный обмен, способствует развитию интенсивных внутренних волн [1, 2]. Параметры волновых процессов, обусловленных внутренними волнами, в значительной степени определяются характеристиками полей температуры и солености, которые, в свою очередь, могут изменяться в весьма широких пределах [3, 4]. Линейные модели распространения внутренних волн хорошо изучены и широко применяются в настоящее время. Современные исследования в этом направлении связаны, в частности, с описанием движения в окрестности топографических неоднородностей дна, описанием волновых движений в жидкости с микроструктурой или специфической стратификацией плотности и температуры, с изучением влияния, в том числе внутренних волн, на процессы зарождения турбулентности и перемешивания. Рассматриваются усложненные модели, в том числе нелинейные. Так, в [5] проведен обзор методов экспериментального измерения и численных методов определения турбулентности и смешивания в прибрежной зоне океана. В работе [6]

рассматривается генерация внутренних волн и их структура в окрестности подводных гор, которые моделируются круговыми цилиндрами. Задача решается в линейной постановке в цилиндрической системе координат, строятся конические поверхности, ограничивающие разнонаправленные потоки, вычисляются энергетические характеристики волн, связанных с отдельными горами, грядой гор и континентальными склонами. Работа [7] посвящена изучению потока энергии внутренних волн, образованных приливно-отливными течениями в окрестности топографических неоднородностей дна. В [8] на основе модели [9] исследуется изменение спектра и географическое перераспределение внутренних волн на основе реальной геометрической модели мирового океана. В работе [10] в рамках линейной модели рассматриваются внутренние волны в газонасыщенной жидкости; присутствие пузырьков и их непрерывное распределение приводит к изменению частоты плавучести, расчеты с такой эффективной частотой указывают на возможное изменение свойств внутреннего волновода. В [11] анализируются результаты температурных наблюдений с высокой степенью разрешения в Северном море, которые указывают на существование пикноклинов, приводящих к возникновению волн в достаточно узких каналах, нарушающих обычное перемешивание и турбулентный обмен питательными веществами поперек пикноклина. В работе [12] рассматриваются кинематические и энергетические характеристики внутренних волн при стратификации с неоднородностью в центре глубины, которая связывается с экваториальным течением. Выделяются три класса неустойчивых нормальных мод, один из которых ранее не был описан. Резуль-

¹ Южный федеральный университет, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, тел. (863) 297-52-82, e-mail: soloviev@math.rsu.ru.

² Донской государственный технический университет, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, тел. (863) 238-15-09, e-mail: solovievan@km.ru.

³ Южный научный центр Российской академии наук, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

таты вычислительных экспериментов сравниваются с результатами измерений в экваториальной области. В работе [13] на основе линеаризованных уравнений изучаются конические пучки трехмерных периодических внутренних волн и двух типов пограничных слоев, распространяющихся в экспоненциально стратифицированной вязкой жидкости, при малой вязкости строятся асимптотические соотношения. В работе [14] в приближении Бусинеска анализируется параметрическая неустойчивость внутренних волн, что приводит к ее турбулентности и смешиванию. В [15] на основе нелинейной модели (резонансная триадная модель) исследуются явления обмена энергии между разными модами внутренних волн и эволюция энергетического спектра большого числа волн. В работе [16] рассматривается нелинейное взаимодействие внутренних волн, которое влияет на изменение градиентов плотности по глубине океана. В [17] с помощью уравнений Навье–Стокса изучается стратификация плотности, возникающая при распространении волн большой амплитуды, для жидкости, начальная стратификация плотности которой имеет линейное распределение в верхнем мелком слое и постоянна для остального объема. При решении обратных задач идентификации стратификации плотности или источников волн в качестве дополнительной информации используются спутниковые или аэроснимки в различных диапазонах спектра. Так, в работе [18] описаны особенности аэроснимков внутренних волн в инфракрасном диапазоне, отмечаются различия в температуре различных участков волн, в частности фронтов, отмечается возможность использования этих снимков в задаче определения характеристик внутренних волн. Акустические волны с учетом их отражения от поверхности и дна изучаются в [19].

В данной работе на основе климатического атласа Арктики [20] изучается влияние пространственных и сезонных изменений полей температуры и солёности на вертикальные профили плотности скорости звука, а также характеристики внутренних гравитационных и звуковых волн, распространяющихся в акватории Северного моря, соответствующей нулевому меридиану. Проводимое исследование состоит из трех основных этапов.

ДАННЫЕ

На первом этапе осуществляется осреднение величин температуры T и солёности S по одноградусным квадратам, в форме которых организованы данные, содержащиеся в информационной базе [20].

На втором этапе с помощью стандартных эмпирических формул, основанных на комбинациях

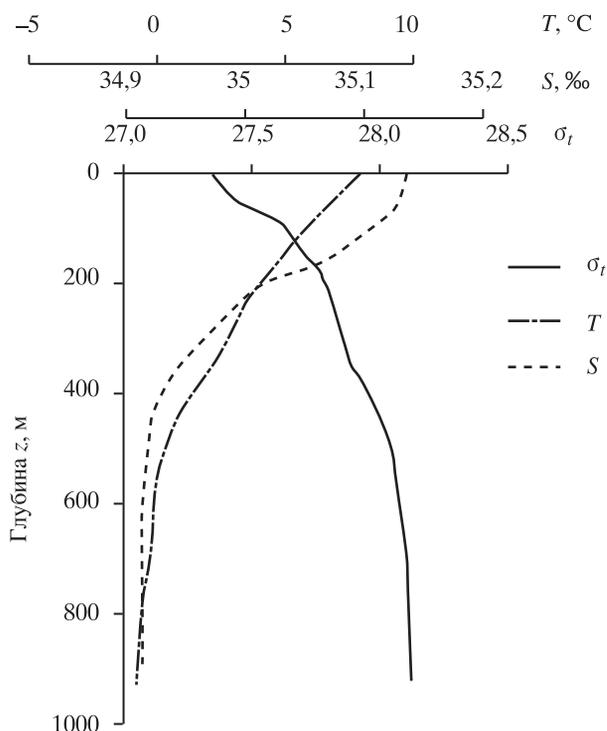


Рис. 1. Вертикальные распределения температуры T , солёности S , плотности σ_t

величин T , S (рис. 1), P_0 (гидростатическое давление), рассчитываются вертикальные (по глубине z) профили плотности [3] ($\sigma_t = (\rho_0(z) - 1) \cdot 10^3$ (рис. 1), $\rho_0(z)$ – плотность в г/см^3). Представленные на рисунке 1 распределения вычислены для квадрата $65\text{--}66^\circ$ с.ш. $0\text{--}01^\circ$ в.д., данные относятся к июню 2004 г. Такая методика позволяет с помощью данных атласа [20] для рассматриваемой акватории Северного моря проанализировать пространственные (рис. 2) и сезонные изменения пикноклина и подводного звукового канала (ПЗК). На рисунке 2 представлены пространственные изменения вертикальных профилей плотности σ_t и скорости звука [1] c для трех квадратов.

Из рисунка 2а видно, что в июне при движении вдоль нулевого меридиана с севера на юг происходит подъём сезонного пикноклина (СП), уменьшение его толщины и среднего градиента плотности (размывание пикноклина). В частности, на широте $65\text{--}66^\circ$ слой скачка плотности практически отсутствует. Обратная картина в это же время года (в июне) наблюдается для ПЗК (рис. 2б). При движении вдоль нулевого меридиана с севера на юг ось звукового канала опускается. В самом северном квадрате ($80\text{--}81^\circ$ с. ш., $0\text{--}01^\circ$ в.д.), где ПЗК в отличие от СП наиболее ярко выражен, она находится на глубине порядка 700 м.

Рассчитанные сезонные распределения плотности (лето, осень, зима) в квадрате $65\text{--}66^\circ$ с.ш., $0\text{--}01^\circ$ в.д. показывают, что в летний период существ-

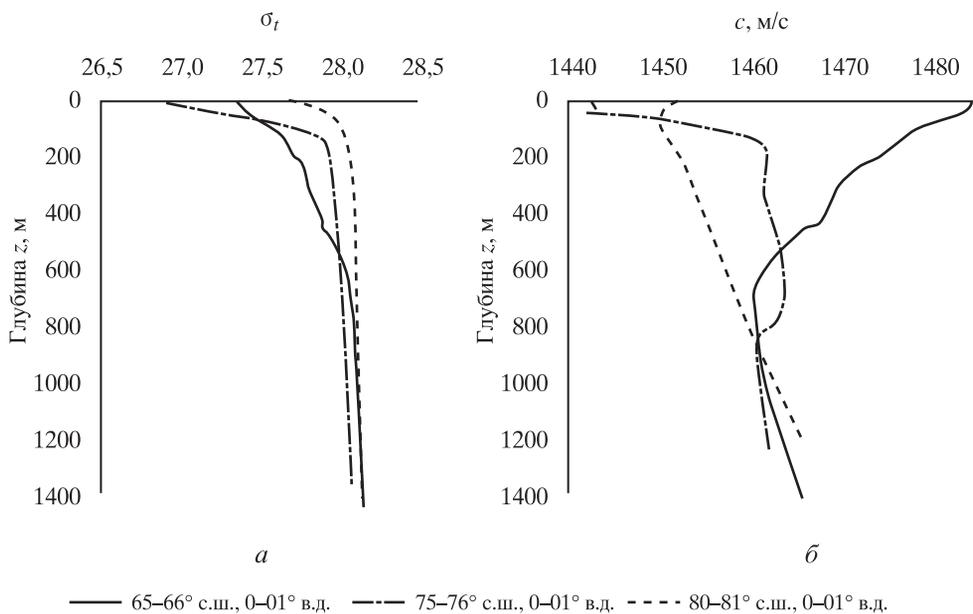


Рис. 2. Пространственные распределения плотности σ_t и скорости звука c в июне

вует сезонный пикноклин, имеющий нижнюю границу на глубине порядка 200 м. Толщина и перепад плотности СП в данном районе уменьшаются в осенний период и практически исчезают в зимние месяцы.

Разработанная программа позволяет использовать базу данных [20] для расчета гидрологических характеристик, необходимых при исследовании параметров внутренних волн.

МОДЕЛЬ

На третьем этапе исследований изучаются характеристики внутренних гравитационных и звуковых волн в непрерывно стратифицированном море. Анализ параметров волнового движения осуществляется с использованием рассчитанных ранее вертикальных профилей $\rho_0(z)$ и $c(z)$ (рис. 1, 2). Исследования волновых процессов проводятся в рамках линейной теории гидродинамики идеальной жидкости.

Выберем начало прямоугольной системы координат $Oxuz$ на невозмущенном уровне свободной морской поверхности, ось Oz направим вертикально вверх. Линеаризованные уравнения Эйлера и граничные условия, описывающие динамику свободных внутренних гравитационных волн, представим в виде [21, 22]

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad } p + \mathbf{F}, \quad \text{div } \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{d\rho_0}{dz} v_z = 0,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho_0 g v_z = 0 \text{ при } z = 0, \quad v_z = 0 \text{ при } z = -H, \quad (2)$$

$\mathbf{V} = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор скорости волновых возмущений, $\mathbf{F} = \left(f v_y, -f v_x, -\frac{g\rho}{\rho_0} \right)$ – вектор массовых сил,

p, ρ – волновые возмущения давления и плотности соответственно, g – ускорение свободного падения, $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, φ – широта, H – глубина моря.

Распространение звуковой волны в непрерывно стратифицированном море постоянной глубины H описывается волновым уравнением [1]

$$\Delta p_1 - \frac{1}{c^2(z)} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями

$$p_1 = 0 \text{ при } z = 0, \quad \frac{\partial p_1}{\partial z} = 0 \text{ при } z = -H, \quad (4)$$

p_1 – звуковое давление, Δ – оператор Лапласа.

Исследуем гармонические внутренние гравитационные и звуковые волны. Не нарушая общности рассуждений, будем считать, что ось Ox ориентирована в направлении распространения волновых возмущений. Тогда решения краевых задач (1)–(4) можно представить в форме

$$[v_x, v_y, v_z, p, \rho] = [U(z), V(z), W(z), P(z), R(z)] \times \exp(i(mx - \sigma t)), \quad (5)$$

$$p_1 = P_1(z) \exp(i(kx - \omega t)), \quad (6)$$

здесь m, k и σ, ω – соответственно волновые числа и частоты, характеризующие внутренние (m, σ) и звуковые (k, ω) волны.

Подставляя выражения (5), (6) в уравнения и граничные условия (1)–(4), получаем после несложных

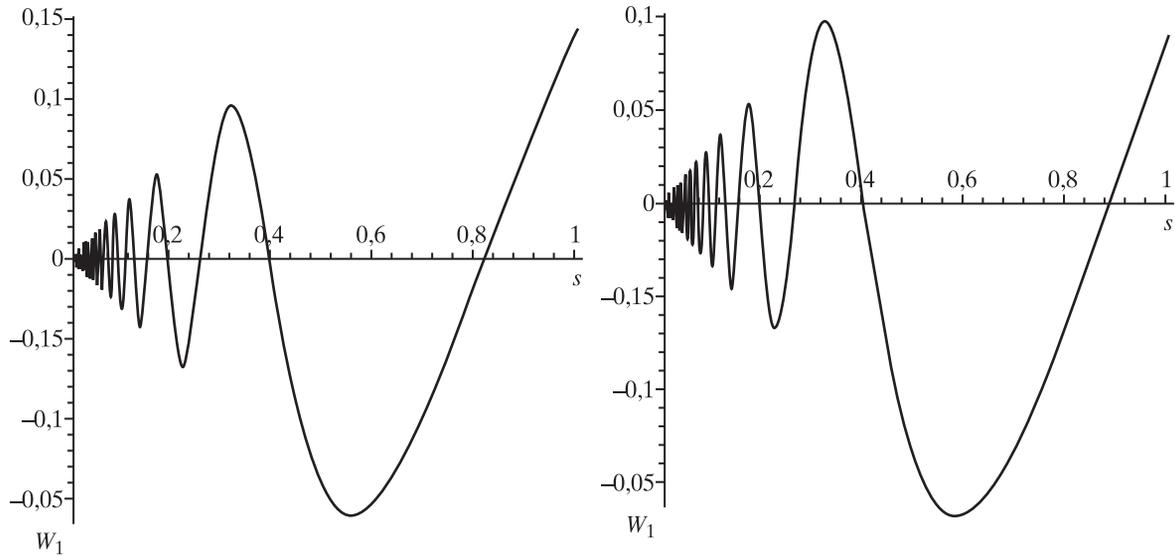


Рис. 3. Нахождение корней дисперсионного уравнения ($\mu = 1, s \in (0, 1)$)

преобразований для неизвестных функций $W(z)$ и $P_1(z)$ две однородные краевые задачи вида

$$W'' - \frac{N^2(z)}{g} W' - m^2 \frac{\sigma^2 - N^2(z)}{\sigma^2 - f^2} W = 0, \quad (7)$$

$$W' - \frac{gm^2}{\sigma^2 - f^2} W = 0 \text{ при } z = 0, \quad W = 0 \text{ при } z = -H, \quad (8)$$

$$P_1'' - k^2 P_1 + \frac{\omega^2}{c^2(z)} P_1 = 0, \quad (9)$$

$$P_1 = 0 \text{ при } z = 0, \quad P_1' = 0 \text{ при } z = -H, \quad (10)$$

где $N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz}$ – частота Вейселя–Брента.

В монографиях [1, 21, 22] содержится обзор работ, посвященных решению спектральных краевых задач (7)–(10) с подробным описанием схем используемых аналитико-численных методов.

В работе при численной реализации методов решения спектральных задач (7)–(8), (9)–(10) осуществляется переход к безразмерным величинам:

$$\zeta = \frac{z}{H}, \quad s = \sigma \sqrt{\frac{H}{g}}, \quad \mu = mH, \quad L = kH, \quad (U_1, V_1, W_1) = \frac{(U, V, W)}{\sqrt{gH}}, \quad \omega_1 = \frac{\omega h}{c(0)}, \quad p_1 = \frac{P_1}{P_a},$$

где P_a – атмосферное давление (1 атм).

МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ

Математическая модель задачи содержит данные о стратификации плотности по глубине и производную от этого распределения по пространственной

координате. Как отмечалось выше, эти данные получены путем осреднения дискретных результатов измерений, т.е. представляют собой функциональную зависимость, заданную в конечном наборе точек по глубине канала распространения волн. Как известно из [23], нахождение производной в этом случае является некорректной задачей, поэтому для решения практических задач первым шагом является удачная аппроксимация функции стратификации плотности и ее производной. В работе использовались сглаженные данные распределения плотности и скорости звука (рис. 1, 2), в программной реализации это соответствовало приближению кубическими сплайнами. Разработанные программы позволяют учитывать и тонкую структуру стратификации, используя при этом различные способы аппроксимации плотности – линейные, квадратичные, кубические и др., некоторые результаты численных экспериментов для этих аппроксимаций представлены ниже.

Для решения спектральных задач (7)–(10) традиционно [1, 21, 22] применяется метод сведения их к задачам Коши с последующим применением разностных методов и метода пристрелки. В настоящей работе реализация такого подхода осуществлена в среде Maple. При этом в случае отсутствия диссипации дисперсионные кривые строятся на основе метода пристрелки для действительных значений вертикальной компоненты скорости (на рис. 3 пересечение кривой с горизонтальной осью, слева – приближение твердой крышки, справа – линеаризованное условие свободной поверхности).

Основные численные расчеты в работе выполнены с помощью решения однородных краевых задач методом конечных элементов (МКЭ) как обоб-

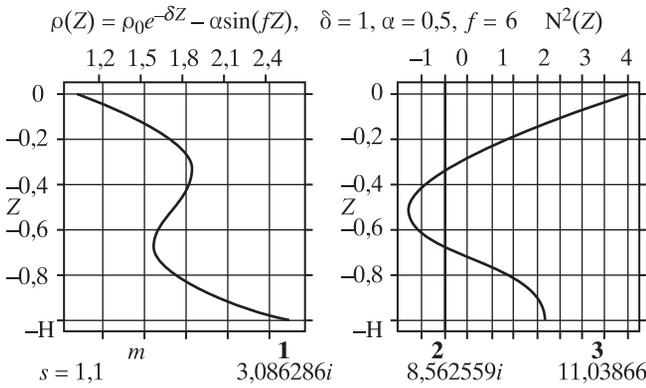


Рис. 4. Корни дисперсионного уравнения при неустойчивой стратификации

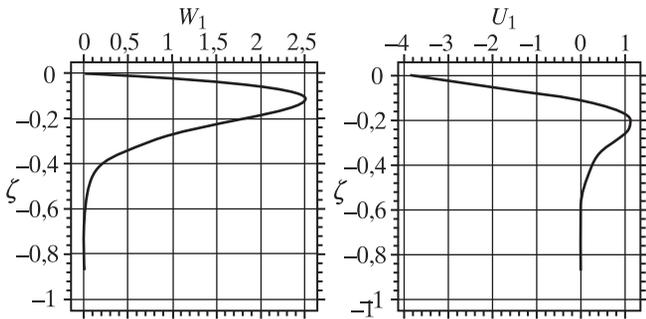


Рис. 5. Первая мода

щенных задач на собственные значения (параметр σ задавался, а параметр m^2 находился из решения задачи модального анализа). При этом в случае граничного условия свободной поверхности спектральный параметр входит не только в уравнение, но и в граничное условие. Реализованная программа допускает как аналитическое задание плотности, так и использование сплайнов при ее задании в наборе точек по глубине. Проведенные тестовые расчеты показали хорошее совпадение характеристик внутренних волн, найденных как первым, так и вторым способом.

Тестовые численные расчеты показали, что если в случае постоянной частоты плавучести существует частотный интервал, в котором присутствуют только действительные корни дисперсионного уравнения [22], то при неустойчивой стратификации действительные и мнимые корни существуют одновременно. Этот факт иллюстрируется рисунком 4, на котором для указанной стратификации плотности (слева) и частоты плавучести (справа) при $s = 1,1$ первый действительный корень является третьим по абсолютной величине, тогда как первые два чисто мнимые. На рисунке 5 представлены найденные формы профилей вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) компонент вектора скорости для первой действительной моды.

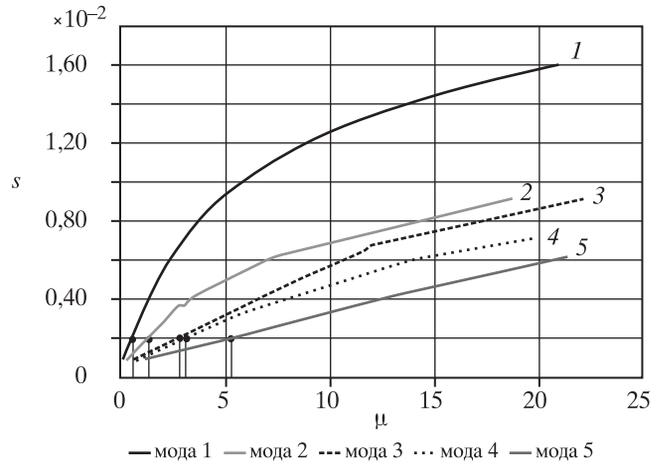


Рис. 6. Дисперсионные кривые внутренних волн

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По расчетам, проведенным на основе реализованных программ, построены дисперсионные кривые внутренних волн. Так, на рисунке 6 эти кривые соответствуют стратификации плотности, представленной на рисунке 1, для которой проведена аппроксимация кубическими сплайнами (цифры на рис. 6 соответствуют номеру моды μ). В таблице 1 приведены характеристики волн для значений, отмеченных на рисунке 6 темными кружками.

На рисунках 7, 8 для отмеченной частоты представлены моды вертикальной и горизонтальной составляющей скорости для приближения твердой крышки (рис. 7) и свободной поверхности (рис. 8). Для этой же безразмерной частоты проведены расчеты для приближения плотности линейными сплайнами при устойчивой стратификации (неубывающая), волновые числа для пяти первых мод представлены в таблице 2. Наиболее существенное различие в четвертой моде.

На рисунке 9 представлена эволюция первой моды при движении по дисперсионной кривой. С ростом частоты вертикальные и горизонтальные движения локализуются в канале, высота которого составляет приблизительно пятую часть общей глубины, и максимум амплитуд вертикальной составляющей скорости находится приблизительно на глубине, составляющей 0,3 от общей глубины. Такая трансфор-

Таблица 1. Характеристики внутренних волн

Мода	Период (ч)	Фазовая скорость, м/с	Длина волны, км
1	4,6426	0,1714	28,6468
2		0,0770	12,8749
3		0,0371	6,1957
4		0,0337	5,6396
5		0,0196	3,2786

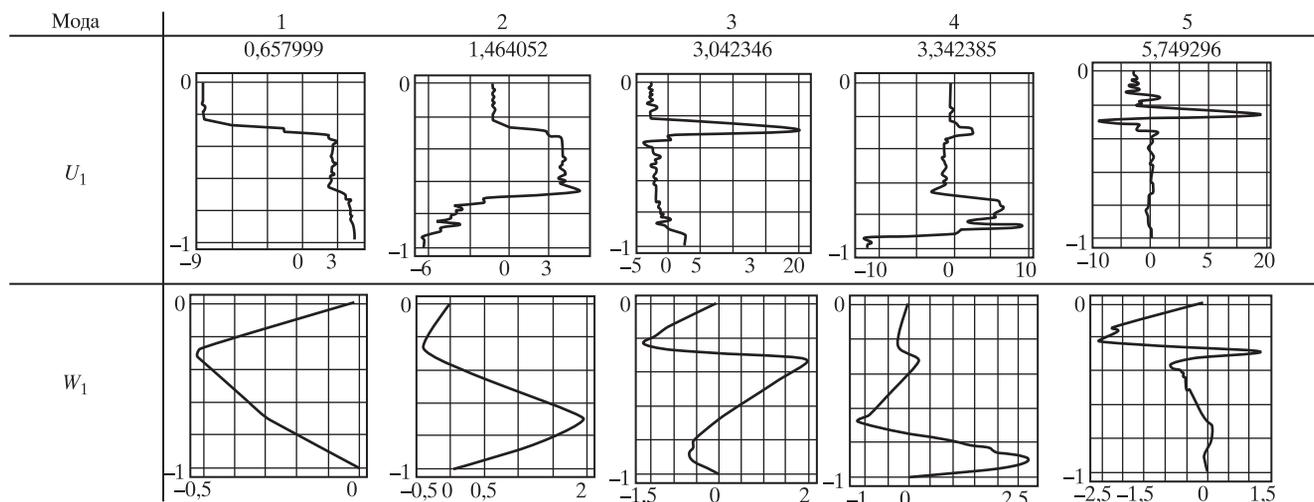


Рис. 7. Моды внутренних волн (твердая крышка), $s = 2,08 \cdot 10^{-3}$

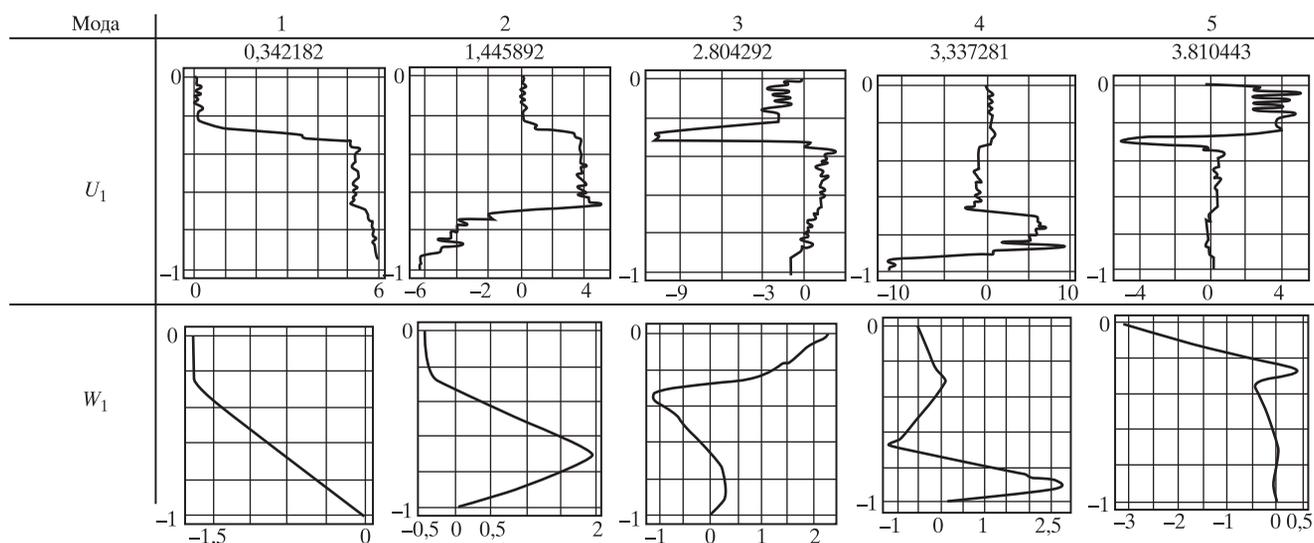


Рис. 8. Моды внутренних волн (свободная поверхность), $s = 2,08 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Кубические и линейные сплайны ($s = 2,08 \cdot 10^{-3}$)

Сплайны	1	2	3	4	5
Кубический	0,657999	1,464052	3,042346	3,342385	5,749296
Линейный	0,626325	1,407670	2,859791	4,044695	5,529744

мация форм связана со стратификацией плотности, у которой в указанном районе градиент наибольший по сравнению с остальными участками.

Отмеченные на рисунке 9 темные точки, для которых изображены формы движений, соответствуют данным, представленным в таблице 3.

Применение разработанной конечноэлементной программной реализации позволяет определять характеристики и формы мод звуковых волн в океане. Так, на рисунке 10 представлены профиль скорости

звука (слева), частоты и формы звукового давления для первых трех мод.

На рисунке 11 для этого же распределения скорости звука представлена эволюция формы давления $p_1(z)$ первой звуковой моды с увеличением безразмерных волнового числа L и частоты ω_1 .

Таблица 3. Точки на первой дисперсионной кривой

s	$0,20 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$
μ	0,627516	8,780083	18,83626

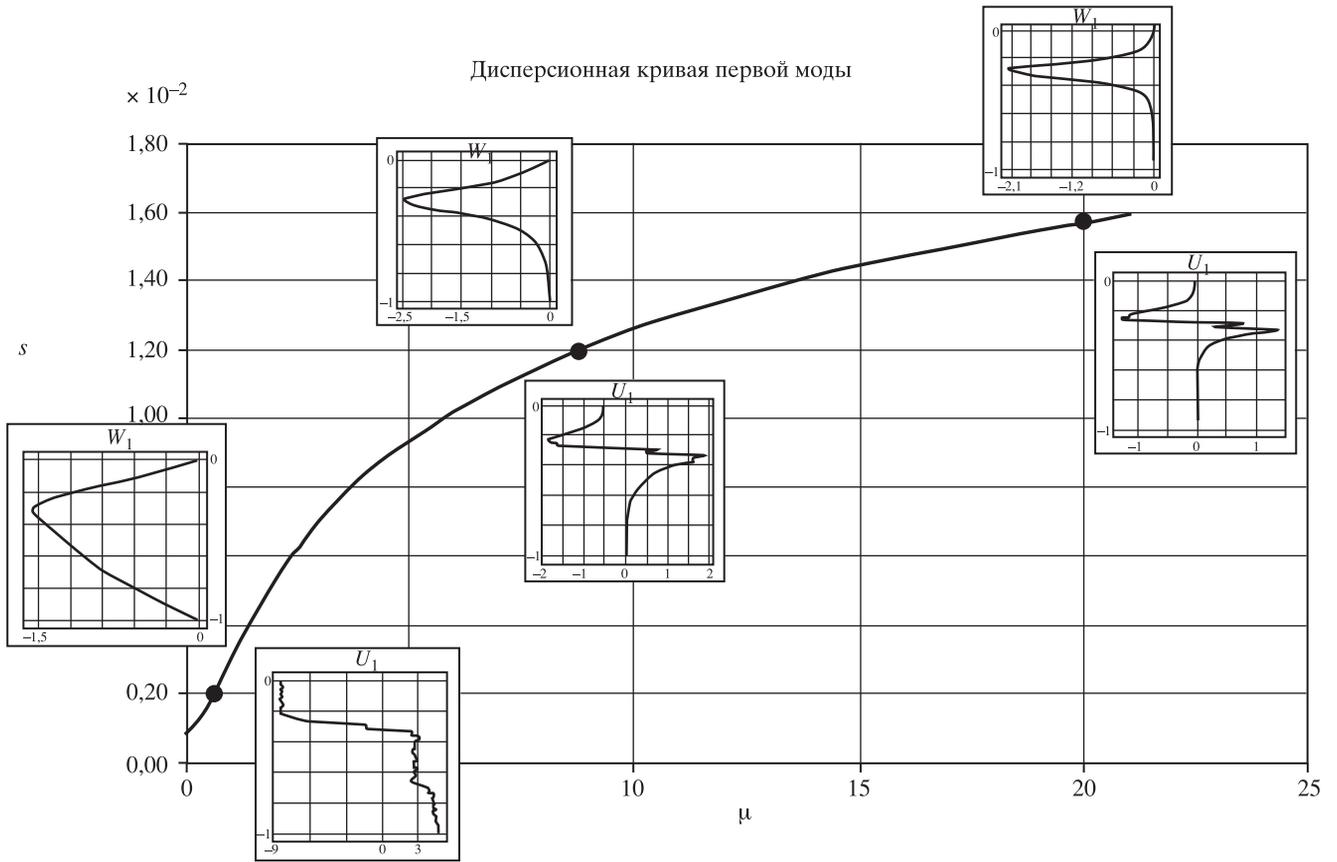


Рис. 9. Эволюция форм движения на примере первой моды (твердая крышка)

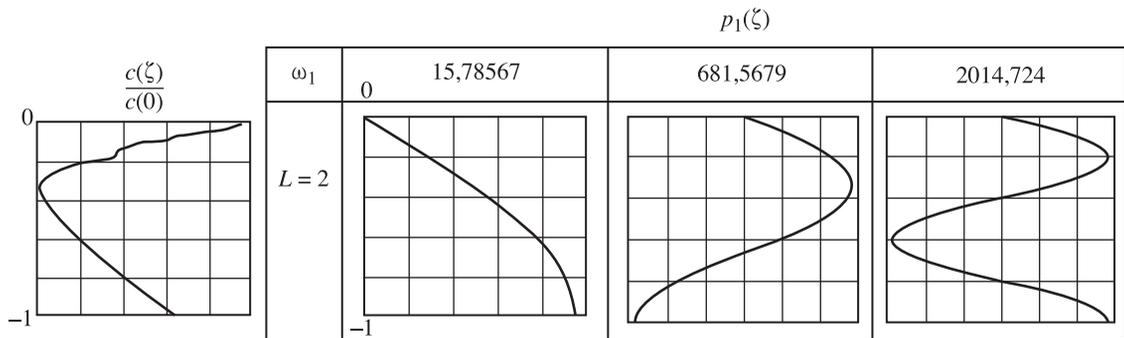


Рис. 10. Распределение скорости звука $c(\zeta)$ и звуковые моды давления $p(\zeta)$

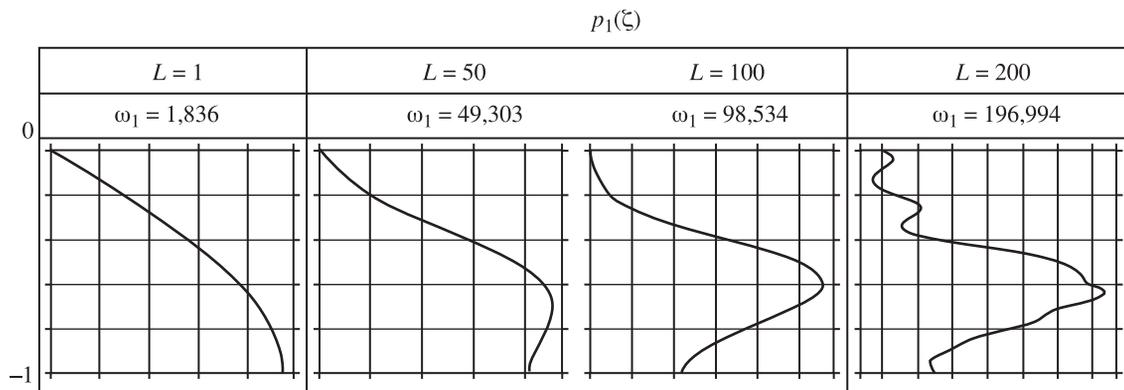


Рис. 11. Эволюция первой звуковой моды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика, позволяющая на основе базы данных климатического атласа морей Арктики 2004 [20] рассчитывать характеристики волновых процессов в акватории северной части Мирового океана. На примере Северного моря показано существенное влияние сезонных изменений полей температуры и солёности на параметры внутренних гравитационных и звуковых волн. Использование данной методики совместно с базой данных делает возможным создание атласа основных характеристик внутренних гравитационных и звуковых волн для различных районов северной части Мирового океана (т.е. по аналогии с [20] осуществить районирование основных параметров волнового движения, связанного с акустическими и внутренними волнами). Разработаны алгоритмы и программы расчёта характеристик внутренних волн, позволяющие в режиме on-line для любого выбранного района океана по данным стандартной гидрологии рассчитать периоды и длины гравитационных и акустических волн и определить распределение по глубине амплитуд скоростей волновых течений. Набор собственных мод даёт возможность описать гидродинамику свободных и вынужденных внутренних волн, генерируемых любыми факторами. Разработанные методы могут быть использованы при решении обратных задач идентификации источников колебаний и реконструкции стратификации плотности в океане.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны академику Г.Г. Матишову за внимание и поддержку работы, а также выражают благодарность профессору Э.Н. Потетюнюк и д.г.н. С.В. Бердникову за обсуждение и поддержку работы на различных этапах ее подготовки. Отдельная благодарность И. Смоляру (Лаборатория морского климата, НОАА, США) за консультации по базе данных, использованной в работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта “Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области океанологии” ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика океана. Том 2: Гидродинамика океана / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1978. 456 с.
2. Хартиев С.М. Влияние турбулентного обмена и плотностной стратификации на устойчивость внутрен-

- них волн // Теоретические исследования волновых процессов в океане. Севастополь: Изд-во МГИ АН УССР, 1983. С. 83–90.
3. Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства морской воды: Уч. пос. М.: МАКС Пресс, 2005. 216 с.
 4. Матишов Г.Г., Зуев А.Н., Голубев В.А., Денисов В.В. К проблеме построения океанологических климатических CD-атласов (на примере морей Северо-Запада России) // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 80–87.
 5. Burchard H, Craig P.D, Gemmrich J.R., Van Haren H., Mathieu P.P., Meier H.E.M., Smith W.A.M.N., Prandke H., Rippeth T.P., Skillingstad E.D., Smyth W.D., Welsh D.J.S., Wijesekera H.W. Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 76. Issue 4. P. 399–442.
 6. Baines P.G. Internal tide generation by seamounts // Deep-Sea Research. Part I. 2007. Vol. 54. Issue 9. P. 1486–1508.
 7. Lamb K.G. Energy and pseudoenergy flux in the internal wave field generated by tidal flow over topography // Continental Shelf Research. 2007. Vol. 27. Issue 9. P. 1208–1232.
 8. Simmons H.L. Spectral modification and geographic redistribution of the semi-diurnal internal tide // Ocean Modelling. 2008. Vol. 21. Issues 3–4. P. 126–138.
 9. Hallberg R., Rhines P. Buoyancy-driven circulation in an ocean basin with isopycnals intersecting the sloping boundary // J. Phys. Oceanogr. 1996. Vol. 26. Issue 9. P. 914–940.
 10. Grimshaw R.H.J., Khusnutdinova K.R., Ostrovsky L.A. The effect of a depth-dependent bubble distribution on the normal modes of internal waves: quasistatic approximation // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2008. Vol. 27. Issue 1. P. 24–41.
 11. Van Haren H. Internal waves near the buoyancy frequency in a narrow wave-guide // Journal of Sea Research. 2005. Vol. 53. Issue 3. P. 121–129.
 12. Smyth W.D., Moum J.N. Shear instability and gravity wave saturation in an asymmetrically stratified jet // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2002. Vol. 35. Issue 3. P. 265–294.
 13. Vasil'yev A.Yu., Chasheciikin Yu.D. The generation of beams of three-dimensional periodic internal waves in an exponentially stratified fluid // J. Appl. Maths. Mechs. 2003. Vol. 67. № 3. P. 397–405.
 14. Staquet C. Internal gravity waves: parametric instability and deep ocean mixing // C. R. Mecanique. 2007. Vol. 335. Issues 9–10. P. 665–678.
 15. Ibragimov R. Resonant triad model for studying evolution of the energy spectrum among a large number of internal waves // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2008. Vol. 13. Issue 3. P. 593–623.
 16. Bouruet-Aubertot P., Sommeria J., Le Cann B., Koudella C.R. Intermittency of vertical density gradients at fine scale and link with mixing processes // Deep-Sea Research. Part II. 2004. Vol. 51. Issues 25–26. P. 2919–2941.

17. *Wood D.J., Grue J.* Modelling of high amplitude internal waves integrating the primitive (Navier – Stokes) equations // *Applied Ocean Research*. 2002. Vol. 24. Issue 6. P. 331–340.
18. *Marmorino G.O., Smith G.B., Bowles J.H., Rhea W.J.* Infrared imagery of ‘breaking’ internal waves // *Continental Shelf Research*. 2008. Vol. 28. Issue 3. P. 485–490.
19. *Белянкова Т.И., Анджинович И.Е., Шейдаков Д.Н., Шавыкин А.А., Калинин В.В.* К расчету амплитуды первой волны давления морских пневмоизлучателей сейсмических сигналов // *Вестник ЮНЦ*. 2007. Т. 3. № 2. С. 3–11.
20. *Матишов Г., Зуев А., Голубев В., Адров Н., Тимофеев С., Карамушко О., Павлова Л., Браунштейн А., Фадякин О., Бузань А., Моисеев Д., Смоляр И., Локкарини Р., Татушко Р., Бойер Т., Левитус С.* NOAA Atlas NESDIS 58. Климатический атлас морей Арктики 2004. Часть I. База данных Баренцева, Карского, Лаптевых и Белого морей – океанография и морская биология. World Data Center for Oceanography, Silver Spring. International Ocean Atlas and Information Series. Volume 9.
21. *Краусс В.* Внутренние волны. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 272 с.
22. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 264 с.
23. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.

INTERNAL GRAVITY AND ACOUSTICAL WAVES PARAMETERS ANALYSIS BASED ON “THE CLIMATIC ATLAS OF THE ARCTIC REGIONS SEAS 2004”

**A.N. Soloviev, S.M. Khartiev, A.A. Solovieva, K.S. Grigorenko,
Corresponding Member RAS D.G. Matishov,**

Based on NOAA Atlas NESDIS 58 data, the time-space modification of stratification of density and velocity of the sound in the Northern Sea is analyzed. FEM models of distribution of internal and acoustical waves at the ocean with the arbitrary stratification are designed. Calculations of performances of waves motion in the water area of the Northern Sea corresponding to zero meridian are carried out with the help of the above-named models.

Key words: Climatic Atlas; density stratification; internal waves; sound waves.

REFERENCES

1. *Fizika okeana. Tom 2: Gidrodinamika okeana. [Physics of the ocean. Volume 2: Hydrodynamics of the Ocean].* 1978. A.S. Monin (Ed.). Moscow, Nauka: 456 p. (In Russian).
2. Khartiev S.M. 1983. [Effect of turbulent exchange and density stratification on the stability of the internal waves]. In: *Teoreticheskie issledovaniya volnovykh protsessov v okeane. [Theoretical studies of wave processes in the ocean].* Sevastopol, MGI AS USSR: 83–90. (In Russian).
3. Mamaev O.I. 1987. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana. [Thermohaline analysis of waters of the oceans].* Leningrad, Gidrometeoizdat: 296 p. (In Russian).
4. Matishov G.G., Zuev A.N., Golubev V.A., Denisov V.V. 2000. [On the problem of oceanographic climatic CD-atlases (on example of seas of North-West Russia)]. *Optika atmosfery i okeana.* 13(1): 80–87. (In Russian).
5. Burchard H., Craig P.D., Gemmrich J.R., Van Haren H., Mathieu P.P., Meier H.E.M., Smith W.A.M.N., Prandke H., Rippeth T.P., Skyllingstad E.D., Smyth W.D., Welsh D.J.S., Wijesekera H.W. 2008. Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing. *Progress in Oceanography.* 76(4): 399–442.
6. Baines P.G. 2007. Internal tide generation by seamounts. *Deep-Sea Research. Part I.* 54(9): 1486–1508.
7. Lamb K.G. 2007. Energy and pseudoenergy flux in the internal wave field generated by tidal flow over topography. *Continental Shelf Research.* 27(9): 1208–1232.
8. Simmons H.L. 2008. Spectral modification and geographic redistribution of the semi-diurnal internal tide. *Ocean Modelling.* 21(3–4): 126–138.
9. Hallberg R., Rhines P. 1996. Buoyancy-driven circulation in an ocean basin with isopycnals intersecting the sloping boundary. *J. Phys. Oceanogr.* 26(9): 914–940.
10. Grimshaw R.H.J., Khusnutdinova K.R., Ostrovsky L.A. 2008. The effect of a depth-dependent bubble distribution on the normal modes of internal waves: quasistatic approximation. *European Journal of Mechanics – B/Fluids.* 27(1): 24–41.
11. Van Haren H. 2005. Internal waves near the buoyancy frequency in a narrow wave-guide. *Journal of Sea Research.* 53(3): 121–129.
12. Smyth W.D., Moum J.N. 2002. Shear instability and gravity wave saturation in an asymmetrically stratified jet. *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* 35(3): 265–294.
13. Vasil'yev A.Yu., Chasheciikin Yu.D. 2003. The generation of beams of three-dimensional periodic internal waves in an exponentially stratified fluid. *J. Appl. Maths. Mech.* 67(3): 397–405.
14. Staquet C. 2007. Internal gravity waves: parametric instability and deep ocean mixing. *C. R. Mecanique.* 335(9–10): 665–678.
15. Ibragimov R. 2008. Resonant triad model for studying evolution of the energy spectrum among a large number of internal waves. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation.* 13(3): 593–623.
16. Bouruet-Aubertot P., Sommeria J., Le Cann B., Koudella C.R. 2004. Intermittency of vertical density gradients at fine scale and link with mixing processes. *Deep-Sea Research. Part II.* 51(25–26): 2919–2941.
17. Wood D.J., Grue J. 2002. Modelling of high amplitude internal waves integrating the primitive (Navier – Stokes) equations. *Applied Ocean Research.* 24(6): 331–340.
18. Marmorino G.O., Smith G.B., Bowles J.H., Rhea W.J. 2008. Infrared imagery of ‘breaking’ internal waves. *Continental Shelf Research.* 28(3): 485–490.
19. Matishov G., Zuev A., Golubev V., Adrov N., Timofeev S., Karamushko O., Pavlova L., Braunshteyn A., Fadyakin O., Buzan' A., Moiseev D., Smolyar I., Lokarnini R., Tatushko R., Boyer T., Levitus S. *NOAA Atlas NESDIS 58. Climatic Atlas of the Arctic seas, 2004. Part I. Database of the Barents, Kara, Laptev, and White Seas – oceanography and marine biology.* World Data Center for Oceanography, Silver Spring. International Ocean Atlas and Information Series. Volume 9.

20. Belyankova T.I., Andzhikovich I.E., Sheydakov D.N., Shavykin A.A., Kalinchuk V.V. 2007. [To calculation of amplitude of the first wave of pressure of seismic signals sea pneumoradiators]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 3(2): 3–11. (In Russian).
21. Krauss V. 1968. *Vnutrennie volny*. [*Internal waves*]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 272 p. (In Russian).
22. Cherkesov L.V., Ivanov V.A., Khartiev S.M. 1992. *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriyu voln*. [*Introduction to the theory of hydrodynamics and waves*]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat: 264 p. (In Russian).
23. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. 1986. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach*. [*Methods of solution of incorrect problems*]. Moscow, Nauka: 288 p. (In Russian).