

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

САВОСЬКИН Владимир Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ВОЛН,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ОКЕАНЕ
ДВИЖУЩИМИСЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ
ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ**

04.00.22—геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь—1992

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816241 (M)

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

САВОСЬКИН Владимир Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
В ОКЕАНЕ ДВИЖУЩИМИСЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ
ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

04.00.22 - геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь - 1992

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте
АН Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук:
С. Ф. Доценко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ю. Э. Алешков,
доктор физико-математических наук
Н. А. Пантелеев.

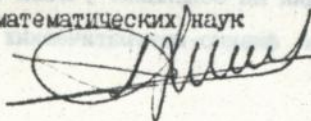
Ведущая организация: Институт гидромеханики АН Украины
(г. Киев).

Защита состоится 26 ноября 1992 г. на заседании специали-
зированной совета Д 016.01.01 при Морском гидрофизическом
институте АН Украины (335 000, г. Севастополь, ул. Капитан-
ская, 2).

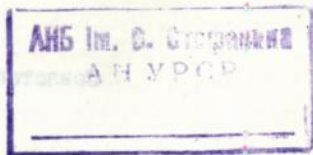
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского
гидрофизического института АН Украины (335 000, г. Севасто-
поль, ул. Капитанская, 2).

Автореферат разослан "___" октября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук



А. М. Суворов



Актуальность темы

Теория волновых движений океана является одним из актуальных направлений геофизической гидродинамики, представляющих интерес для физики моря, решения прикладных и народнохозяйственных задач. В значительной степени это относится к анализу вынужденных волн в Мировом океане.

Исследования по генерации поверхностных и внутренних волн движущимися возмущениями переменной интенсивности, которым посвящена данная работа, развивались по пути усложнения гидродинамических моделей. Первые работы касались возбуждения плоских волн гармоническими по времени поверхностными и подводными возмущениями в потоках однородной жидкости [P. Kaplan (1957), L. Debnath, S. Rosenblat (1969), Л. В. Черкесов (1970)]. Были рассмотрены возможные типы волновых режимов, установлен факт излучения волн в область перед генераторами. Показано, что изменению характера волнового движения соответствуют определенные критические значения параметров возмущения и среды.

Плоские волны, генерируемые в двухслойной жидкости при движении по ее поверхности гармонических по времени давлений, анализировались Н. Н. Абрашиной (1971), А. К. Pramanik (1974). Было показано, что неоднородность жидкости приводит к появлению новых волновых режимов и увеличению числа критических значений параметров модели. Как и поверхностные, внутренние волны могут генерироваться перед и за движущимся возмущением. Обобщение на случай потока непрерывно стратифицированной жидкости постоянной глубины выполнено С. Ф. Доценко (1980).

Значительно более сложными для изучения являются пространственные волновые процессы. Исследования по генерации трехмерных поверхностных и внутренних волн перемещающимися и осциллирующими возмущениями можно рассматривать как дальнейшее развитие классических задач по корабельным волнам.

Пространственные поверхностные волны, возбуждаемые перемещающимися гармоническими по времени атмосферными давлениями и подводными источниками, рассматривались в работах Л. Н. Сретенского (1954), С. С. Войта (1963), L. Debnath (1969), А. А. Зай-

цева (1971), В. С. Федосенко (1971), Л. В. Черкесова (1973) для жидкостей конечной и бесконечной глубины. А. Е. Букатовым и А. А. Ярошенко (1986) анализ проведен с учетом ледяного покрова. Особенности генерации волн при колебаниях движущегося возмущения с критической частотой изучены в работах L. Chee-Seng (1981) и G. Dagan, T. Milloh (1982).

Поверхностные и внутренние волны аналогичного типа возникают при нестационарных движениях генератора, когда, например, тело перемещается с периодически изменяющейся скоростью [Н. Г. Кузнецов (1989), С. В. Нестеров, Н. Л. Никитин (1989)], гармонически по времени изменяет свои размеры или совершает малые колебания относительно прямолинейной траектории [Т. N. Stevenson, N. H. Thomas (1969), R. G. Rehm, H. S. Radt (1975), И. В. Стурова (1985)]. Лабораторные исследования подобных волновых процессов проводились В. И. Букреевым, А. В. Гусевым, И. В. Стуровой (1984, 1986). Теоретико-экспериментальный анализ пространственных волн, возбуждаемых при маневрировании области поверхностных давлений, имитирующей движение корабля на волнении или судна на воздушной подушке, выполнен в работах J. T. Everest, N. Hogben (1969), R. W. Yeung (1975), H. J. Haussling, R. T. Van Eseltine (1978). При таких движениях волны могут возбуждаться как за телом, так и перед ним. Подобные исследования важны для повышения эффективности эксплуатации судов различных типов.

Влияние вращения жидкости на пространственные поверхностные волны от движущихся возмущений гармонической по времени интенсивности изучалось для однородной жидкости как безграничной [S. D. Nigam, P. D. Nigam (1962)], так и конечной глубины [V. S. Rao (1969)], а также для равномерно стратифицированной безграничной среды [V. S. Rao, G. V. P. Rao (1971), L. G. Redekopp (1975)] с использованием подхода, развитого M. J. Lighthill (1960, 1967).

Динамическое воздействие атмосферы на океан, приводящее к изменчивости гидрофизических полей, осуществляется за счет локальных изменений атмосферного давления, касательных напряжений поля ветра и потока плавучести, в том числе и в перемещающихся метеоаномалиях, например, таких, как тропи-

ческие циклоны или тайфуны [П. Ле Блон, Л. Майсек (1978), С. С. Лаппо (1979), А. П. Хайн, Г. Г. Сутырин (1983), Р. Г. Григоркина, В. Р. Фукс (1988)]. Вклад каждого из перечисленных выше факторов в генерацию волн в океане зависит от вида атмосферного процесса, его интенсивности и пространственно-временных масштабов. По имеющимся данным падение давления в отдельных циклонах может достигать 100 гПа, а скорости их перемещения составляют 5-25 м/с. В то же время, отмечены случаи, когда мощные метеоаномалии в течение определенного времени практически не перемещались. Среди флуктуаций атмосферного давления прослеживаются полусуточные, суточные и 4-суточные колебания [С. С. Лаппо (1979), Р. В. Абрамов (1983)]. Для синоптического диапазона наибольший вклад дают волны давления с периодами 5,4; 6,8; 8,5 и 12,2 сут., амплитуда которых изменяется от 0,4 до 0,8 гПа [С. В. Голобородько, Г. С. Дворянинов, А. В. Прусов (1985)].

В то же время, математические модели возбуждения неустановившихся внутренних волн движущимися нестационарными возмущениями еще не разработаны в полном объеме, имеют ограниченное применение для описания подобных волновых процессов и требуют дальнейшего развития для использования их в океанологических исследованиях. В предшествующих работах по генерации волн перемещающимися барическими образованиями переменной интенсивности одновременно не учитывались непрерывность плотностной стратификации, конечность глубины океана и вращение Земли. Учет этих факторов несомненно важен для изучения физических закономерностей и правильного описания волновых процессов в морской среде, анализа механизмов возбуждения волновых полей и интерпретации данных наблюдений.

Цель работы

Исследовать поверхностные и внутренние волны, генерируемые перемещающимися возмущениями переменной интенсивности в стратифицированном океане с учетом вращения Земли.

Основные научные задачи

1. Проанализировать поверхностные и гироскопические волны, генерируемые нестационарными движущимися возмущениями в однородном вращающемся океане.
2. Исследовать внутренние волны, возбуждаемые нестационарными перемещающимися поверхностными давлениями в стратифицированном океане.
3. Изучить внутренние и гироскопические волны, вызываемые нестационарными движущимися барическими возмущениями в непрерывно стратифицированном вращающемся океане.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использован аппарат интегральных преобразований Фурье и Лапласа, методы теории функций комплексного переменного и стационарной фазы в многомерном случае, а также численные методы решения трансцендентных и обыкновенных дифференциальных уравнений.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- теоретический анализ поверхностных и гироскопических волн, генерируемых нестационарными движущимися возмущениями в однородном вращающемся океане конечной глубины;
- исследование внутренних волн, возбуждаемых перемещающимися поверхностными давлениями переменной интенсивности в стратифицированном океане, без учета вращения Земли;
- результаты математического моделирования процессов генерации внутренних и гироскопических волн нестационарными движущимися барическими возмущениями в непрерывно стратифицированном вращающемся океане.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в постановках научных задач и нахождении их решений, проведении численного анализа и физической интерпретации полученных результатов. Исследование ряда задач выполнено автором самостоятельно.

Практическая значимость работы.

Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных натуральных и лабораторных исследований, усовершенствовании методов прогноза внутренних и гироскопических волн, генерируемых возмущениями как естественного, так и искусственного происхождения. Выводы работы представляют интерес для теории волн и физики моря.

Апробация диссертации.

Результаты диссертации докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях "Экспериментальные и теоретические исследования волновых процессов в океане" (Севастополь, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986), IX Всесоюзном симпозиуме по дифракции и распространению волн (Тбилиси, 1984), III Межвузовской конференции молодых ученых и специалистов (Калининград, 1984), III и IV Республиканских научно-технических конференциях по прикладной гидромеханике (Киев, 1984, 1987), Всесоюзной конференции "Океанотехника - 85" (Ленинград, 1985), заседаниях бассейновой секции "Индийский океан и южные моря" научного совета ГКНТ СССР "Изучение морей и океанов и использование их ресурсов" (Севастополь, 1983, 1985, 1987, 1988), на Втором (Ялта, 1982) и Третьем (Ленинград, 1986) съездах океанологов и других.

Содержание диссертационной работы отражено в 16 научных публикациях, пять из которых выполнены без соавторов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 158 страниц, в том числе 36 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 137 наименований, в том числе 46 работ иностранных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе в линейной постановке выполнен анализ процессов возбуждения неустановившихся поверхностных, внутренних и гироскопических волн в устойчиво стратифицированном вращающемся океане постоянной глубины H . Генератор волн - равно-

мерно перемещающаяся область поверхностных давлений, изменяющихся со временем по гармоническому закону

$$p_0 = f(x, y) \exp(-i\phi_0 t) \quad (x = X + Ut), \quad (1)$$

где X, y, t - горизонтальные координаты и время, U - скорость перемещения возмущения, ϕ_0 - частота изменения интенсивности давления, функция $f(x, y) \rightarrow 0$ при $R = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$ и допускает применение преобразования Фурье. Эффекты, связанные с широтным изменением параметра Кориолиса, не рассматривались.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и основные задачи работы, описываются методы исследования, практическая ценность и апробация результатов диссертации, излагается ее краткое содержание.

В первой главе выполнен асимптотический анализ процессов развития вынужденных волн, генерируемых возмущением (1) в безграничном по горизонтали однородном вращающемся океане постоянной глубины. Основное внимание уделено исследованию возможных типов волновых движений, кинематических и динамических характеристик плоских и пространственных волн. Результаты этой главы изложены в работах [1, 6, 10, 16].

Предположение об однородности океана исключает из рассмотрения внутренние волны, которые исследуются в последующих главах диссертации. В то же время, учёт вращения Земли и конечности глубины бассейна позволяет рассмотреть вынужденные гироскопические волны, являющиеся низкочастотными колебаниями среды с субинерционными периодами.

В § 1.1 сформулирована математическая постановка задачи, получено интегральное представление для вертикальной скорости вынужденных волн, найдены кинематические соотношения для дальнего волнового поля в связанной с возмущением (1) системе координат $Oxuz$. В линейной постановке движение идеальной несжимаемой однородной жидкости в моменты времени $t > 0$ описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} Du - \ell v &= -\bar{\rho}'(p + p_0)_x, & Dv + \ell u &= -\bar{\rho}'(p + p_0)_y, \\ Dw &= -\bar{\rho}' p_z, & u_x + v_y + w_z &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

с соответствующими граничными и нулевыми начальными условиями. Здесь $D = \partial/\partial t + U\partial/\partial x$; u, v, w - волновые возмущения составляющих вектора скорости; $\bar{\rho}$ - плотность жидкости; p - динамическое возмущение давления; ℓ - параметр Кориолиса.

Для получения решения и его асимптотического анализа использована методика, изложенная в работах S. D. Nigam, P. D. Nigam (1962), С. Ф. Доценко (1979). Она опирается на применение преобразований Фурье по x, y и Лапласа по t к исходной начально-краевой задаче, что позволяет для трансформанты Фурье-Лапласа $W(m, n, z, \omega)$ функции $w(x, y, z, t)$ получить краевую задачу типа Штурма-Лиувилля. Вводя фундаментальную систему решений уравнения этой задачи и применяя обратные интегральные преобразования, было найдено выражение для w в полярных координатах в виде суммы трехкратных интегралов

$$w = \exp(-i\phi_0 t) \sum_{j=0}^{\infty} w_j, \quad w_j = \sum_{s=1}^2 w_{sj} \quad (3)$$

$$w_{sj} = \int_{-x}^x dr \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^t P(r \cos \theta, r \sin \theta) F_j(r, z) \exp(i\psi_{sj}) d\xi, \quad (4)$$

каждый из которых соответствует одной из вертикальных волновых мод. Здесь R, γ и r, θ - полярные координаты в плоскостях Oxy и Omn ; F_j - функция, пропорциональная j -й вертикальной моде; $P(m, n)$ - трансформанта Фурье-Лапласа функции $f(x, y)$; $\psi_{sj} = rR \cos(\theta - \gamma) - [rU \cos \theta - \phi_0 + (-1)^s \phi_j] \xi$.

Для анализа полей w_{sj} в дальней волновой зоне ($R, t \rightarrow \infty, R/t \rightarrow 0(1)$) использован метод стационарной фазы в многомерном случае [М. В. Федорук (1962)]. Получены выражения, содержащие дисперсионные зависимости, для определения волновых и передних фронтов поверхностных и гироскопических волн. Показано, что возбуждаемые волны являются прогрессивными и их частота совпадает с частотой внешнего генератора (1). Основные воз-

мушения затухают по закону $R^{-\nu/2}$.

В § 1.2 исследован процесс развития пространственных поверхностных волн. Вращение Земли оказывает на них слабое влияние. Установлено, что характеристики поверхностных волн определяются двумя безразмерными параметрами: числом Фруда $F_1 = U/\sqrt{gH}$ и частотой $\Omega_1 = \phi_0 \sqrt{H/g}$ (g - ускорение свободного падения). Показана возможность существования двух волновых режимов с качественно различной пространственной структурой волновых полей. Найдена зависимость $F_1 = \Phi_1(\Omega_1)$ критических значений параметров, при которых изменяется характер волнового движения. Так, при $F_1 < \Phi_1$ кроме продольных и поперечных волн генерируются кольцевые, трансформирующиеся с ростом F_1 ($F_1 > \Phi_1$) в дугообразные. Изучена зависимость угловой ширины клиновидных областей локализации отдельных систем волн от скорости перемещения внешнего возмущения U и частоты изменения его интенсивности ϕ_0 .

В § 1.3 проведен анализ трехмерных гироскопических волн, существующих исключительно благодаря вращению Земли. Определяющими параметрами для волнового поля являются $F_0 = U/U_j$ ($U_j = \epsilon H / j\pi$) и $\Omega_0 = \phi_0 / \epsilon$. Показано, что в плоскости (Ω_0, F_0) кривая с параметрическим уравнением

$$\Omega_0 = (2\lambda + 1)/(\lambda + 1)^{3/2}, \quad F_0 = \lambda^{3/2}/(\lambda + 1) \quad (\lambda \geq 0) \quad (5)$$

и прямые $\Omega_0 = 1$, $\Omega_0 = \Omega_0^*$ ($\Omega_0^* = 4\sqrt{6}/9$) разбивают пространство параметров F_0, Ω_0 на пять областей с качественно различным характером волнового движения. Поле гироскопических волн для j -й моды формируется из 4-5 пространственных систем. Когда значения Ω_0, F_0 принадлежат области, ограниченной кривой (5), возбуждаются гироскопические кольцевые волны, охватывающие область внешнего возмущения.

В § 1.4 рассмотрены кинематические и амплитудные характеристики плоских гироскопических волн, генерируемых при перемещении по поверхности океана области давлений

$$p_0 = f(x) \exp(-i\phi_0 t) \quad (x = X + Ut). \quad (6)$$

Получено выражение для w в виде суммы двукратных интегралов и выполнен асимптотический анализ волнового поля при $|x| \rightarrow \infty$.

В этом случае генерируются незатухающие прогрессивные волны субинерционных периодов, распространяющиеся как от, так и к возмущению. В зависимости от значений параметров F_0 , Ω_0 для j -й моды могут возбуждаться от двух до трех прогрессивных волн. Во втором случае одна из них существует перед генератором. Переходу от одного волнового режима к другому отвечают критические значения (5), при которых происходит резонансное возбуждение гироскопической волны. Численные расчеты показали, что максимальный вклад в волновое поле дает низшая гироскопическая мода, причем существует такая ширина области давлений, когда волны возбуждаются наиболее эффективно.

Вторая глава включает исследования внутренних волн от движущихся возмущений (1) без учета вращения Земли [2-5,9]. Последнее предположение оправдано, когда минимум частоты Брента-Вайсяля много больше параметра Кориолиса.

В § 2.1 дана математическая постановка задачи о генерации плоских и пространственных внутренних волн в непрерывно стратифицированном океане. Решение представлено в виде суперпозиции волн для отдельных мод в аналогичной (3), (4) форме. Методом стационарной фазы найдены выражения для определения характеристик волн вдали от возмущения. Установлен ряд общих закономерностей пространственной структуры волновых полей, вытекающих из анализа стационарных точек и свойств дисперсионных зависимостей для внутренних волн в жидкости с устойчивой непрерывной плотностной стратификацией [В. Краусс (1968), В.М. Каменкович, А.Б. Одуло (1972), Ю.З. Миропольский (1981)]. В частности, определены условия образования кольцевых внутренних волн, охватывающих область приложения поверхностных давлений.

В § 2.2 изложенный выше подход применен к анализу процесса развития пространственных волн в двухслойном океане. Для регионов, где толщина пикноклина мала, а баротропная и низшая бароклинная моды преобладают, данная модель удовлетворительно описывает волновую динамику морской среды. Показано, что движения свободной поверхности определяются баротропными волнами и "проявлениями" внутренних волн, а колебания границы раздела слоев вызвано чисто внутренними волнами и "отголосками" поверхностных волн в скачке плотности.

Выполнен анализ пространственной структуры внутренних волн. Установлено, что она определяется тремя безразмерными параметрами $F_2 = U/U_2$, $\Omega_2 = g\phi_0/U_2$, $Q = h_1/H$, где $U_2 = \sqrt{g\epsilon h_1 h_2/H}$, ϵ - относительный перепад плотности в скачке, h_1 и h_2 - толщины слоев. Найдены критические значения F_2 , Ω_2 и Q , которым соответствуют резонансные волновые режимы. Показано, что поле j -й внутренней моды формируется из 4-5 систем волн. Существует аналогия между вынужденными поверхностными и внутренними волнами в двухслойной жидкости, являющаяся следствием качественно одинакового поведения дисперсионных зависимостей для этих двух классов волн.

В § 2.3 изучена пространственная структура неустановившихся внутренних волн в экспоненциально стратифицированной жидкости. Учет непрерывного распределения средней плотности приводит к моделям, более полно отражающим реальную океаническую ситуацию. Предположение о постоянстве частоты Брента-Вяйсяля $N(z)$ является достаточно сильным, но дает возможность проанализировать все возможные типы вынужденных волн.

Установлено, что перемещающаяся область нестационарных давлений возбуждает волны, пространственная структура которых для каждой вертикальной моды определяется безразмерными параметрами: $F = U/U_j$ ($U_j = NH/j\alpha$) и $\Omega = \phi_0/N$ (j - номер моды). Существуют три качественно различных волновых режима при $\Omega < \Phi$, $\Phi < \Omega < 1$ и $\Omega > 1$, где $\Phi = (1 - F^{2/3})^{3/2}$. В последнем случае генерируются волны с частотой большей N , что для свободных линейных внутренних волн теоретически невозможно. Волновое поле для j -й моды формируется из 4-5 пространственных систем прогрессивных волн, локализованных в определенных угловых областях и получающих неодинаковое развитие со временем. При $\Omega < \Phi$ возбуждаются кольцевые внутренние волны.

Существование при $\phi_0 \neq 0$ для каждой моды четырех, а не одной или двух систем корабельных волн, как это имеет место при $\phi_0 = 0$, объясняется эффектом Допплера.

В § 2.4 для океана с постоянной частотой Брента-Вяйсяля, исследуются плоские внутренние волны, генерируемые давлениями (б). Показано, что при любых $F, \Omega > 0$ возбуждаются незатухающие прогрессивные волны. Если $\Omega > \Phi$ возникает бароклинный нестаци-

онарный волновой след. При $\Omega = \Phi$ наблюдается явление резонанса, сопровождающееся степенным ростом амплитуды одной из мод внутренних волн со временем. Как показано В. А. Боровиковым и Е. С. Левченко (1988), этот эффект сохраняется и для стратифицированных течений с вертикальным сдвигом скорости. Прогрессивные волны-предшественники перед движущимся возмущением образуются при $\Omega < \Phi$ и всегда соответствуют конечному числу низших бароклинных мод. Волновое же поле за областью давлений формируется из всех мод. Установлено, что незатухающие волны генерируются и при частотах колебаний давления, превышающих частоту Брента-Вяйсяля, однако их амплитуды сравнительно невелики.

В **третьей главе** выполнен анализ процессов развития внутренних и гироскопических волн при перемещении аномалий атмосферного давления (1) и (6) по поверхности непрерывно стратифицированного вращающегося океана [7,8,13-15]. Результаты этой главы обобщают установленные выше в рамках более простых гидродинамических моделей. Основное внимание уделено изучению совместного влияния на волновые движения вертикальной неоднородности океана и вращения Земли.

Математическая постановка задачи изложена в § 3.1. Интегральные представления для полей неустановившихся внутренних и гироскопических волн найдены с использованием интегральных преобразований по схеме, описанной в § 1.1. С помощью асимптотических оценок интегралов получены уравнения для стационарных точек, которые позволяют для каждой вертикальной моды установить условия генерации волн наибольшей амплитуды, число возбуждаемых пространственных систем волн различных типов и определить границы клиновидных областей, в которых они существуют.

Полный анализ возможных типов пространственных волновых полей, затухающих с расстоянием по закону $R^{-1/2}$, проведен в § 3.2 для равномерно стратифицированного вращающегося океана. Характер волнового движения для j -й моды определяется тремя безразмерными параметрами F , Ω и $L = \ell/N$. Благодаря вращению Земли, могут возбуждаться пространственные гироскопические волны. Кроме того, оно приводит к появлению новых систем внутренних волн, не имеющих аналога в невращающейся жидкости. При слабых плотностных стратификациях ($L > 1$) все волновые возмущения отно-

сятся к классу гироскопических волн.

Установлено, что для каждой вертикальной моды внутренних волн существует шесть качественно различных волновых режимов, два из которых соответствуют субинерционным периодам колебаний внешнего возмущения и возможны только во вращающемся океане. Для любой моды волновое поле формируется из 4-6 пространственных систем прогрессивных волн, локализованных в определенных угловых областях и получающих со временем неодинаковое развитие в пространстве. Найдены области параметров модели, при которых возбуждаются волны перед возмущением. Показано, что при определенном соответствии безразмерных параметров задачи существует аналогия между возможными типами пространственных полей внутренних и гироскопических волн.

В § 3.3 выполнен анализ генерации плоских внутренних и гироскопических волн, являющихся незатухающими при удалении от источника возмущений. Для произвольной устойчивой плотностной стратификации океана установлен, с учетом свойств дисперсионных зависимостей, ряд общих закономерностей вынужденных внутренних и гироскопических волн. В частности показано, что при скоростях перемещения аномалии давления, больших максимальной групповой скорости внутренних волн для нижней моды, основные волновые возмущения формируются из всех мод и сосредоточены за движущейся областью давлений (бароклиный волновой след).

Полный анализ возможных волновых режимов проведен в случае $N = \text{const}$. Установлено, что волновое поле для вертикальной моды формируется из двух или четырех незатухающих с расстоянием внутренних ($L < 1$) или гироскопических ($L > 1$) волн. Во втором случае одна из них существует перед генератором и выступает в роли волны-предшественника. Вращение океана трансформирует поле возбуждаемых внутренних волн. Благодаря ему возможно образование волн с субинерционными периодами. Кроме этого, качественно изменяются условия генерации внутренних волн в низкочастотной области и смещаются (по сравнению со случаем $L = 0$) резонансные значения параметров F и Ω . Наконец, возникают дополнительные резонансные режимы возбуждения как внутренних, так и гироскопических волн.

В § 3.4 рассмотренная в предыдущем параграфе плоская модель

генерации волн применена для нахождения условий возбуждения и оценки амплитуд вынужденных внутренних волн в реально стратифицированном океане. Расчеты выполнены для распределения $N(z)$, соответствующего Тропической Атлантике. С целью устранения счетной неустойчивости в коротковолновой области реализован алгоритм расчета дисперсионных кривых, использующий замену Профера [А. В. Кулаков (1977)].

Анализ вертикальной структуры внутренних волн выявил ее зависимость в длинноволновой области от закона экстраполяции $N(z)$ в глубинных слоях океана, где данные гидрологических измерений зачастую отсутствуют. Показана возможность появления аномальной дисперсии внутренних волн на частотах, близких к значениям частоты Брента-Вайсяля в протяженных слоях с квазипостоянными градиентами плотности [К. Д. Сабинин (1966)]. Наиболее ярко она выражена для высших мод.

Проведенные расчеты показали, что для рассмотренной плотностной стратификации океана и флуктуаций давления в движущейся аномалии с периодами временной изменчивости $T = 0,5; 1; 1,25; 5,4; 6,8$ и $8,5$ сут., которые характерны для метеополей, внутренние волны для нижней моды имеют максимальную амплитуду при скоростях перемещения области давлений от 2 до 3 м/с. Причем, наиболее эффективно они возбуждаются при значениях U близких к максимальной групповой скорости соответствующей моды. При больших скоростях переноса атмосферных возмущений внутренние волны перед барическим фронтом не генерируются, а их возбуждение в целом становится малоэффективным.

В заключении приводятся основные результаты и выводы выполненного исследования:

- изучен волновой отклик вращающегося баротропного океана конечной глубины на перемещающиеся по его поверхности области флуктуирующих аномалий атмосферного давления. Найдена связь характеристик внешнего возмущения и пространственной структуры волнового поля. Показано, что, благодаря вращению Земли и наличию периодической составляющей у равномерно движущегося возмущения, возбуждаются новые типы гироскопических волн, которые могут существовать перед генератором;

- для движущихся нестационарных возмущений исследованы характеристики трехмерных внутренних волн в устойчиво стратифицированном океане. Установлено, что всегда генерируются все вертикальные моды внутренних волн, при этом для каждой моды могут возбуждаться 4 - 6 волновых систем;

- установлено, что наличие периодической по времени составляющей у перемещающихся атмосферных возмущений приводит к существенному изменению пространственной структуры волновых полей и к образованию волн новых типов. В наибольшей степени этот эффект проявляется при малых скоростях перемещения аномалий атмосферного давления;

- показано, что существуют качественные отличия в конфигурации волновых полей, возбуждаемых в двухслойном и равномерно стратифицированном океанах, в высокочастотной области;

- в плоском случае изучены условия генерации и распространения внутренних и гироскопических волн, вызываемых движущимися осциллирующими барическими образованиями. Установлено, что для каждой вертикальной моды могут возбуждаться от двух до четырех незазатухающих прогрессивных волн. Определены пространственно-временные области их существования;

- найдены зависимости между параметрами среды и генератора, при которых происходит резонансное возбуждение внутренних и гироскопических волн, сопровождающееся степенным ростом их амплитуды со временем;

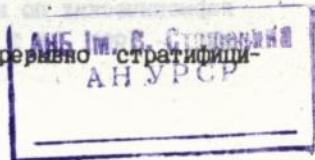
- исследовано влияние силы Кориолиса на развитие внутренних и гироскопических волн. Показано, что вращение Земли наиболее существенно влияет на пространственную структуру и амплитуды вынужденных волн при малых градиентах плотности и малых скоростях перемещения барических возмущений;

- установлено соответствие диапазонов изменения параметров океанической среды и внешнего возмущения, при которых поля внутренних и гироскопических волн имеют качественно аналогичную структуру.

Представленные в диссертации исследования выполнены в рамках междуведомственного проекта "Волна", входящего в программу "Мировой океан" (N госрегистрации 81067177, 1981-85 гг. и N госрегистрации 0187.001892, 1986-90 гг.).

Основные научные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в работах:

1. Неустановившиеся поверхностные волны в потоке конечной глубины, генерируемые областью переменных давлений // Теор. моделир. волн. процессов в океане. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1982. - С. 5-14 (совместно с С. Ф. Доценко).
2. Неустановившиеся внутренние волны в потоке конечной глубины, генерируемые областью переменных давлений // Моделирование поперх. и внутр. волн. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1984. - С. 19-25 (совместно с С. Ф. Доценко).
3. Развитие пространственных волн в потоке непрерывно стратифицированной жидкости, генерируемых возмущениями переменной интенсивности // Изв. АН СССР. Сер. ММТ, 1984. - N 6. - С. 71-77 (совместно с С. Ф. Доценко).
4. Генерация неустановившихся внутренних волн движущимися возмущениями переменной интенсивности // Материалы III республ. конф. по прикл. гидродинамике. Тезисы докл. - Киев, 1984 (совместно с С. Ф. Доценко).
5. Пространственные волны в двухслойном потоке жидкости, генерируемые возмущениями переменной интенсивности // Тр. Всесоюз. совещания "Волновые процессы в морях и океанах". - Севастополь, 1983. - М., - 1984. Деп. в ВИНТИ 09.01.84, N 281-84. С. 73-75 (совместно с С. Ф. Доценко).
6. Пространственная структура волнового поля, создаваемого движущимися возмущениями переменной интенсивности // III Всесоюз. конф. молодых ученых и специалистов "Научно-технический прогресс и молодежь". Тезисы докл. - Калининград, 1984. - С. 202-203.
7. Пространственные волны, генерируемые во вращающейся непрерывно стратифицированной жидкости движущимися возмущениями переменной интенсивности // Тр. научно-техн. конференции "Экспериментальное и теоретическое исследование волновых процессов в океане и использование их результатов для нужд народного хозяйства". - Севастополь, 1984. - М., - 1985. Деп. в ВИНТИ 12.06.85, N 4133-85. С. 119-123 (совместно с С. Ф. Доценко).
8. Генерация неустановившихся волн в непрерывно стратифици-



- рованной вращающейся жидкости гармоническими по времени возмущениями // "Волны и дифракция - 85". IX Всесоюзный симпозиум по дифракции и распространению волн. Т.2. Тбилиси, 1985. - С. 148-151 (совместно с С. Ф. Доценко).
9. Генерация плоских волн в потоке непрерывно стратифицированной жидкости областью гармонических по времени давлений // Вопросы волновых движений жидкости: Сб. научн. тр. / Краснодар: Кубан. ун-т, 1987. - С. 41-48 (совместно с С. Ф. Доценко).
 10. Развитие пространственных волн во вращающемся слое однородной жидкости, вызываемых областью гармонических по времени давлений // Поверхностные и внутренние волны в океане. - Севастополь, 1987. - М., - 1987. Деп. в ВИНТИ, N 4266-В87. - С. 35-52.
 11. Возбуждение внутренних волн равномерно движущейся областью осциллирующих поверхностных давлений // IV Респ. конф. по прикл. гидромеханике "Поверхностные и внутренние волны в океане и прибрежной зоне шельфа". Тез. докл. - Киев: ИГиМ АН УССР, 1987. - С. 31 (совместно с С. Ф. Доценко).
 12. Пространственные волны, вызываемые движущейся областью гармонических по времени давлений, во вращающемся слое однородной жидкости // III Научно-техническая конференция Крыма. Тезисы докл. - Севастополь, 1988. - С. 44.
 13. Генерация пространственных внутренних волн во вращающемся океане движущимися нестационарными возмущениями // Мор. гидрофиз. журн. - 1991. - N 4. - С. 22-28 (совместно с С. Ф. Доценко).
 14. Возбуждение внутренних волн в устойчиво стратифицированном океане перемещающимся фронтом переменных давлений // 1991, рукопись деп. в ВИНТИ 26.08.91, N 3548-В91. - 20 с.
 15. Генерация плоских внутренних и гироскопических волн движущимися нестационарными возмущениями // Мор. гидрофиз. журн. - 1992. - N 5 (совместно с С. Ф. Доценко).
 16. Распространение пространственных волн во вращающемся слое однородной жидкости, вызываемых перемещающейся областью гармонических по времени давлений // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. - 1992. - N 3. - С. 110-116.

САВОСЬКИН Владимир Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
В ОКЕАНЕ ДВИЖУЩИМИСЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ
ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 30.09.92 г.
Формат бумаги 60х90 1/16. Объем 1 уч. изд. л.
Заказ 721 Тираж 100 экз.

Отпечатано в НПП "Югрыбтехцентр"
335000, г. Севастополь, ул. Кулакова, 58

467 426

AB 25.807