

УДК 532.59:534.143

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ СО СДВИГОВЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

© 2022 г. В. В. Булатов^а, *, И. Ю. Владимиров^б, **

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, просп. Вернадского, 101-1, Москва, 119526 Россия

^бИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 119997 Россия

*e-mail: internalwave@mail.ru

**e-mail: iyuvladimirov@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.06.2021 г.

После доработки 07.09.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 г.

Решена задача о генерации гармонических внутренних гравитационных волн в океане с реальными и модельными распределениями по глубине частоты плавучести и фонового сдвигового течения. Для реальных и модельных распределений частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений приведены результаты численных расчетов амплитудно-фазовых характеристик волновых полей. Численно изучена трансформация амплитудно-фазовых картин полей внутренних гравитационных волн в зависимости от параметров генерации. Показано, что относительно коротко волновые пакеты могут концентрироваться на глубинах, соответствующих экстремумам функции, зависящей от компонент волнового вектора и вектора сдвиговых течений. Также показано, что пространственная изменчивость направления распространения волновых пакетов может приводить к достаточно заметной вертикальной амплитудной перестройке собственных функций. Показано, что использование модельных представлений для основных гидрологических характеристик (частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений) позволяют упростить основную спектральную задачу. Показано, что модельные представления гидрологических характеристик дают возможность качественно верно описать основные особенности дисперсионных поверхностей и фазовых структур волновых полей. Для описания амплитудных зависимостей волновых полей необходимо использовать результаты численного решения основной спектральной задачи. Поэтому для исследования волновой динамики реального океана необходимо сочетание, как точных численных методов исследования волновых полей, так и различных асимптотических подходов, позволяющих исследовать основные качественные особенности возбуждаемых волн.

Ключевые слова: стратифицированная среда, внутренние гравитационные волны, частота плавучести, сдвиговые течения, спектральная задача, амплитудно-фазовая структура

DOI: 10.31857/S000235152202002X

В реальных океанических условиях вертикальная и горизонтальная динамика фоновых сдвиговых течений в значительной степени связана с внутренними гравитационными волнами (ВГВ). В океане такие течения могут проявляться, например, в области сезонного термоклина и оказывать заметное влияние на динамику ВГВ [1–3]. Обычно предполагается, что фоновые течения с вертикальным сдвигом скорости слабо зависят от времени и горизонтальных координат. Если масштаб изменения течений по горизонтали много больше длин ВГВ, а масштаб временной изменчивости много больше периодов ВГВ, то такие течения можно рассматривать как стационарные и горизонтально однородные [4–7]. Для исследования механизма взаимовлияния течений и ВГВ можно рассматривать различные модельные

представления для стратификации и сдвиговых течений. Синтез численных, аналитических и асимптотических результатов может дать первоначальное качественное и количественные представления о волновых океанических процессах с учетом фоновых сдвиговых течений [6, 8–10]. Можно ожидать также, что учет реальных свойств параметров морской среды позволяет исследовать новые качественные эффекты волновой генерации. Асимптотические решения требуют верификации полученных аналитических результатов, оценки границ их применимости, поэтому сравнение численных и асимптотических результатов представляет особый интерес для исследования динамики ВГВ в океане с течениями [4–6, 11–13]. Метод Фурье является одним из основных методов решения задач волновой динамики ВГВ

в океане с произвольными фоновыми сдвиговыми течениями. Полученные с помощью этого метода интегральные представления решений, требуют численного и асимптотического анализа [7]. Методы прямого численного моделирования не всегда эффективны для исследования генерации ВГВ произвольными нелокальными и нестационарными источниками возмущений, особенно с учетом изменчивости основных гидрологических параметров, и требуют верификации и сравнения с решениями модельных задач [6, 7, 11–13]. Поэтому при анализе динамики ВГВ в реальном океане необходимо использовать комбинацию, численных, асимптотических и аналитических методов [14–21].

Целью настоящей работы является численное исследование амплитудно-фазовой структур ВГВ в океане конечной глубины с фоновыми сдвиговыми течениями для произвольных и модельных вертикальных распределений частоты плавучести и скоростей фоновых сдвиговых течений.

В работе получены численные решения, которые описывают основные амплитудно-фазовые характеристики полей ВГВ в океане конечной глубины, как для произвольных, так и модельных распределений частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений. В общем случае решение дисперсионного уравнения и качественный анализ получаемых дисперсионных соотношений и амплитудных зависимостей собственных функций представляет значительную математическую трудность. Для аналитического решения задачи можно использовать модельные представления основных гидрологических параметров: постоянное распределение частоты плавучести и линейные зависимости фонового сдвигового течения от глубины. Использование модельных представлений для основных гидрологических характеристик (частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений) позволят редуцировать основную спектральную задачу к более простой, а также исследовать эту упрощенную задачу аналитически. Аналитические и численные результаты показывают, что асимптотические конструкции, использующие модельные представления частоты плавучести и фоновых сдвиговых скоростей качественно верно могут описывать амплитудно-фазовую структуру ВГВ. Численные расчеты показывают, что учет реальных распределений основных гидрологических параметров океана дает возможность изучить все многообразие генерируемых волн. Изменение основных параметров волновой генерации вызывает заметную качественную перестройку фазовых картин возбуждаемых полей ВГВ, связанную с трансформацией дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры волновых полей. Численные расчеты показывают, что модельные представления гидрологических характеристик качественно верно описывают ос-

новные особенности дисперсионных поверхностей. В то же время, для корректного описания амплитудных зависимостей ВГВ в океане с фоновыми сдвиговыми необходимо использовать численные методы. В частности, численные расчеты для реальных гидрологических параметров показали, что относительно коротко-волновые пакеты ВГВ могут концентрироваться на глубинах, где имеются экстремумы функции, зависящей от компонент волнового вектора и вектора сдвиговых течений. Поэтому для исследования ВГВ в реальном океане необходимо сочетание, как точных численных методов исследования волновых полей, так и различных асимптотических подходов, позволяющих исследовать основные качественные особенности возбуждаемых волн. Аналитические приближения дают возможность решать более сложные задачи волновой динамики стратифицированных сред. Построенные асимптотики дисперсионных соотношений в дальнейшем позволяют исследовать более реалистичную задачу изучения динамики ВГВ в океане медленноменяющимися и нестационарными параметрами. В этом случае решение можно представить в виде суммы волновых пакетов, фазовая структура которых определяется аналитическими свойствами соответствующих дисперсионных зависимостей. Конкретный выбор фазовой функции (модельных интегралов) полностью определяется аналитическими свойствами дисперсионных соотношений, зависящих от реальной гидрологии океана. Аналитические выражения дисперсионных кривых могут использоваться, в частности, для качественной интерпретации наблюдаемых волновых явлений в океане. Также полученные аналитические результаты могут быть использованы для разработки дистанционных методов обнаружения ВГВ методами радиолокации [5–7, 20, 21].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-01-00111А.

Это отрывок статьи “Amplitude–phase structure of internal gravity waves fields in ocean with shear flows”, полный текст опубликован в “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics”, 2021, Vol. 57, No. 6. DOI: 10.1134/S0001433821200020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lighthill J.* Waves in fluids. Cambridge: Cambridge University Press. 1978, 598 p.
2. *Miropolsky Y.Z.* Dynamics of internal gravity waves in the ocean. Berlin: Springer, 2001. 406 p.
3. *Pedlosky J.* Waves in the ocean and atmosphere: introduction to wave dynamics. Berlin: Springer, 2010. 260 p.
4. *Fabrikant A.L., Stepanyants Yu.A.* Propagation of waves in shear flows. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. 304 p.

5. *Morozov E.G.* Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. Berlin: Springer, 2018. 317 p.
6. *Velarde M.G., Tarakanov R. Yu., Marchenko A. V.* The Ocean in motion. Berlin: Springer Oceanography, Springer International Publishing AG, 2018. 625 p.
7. *Bulatov V.V., Vladimirov Yu. V.* A general approach to ocean wave dynamics research: modelling, asymptotics, measurements. Moscow: OntoPrint Publishers, 2019. 587 p.
8. *Gavrileva A.A., Gubarev Yu. G., Lebedev M.P.* The Miles theorem and the first boundary value problem for the Taylor–Goldstein equation // *J. Applied and Industrial Mathematics*. 2019. V. 13(3). P. 460–471.
9. *Khusnutdinova K.R., Zhang X.* Long ring waves in a stratified fluid over a shear flow // *J. Fluid Mech.* 2016. V. 794. P. 17–44.
10. *Fraternali F., Domenicale L., Staffilan G., Tordella D.* Internal waves in sheared flows: Lower bound of the vorticity growth and propagation discontinuities in the parameter space. *Phys. Rev.* 2018. V. 97. 063102.
11. *Bulatov V.V., Vladimirov Yu. V.* Dynamics of internal gravity waves in the ocean with shear flows // *Russian J. Earth Sciences*. 2020. V. 20. ES4004.
12. *Bulatov V., Vladimirov Yu.* Analytical approximations of dispersion relations for internal gravity waves equation with shear flows // *Symmetry*. 2020. V. 12(11). P. 1865.
13. *Bulatov V.V., Vladimirov Yu. V., Vladimirov I. Yu.* Internal gravity waves from an oscillating source in the ocean // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 3. P. 321–328.
14. *Miles J.W.* On the stability of heterogeneous shear flow // *J. Fluid Mech.* 1961. V. 10. P. 495–509.
15. *Hirota M., Morrison P.J.* Stability boundaries and sufficient stability conditions for stably stratified, monotonic shear flows // *Phys. Letters A*. 2016. V. 380(21). P. 1856–1860.
16. *Churilov S.* On the stability analysis of sharply stratified shear flows // *Ocean Dynamics*. 2018. V. 68. P. 867–884.
17. *Khimchenko E. E., Frey D.I., Morozov E.G.* Tidal internal waves in the Bransfield Strait, Antarctica // *Russ. J. Earth. Science*. 2020. V. 20. ES2006.
18. *Morozov E.G., Tarakanov R. Yu., Frey D.I., Demidova T.A., Makarenko N.I.* Bottom water flows in the tropical fractures of the Northern Mid-Atlantic Ridge // *J. Oceanography*. 2018. V. 74(2). P. 147–167.
19. *Frey D.I., Novigatsky A.N., Kravchishina M.D., Morozov E.G.* Water structure and currents in the Bear Island Trough in July–August 2017 // *Russian J. Earth Sciences*. 2017. V. 17. ES3003.
20. *Froman N., Froman P.* Physical problems solved by the phase-integral method. Cambridge : Cambridge University Press, 2002. 214 p.
21. *Kravtsov Yu., Orlov Yu.* Caustics, catastrophes and wave fields. Berlin : Springer, 1999. 228 p.

Amplitude-Phase Structure of Internal Gravity Waves Fields in Ocean with Shear Flows

V. V. Bulatov^{1, *} and I. Yu. Vladimirov^{2, **}

¹ *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526 Russia*

² *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nahimovskij pr., 36, Moscow, 119997 Russia*

*e-mail: internalwave@mail.ru

**e-mail: iyuvladimirov@rambler.ru

The problem of the harmonic internal gravity waves generation in the ocean with real and model hydrological characteristics is solved. For real and model distributions of the buoyancy frequency and background shear flows the results of numerical calculations of the wave fields amplitude-phase characteristics are presented. The transformation of the internal gravity waves fields amplitude-phase patterns is studied numerically. Numerically it is shown that relatively short-wave packets can concentrate at depths where there are extrema of a function that depends on the components of the wave vector and the vector of shear currents. It is also shown that the spatial variability of the wave packets propagation direction can lead to a rather noticeable vertical amplitude rearrangement of the eigenfunctions. It is shown that the use of model representations for the main hydrological characteristics (buoyancy frequency and background shear currents) makes it possible to simplify the main spectral problem. It is shown that model representations of hydrological characteristics make it possible to qualitatively correctly describe the main features of dispersion surfaces and wave fields phase structures. To describe the wave fields amplitude dependences it is necessary to use the results of a main spectral problem numerical solutions.

Keywords: stratified medium, internal gravity waves, buoyancy frequency, vertical spectral problem, shear flows, dispersion relations, amplitude-phase structure