

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

В.В. Булатов¹, Ю.В. Владимиров²

¹*Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

²*Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*
internalwave@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача о моделировании полей внутренних и поверхностных гравитационных волн вдали от движущегося нестационарного источника возмущений. Получены интегральные формы решения и показано, что волновая картина возбуждаемых волновых полей представляет собой систему гибридных волновых возмущений, обладающих свойствами волн двух типов: кольцевидных и клиновидных. Представлены результаты численных расчетов, описывающие особенности фазовых структур и волновых картин возбуждаемых полей. Проведено сравнение аналитических результатов с данными натурных измерений. Работа выполнена по теме государственного задания АААА-А17-117021310375-7.

Введение и актуальность проблемы

В настоящее время наблюдается рост интереса к математическому моделированию волновых движений неоднородных природных стратифицированных сред, обусловленный проблемами геофизики, океанологии, физики атмосферы, охраны и изучения окружающей среды, эксплуатации сложных гидротехнических сооружений, в том числе морских нефтедобывающих комплексов и рядом других актуальных задач науки и техники. Этот интерес обусловлен не только практическими потребностями, но и большим теоретическим содержанием возникающих здесь проблем математического моделирования. Изучение волновых процессов в неоднородных стратифицированных природных средах превратилось в быстро развивающуюся область, причем результаты этих исследований важны как с фундаментальной точки зрения, так и для технических приложений. Новые экспериментальные и технические возможности стимулируют работу по математическому моделированию и асимптотическому исследованию волновой динамики внутренних и поверхностных гравитационных волн. При этом в основе анализа, как правило, лежат асимптотические методы, что позволяет на базе изучения невозмущенных уравнений формировать соответствующие асимптотические разложения, учитывающие неоднородность и нестационарность природных стратифицированных сред.

Важным механизмом возбуждения полей внутренних и поверхностных гравитационных волн в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах является их генерация источниками возмущений различной физической природы: природного (движущийся тайфун, ветровое волнение, обтекание неровностей рельефа океана, изменения полей плотности и течений, подветренные горы) и антропогенного (морские технологические конструкции, схлопывание области турбулентного перемешивания, подводные взрывы) характеров.

Система уравнений гидродинамики, описывающая волновые возмущения стратифицированных сред в общем виде представляет достаточно сложную математическую задачу как в плане доказательств теорем существования и единственности решений в соответствующих функциональных классах, так и с вычислительной точки зрения. Основные результаты решений задач о генерации волновых возмущений представляются в самой общей интегральной форме, и в этом случае полученные интегральные решения требуют разработки численных и асимптотических методов их исследования, допускающих качественный анализ и проведение экспресс оценок получаемых решений. В рамках линейной теории для аналитического исследования волновых возмущений в природных стратифицированных средах используются асимптотические методы интегральных представлений и приближенные методы.

Для детального описания широкого круга физических явлений, связанных с динамикой волновых возмущений неоднородных и нестационарных природных стратифицированных сред, необходимо исходить из достаточно развитых математических моделей. Трехмерность структуры природных стратифицированных сред также играет существенную роль, и в настоящее время не имеется возможность проведения масштабных вычислительных экспериментов по моделированию трехмерных океанических течений на больших временах с достаточной точностью. Однако в ряде случаев первоначальное качественное представление об изучаемом круге волновых явлений можно получить на основе более простых аналитических моделей. В этой связи необходимо отметить классические задачи гидродинамики о построении асимптотических решений, описывающих эволюцию волновых возмущений, возбуждаемых источниками различной природы в тяжелой жидкости. Модельные решения позволяют в дальнейшем получить представления волновых полей с учетом изменчивости и нестационарности реальных природных стратифицированных сред. Ряд результатов анализа модельных линейных задач, описывающих различные режимы возбуждения и распространения волновых возмущений, лежат в основе активно развивающейся в настоящее время нелинейной теории генерации волн экстремально большой амплитуды – волн-убийц.

Моделирование волновой динамики природных стратифицированных сред в настоящее время особенно актуально вследствие возросшего количества морских платформ, установленных на шельфовых месторождениях нефти и газа. Можно отметить некоторые случаи повреждения морских платформ внутренними волнами большой амплитуды, например, в Андаманском море, когда одна из опор платформы в октябре 1997 года была изогнута сдвиговым течением во внутренней волне. Измерения показывают, что нагрузки от внутренних гравитационных волн, действующие на подводные части морских платформ в вертикальном направлении могут в 30 раз превосходить нагрузки от ветровых волн. Действие волн приводит к мощному транспорту наносов и размывам дна, особенно в глубоководных районах, где влияние ветровых, в том числе штормовых волн, пренебрежимо мало.

Волны, существующие в океане вследствие стратификации его вод, являются принципиально двумерными, а во многих случаях и трехмерными, поэтому в вычислительном плане анализ двумерных и трехмерных нестационарных волновых движений является весьма сложной задачей. Разработан и получил широкое применение численный код MIT, решающий полные уравнения гидродинамики с учетом реального рельефа дна, вращения Земли и турбулентных процессов, разработанная в Массачусетской технологическом институте (США) вместе со специалистами по численному моделированию океана остального мирового сообщества. Данная модель требует больших компьютерных ресурсов, оправданных только для решения ряда отдельных практических задач океанологии. Тем не менее, даже такие полные модели пока еще не учитывают, например, существующей в реальных океанических условиях стабильной фоновой горизонтально – неоднородной стратификации. Для учета этого гидрофизического эффекта необходимо вводить внешние силы, эту неоднородность стратификации удерживающие, параметризация которых численно затруднительна.

Существующие в настоящее время другие методы численного моделирования, в том числе с использованием суперкомпьютеров (алгоритм IGW Research, алгоритмы Riemann Solver для решения гиперболических уравнений мелкой воды, псевдо-спектральный алгоритм высокого порядка для решений уравнений гидродинамики HOSM) не всегда позволяют эффективно рассчитывать конкретные физические задачи волновой динамики океана и атмосферы с учетом их реальной изменчивости, так как ориентированы на решение достаточно общих задач, требуют большой вычислительной мощности, не всегда учитывают физическую специфику решаемых задач, что существенно ограничивает их практическую применимость, особенно при расчетах волновых полей в реальных природных средах. Кроме того, использование мощных численных алгоритмов требует верификации и сравнения с решениями модельных задач. Поэтому в современных научных исследованиях и анализе волновых явлений природных стратифицированных сред широко применяются упрощенные асимптотические и аналитические модели. В линейном приближении существующие подходы к описанию волновой картины возбуждаемых полей внутренних и поверхностных гравитационных волн основаны на представлении волновых полей интегралами Фурье и последующем численном и асимптотическом анализе получаемых интегральных представлений [1-5].

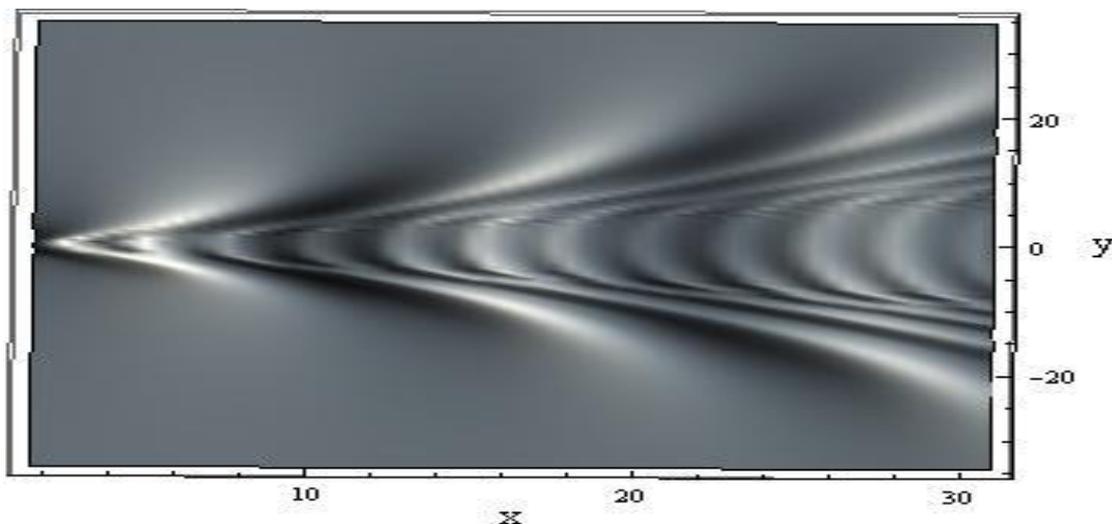


Рис. 1. Поверхностные гравитационные волны при нестационарных режимах генерации

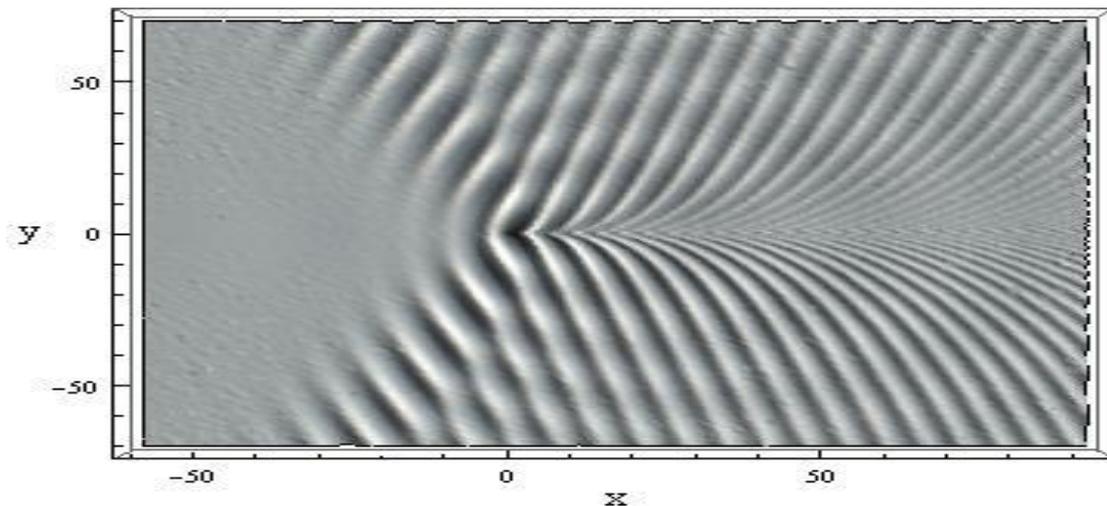


Рис. 2. Внутренние гравитационные волны при нестационарных режимах генерации

Основные результаты

Целью настоящей работы является математическое моделирование нестационарных режимов генерации полей внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых нестационарными движущимися источниками возмущений. Изучены основные особенности фазовых структур и волновых картин возбуждаемых волновых полей в зависимости от различных параметров генерации. Результаты математического моделирования нестационарных режимов генерации показывают, что дальние волновые поля от нестационарных источников возмущений при определенных режимах генерации представляют собой гибридную систему волн двух типов: кольцевых (поперечных) и клиновидных (продольных). Нестационарность источника возмущений приводит к появлению не только кольцевых волн, расходящихся по непосредственно от источника, но также к генерации гибридных волновых возмущений, распространяющихся от источника вверх по потоку. Качественная картина волновых полей от нестационарного источника существенно усложняется по сравнению со случаем генерации волн движущимся стационарным источником, когда в фиксированную точку наблюдения последовательно приходят волновые фронты отдельных клиновидных (продольных) мод. Расчеты показывают, что при определенных параметрах генерации в фиксированную точку наблюдения могут приходить вначале кольцевые (поперечные) волны. Волновые моды, первые достигающей фиксированной точки наблюдения, определяются параметрами генерации и стратификацией среды. Для больших номеров мод угол полураствора волнового клина уменьшается с номером моды так же, как и для случаев стационарных режимов генерации. Полученные результаты математического моделирования полей внутренних и поверхностных гравитационных волн дают возможность эффективно анализировать основные амплитудно-фазовые характеристики возбуждаемых волновых полей, и, кроме того, качественно исследовать полученные решения, что важно для правильной постановки более сложных математических моделей волновой динамики реальных стратифицированных сред. Подобного рода волновые картины могут наблюдаться при дистанционном зондировании, наблюдении и измерениях внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых различными источниками возмущений, в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах. На рис.1,2 представлены результаты расчетов дальних волновых полей от нестационарных источников возмущений [1-5]. Помимо фундаментального интереса построенные математические модели представляют значительную ценность для практики, поскольку позволяют решать задачи моделирования волновых гидрофизических полей в широком классе приложений.

Литература

1. В.В. Булатов, Ю.В.Владимиров Волны в стратифицированных средах. М.: Наука, 2015. 735 с..
2. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Теория волновых движений неоднородных сред. Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2017. 580 с.
3. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Новые задачи математической теории поверхностных волновых возмущений. Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2017. 318 с.
4. V.V. Bulatov, Yu.V. Vladimirov Internal gravity waves in horizontally inhomogeneous ocean // M. G. Velarde et al. (eds.). The Ocean in Motion, Springer Oceanography. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. P.109-126.
5. V.V.Bulatov, Yu.V.Vladimirov Unsteady regimes of internal gravity wave generation in the ocean // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol.18. ES2004.

SURFACE AND INTERNAL GRAVITY WAVES UNDER NON-STATIONARY GENERATION REGIMES

Vitaly Vasiljevich Bulatov ¹, Yury Vladimirovich Vladimirov ²

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow*

²*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow*

internalwave@mail.ru

Abstract. The problem of mathematical modeling of the far internal and surface gravity waves fields from a moving non-stationary source of disturbances is considered. In the linear approximation, integral forms of the solution for a separate wave mode are obtained and it is shown numerically that the wave pattern of the excited wave fields with certain generation parameters is a system of hybrid wave disturbances that simultaneously have the properties of two types of waves: annular (transverse) and wedge-shaped (longitudinal). The results of numerical calculations describing the main features of the phase structure and wave patterns of the excited wave fields, depending on the generation parameters, are presented and discussed. The obtained analytical results are compared with the data of full-scale measurements of hydro-physical fields.

The work was supported by the Federal Target Program (project No. AAAA-A17-117021310375-7).

¹ORCID: 0000-0002-4390-4013

²ORCID: 0000-0002-2139-5078