

TUMBLE 699

Внутренние волны в океане, или Нет покоя в толще вод

А. ЯМПОЛЬСКИЙ

В БЛИЗИ ПОЛУОСТРОВА ТАЙМЬЕР, небольшого островка того же названия, летом 1893 года произошел любопытный случай, которому суждено было стать толчком к интенсивному исследованию такого интереснейшего явления, как внутренние волны в океанах и морях. Работала тогда в этом районе норвежская полярная экспедиция под руководством знаменитого ученого-мороведа Фритьофа Нансена на корабле «Фрам».

Ф. Нансен (1861—1930) известен не только как выдающийся моревед и исследователь Арктики, но и как выдающийся общественный деятель. После первой мировой войны он был верховным комиссаром Лиги Наций по делам военнопленных, одним из организаторов продовольственной помощи голодающим Поволжья (1921 г.). За плодотворную общественную деятельность в 1922 году Нансену была присуждена Нобелевская премия мира.

«Фрам» (по-норвежски «вперед») — исследовательское судно, предназначенное для работы в полярных водах. Построено по специальному проекту в 1892 году. Водоизмещение около 400 т. Характерной особенностью его конструкции была яйцевидная форма корпуса, благодаря которой при сжатии во льдах «Фрам» не мог быть раздавлен, а просто выжимался вверх из ледовых объятий. После многолетних плаваний как в арктических, так и в антарктических водах «Фрам» помещен навечно в специально построенном павильоне музея в столице Норвегии Осло.

Однажды «Фрам» шел по направлению к кромке льда. Лед был далеко, погода стояла отличная, был полный штиль, шли полным ходом. Вдруг судно почти остановилось, как бы

наткнувшись на какое-то препятствие. Скорость движения резко упала. По словам самого Нансена, «чтобы пройти то небольшое расстояние, которое мы и на веслах прошли бы в полчаса или того меньше, «Фраму» понадобилась целая вахта (4 часа)». Как потом выяснилось, такая ситуация возникла благодаря тому, что над соленой морской и, естественно, более тяжелой водой оказался слой распресненной из-за таяния льда воды меньшей плотности. «Вода, взятая с поверхности, была годна даже для питья, а вода, поступавшая через кингстон, была слишком солона даже для котла» (Ф. Нансен). Причиной такой резкой переслоенности была летняя теплая штилевая погода — пресная вода от таяния льдов накапливалась, не смешиваясь, сравнительно тонким слоем на поверхности воды обычной океанской солености и плотности.

Опубликованные Нансеном материалы наблюдений послужили толчком для теоретических исследований этого вопроса. В результате удалось установить, что в такой ситуации почти вся энергия судового двигателя расходуется не на продвижение судна, а на образование волн на поверхности раздела между слоями (скорость этих волн, как показывают оценки, была сравнима со скоростью судна). Иначе говоря, в этом случае «Фрам» тащил за собой целую вереницу волн, которые, в отличие от волн на поверхности океана, называются внутренними, а обнаруженная резкая переслоенность впоследствии была названа «мертвой водой».

В Мировом океане внутренние волны встречаются не только в таких

экзотических условиях, в которых их наблюдал знаменитый норвежец Нансен. В большинстве случаев в океане нет столь резкого деления на слои различной плотности. Обычно плотность морской воды весьма плавно увеличивается с глубиной. Основным параметром, от которого зависит плотность воды на не очень большой глубине, является температура. С увеличением глубины h температура уменьшается все медленнее (градиент температуры $|dT/dh|$ становится все меньше), и на большой глубине надо учитывать сжимаемость воды, т.е. зависимость плотности от давления. Кроме того, плотность воды зависит от ее химического состава («солености»), и в некоторых случаях изменение состава с глубиной играет, наряду с изменением температуры, важную роль в образовании вертикального градиента плотности (т.е. величины dp/dh).

Простейшая схематическая модель возникновения внутренних волн выглядит следующим образом. Пусть некоторый объем воды сместился по вертикали из положения равновесия так, что его глубина изменилась на x . Будем считать, что, хотя смещение происходит плавно, температура воды в рассматриваемом объеме измениться не успевает (пренебрежем процессом теплообмена). Тогда плотность воды в смещающемся объеме можно считать неизменной (сжимаемостью воды пренебрежем). В то же время плотность окружающей воды изменилась на $\Delta\rho = \frac{d\rho}{dh} x$, где $\frac{d\rho}{dh}$ — градиент плотности в рассматриваемом месте. Значит, на сместившийся объем воды действует сила, равная измене-

нию силы Архимеда:

$$F = -\Delta\rho Vg = -\frac{d\rho}{dh} xVg.$$

Уравнение движения этого объема

$$\rho Vx'' = -\frac{d\rho}{dh} Vgx$$

представляет собой уравнение гармонических колебаний с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dh}}.$$

Если градиент плотности по каким-то причинам оказывается очень маленьким, то необходимо учитывать изменение объема сместившейся жидкости за счет изменения давления. Принято эту поправку выражать через скорость звука c в воде (которая также определяется ее сжимаемостью):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dh} + \frac{g^2}{c^2}}.$$

(Проверьте сами, что в этой формуле все в порядке с размерностью.) Обычно второй член гораздо меньше первого, и его можно отбрасывать. Выражение для частоты ω было получено в 20-х годах почти одновременно и независимо финским геофизиком В.Вяйсяля и англичанином Д.Брентом. С тех пор частота эта носит их имена.

Благодаря тому, что вертикальный градиент плотности морской воды обычно невелик (за исключением редких экзотических случаев – таких, как «мертвая вода»), малы и силы, препятствующие смещению частиц воды из положения равновесия. Именно поэтому амплитуды внутренних волн могут достигать десятков, а иногда и сотен метров. Периоды свободных внутренних волн, соответствующие значениям частот Вяйсяля–Брента, могут принимать значения от нескольких минут в верхних слоях до нескольких часов в глубине. Несмотря на то, что такие огромные смещения на сотни метров за сравнительно короткое время происходят где-то в толще вод и на поверхности никаких катастроф в это время не происходит, внутренние волны с такими большими амплитудами далеко не безобидны. Вот тому пример.

11 апреля 1963 года все информационные агентства мира передали

экстренное сообщение о гибели во время испытательного рейса атомной подводной лодки ВМС США «Трешер».

«Трешер» (по-английски «молотилка») – головная из серии атомных подводных лодок ВМС США. Водоизмещение 4300 т, длина 85 м, ширина 9,6 м, предельная глубина погружения 400 м. Скорость хода в надводном положении 16 узлов (30 км/ч), в подводном – до 30 узлов (55 км/ч).

Поскольку рейс был испытательный, после ремонта в порту Портсмут, на борту помимо 16 офицеров и 96 матросов находились еще 17 инженеров и техников Портсмутских доков. Связь с «Трешером» прекратилась через два часа после начала первого испытательного погружения. Предполагаемое место гибели «Трешера» находилось недалеко от выхода из залива Мэн на глубине около 3000 м. Поиски погибшей лодки, так же, как и выяснение причин катастрофы, были организованы очень быстро и с размахом. Однако только к осени 1963 года вырисовалась одна из возможных причин катастрофы, высказанная американским океанологом К.Айзлином из Вудс-Холского океанографического института, расположенного в непосредственной близости от залива Мэн. Оказалось, что в начале апреля, за несколько дней до катастрофы, в этом районе был зарегистрирован сильный шторм, центр которого 8–10 апреля сместился на северо-восток и находился уже над заливом Св.Лаврентия. Индуцированные этим штормом внутренние волны могли к моменту гибели «Трешера» оказаться у выхода из залива Мэн (по оценкам, скорость распространения этих волн ~ 3 м/с). Анализ местных гидрометеорологических условий дает все основания предполагать, что эти внутренние волны имели амплитуду до 100 м, длину волны 1–2 км и период около 8 минут. К сожалению, во время катастрофы никаких гидрологических наблюдений не велось, и поэтому приведенные соображения носят предположительный характер. Однако можно себе представить ситуацию, что «Трешер» в какой-то момент попал на гребень подобной внутренней волны и затем за полпериода, т.е. за 4 минуты, опустился на 200 м! Непредусмотренное заранее столь быстрое погружение мог-

ло оказаться роковым для «Трешера». Точная причина катастрофы так и не была установлена.

Обычные волны на поверхности морей и океанов также можно рассматривать как внутренние волны на поверхности раздела двух сред разной плотности – воды и воздуха. В этом случае вертикальный градиент плотности очень велик, и поэтому на поверхности, к счастью, очень редки волны высотой более 10 м. Кстати, если рассматривать волны на поверхности как внутренние, то можно представить некий аналог явления «мертвой воды» и объяснить, почему скорость подводной лодки в надводном положении почти в два раза меньше, чем в подводном. В надводном положении существенная часть энергии двигателя лодки расходуется на образование волн на поверхности раздела вода – воздух, а в подводном положении в среде, где вертикальные градиенты плотности малы, возникающие при движении внутренние волны отбирают на себя меньшую часть энергии двигателя.

Следует также отметить, что интенсивные внутренние волны весьма способствуют перемешиванию вод и, тем самым, обогащению их кислородом и питательными веществами. Отсюда недалеко и до оценки перспектив рыбного промысла в данном районе.

Одним словом, важность исследований внутренних волн как для надводного, так и для подводного мореплавания очевидна. И самое главное, с нашей точки зрения, – это же очень интересно! Человек разумный должен интересоваться тем, что творится в окружающей его природе.

Оказывается, определение параметров внутренних волн по данным океанографических наблюдений сопряжено с определенными трудностями. Еще несколько лет назад ученые судили о высоте внутренних волн по показаниям прибора, регистрирующего, например, температуру воды на некоторой глубине. В этом случае изменение температуры за промежуток времени, сравнимый с периодом внутренних волн, позволяет судить об их амплитуде. В самом деле, если ΔT – упомянутая разность температур, а dT/dh – ее вертикальный градиент, то амплитуда равна

$$A = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{dT/dh}.$$

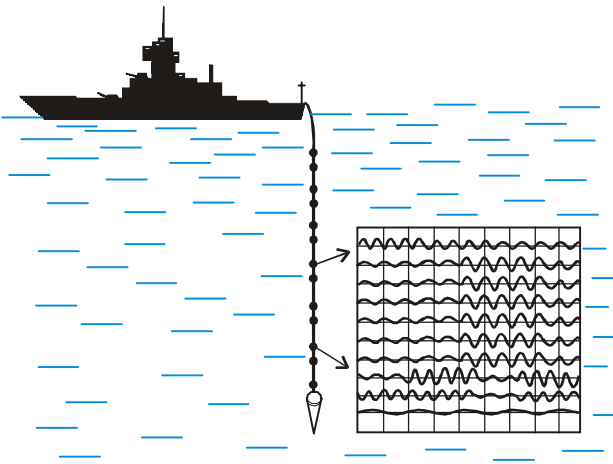


Рис. 1. Схема исследования внутренних волн с помощью одной вертикали. Кривые на врезке — показания датчиков, по которым определяют амплитуды и периоды этих волн

По мере развития техники измерений, для определения амплитуд и периодов внутренних волн появилась возможность использовать одновременно несколько таких приборов, помещенных на одной вертикали. В настоящее время применяются многоэлементные датчики, измеряющие одновременно на разных глубинах не только саму температуру, но и ее вертикальный градиент, и химический состав воды. Сигналы от таких датчиков поступают в судовой компьютер, на дисплее которого рождаются картинки, подобные приведенной на рисунке 1.

Но по измерениям на одной вертикали нельзя судить о длине внутренних волн, скорости и направлении их распространения. Чтобы получить такие сведения, надо иметь данные измерений на нескольких вертикалях одновременно. Однако при этом следует иметь в виду, что все эти измерения выполняются в открытом океане на глубине сотен и даже тысяч метров, не всегда в штилевую погоду и часто с качающейся палубы. В таких условиях запуск даже одной измерительной вертикали — дело сложное и трудоемкое.

Интересным и, пожалуй, весьма перспективным источником сведений о внутренних волнах являются так называемые поплавки нейтральной плавучести. Такой поплавок представляет собой довольно внушительное сооружение, которое, будучи уравновешенным в некотором слое заданной плотности, остается в нем длительное время и совершает вместе с ним колебания в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Пе-

риодически такой поплавок «сообщает» о своем положении в пространстве. Обработка этих сообщений позволяет судить о параметрах внутренних волн в районе движения поплавка.

Из самых общих соображений можно представить, что такие волны в толще вод должны вызывать и какие-то эффекты на поверхности. Современные оптические методы исследования поверхностных явлений подтверждают существование таких эффектов. Было обнаружено, например, что при не очень сильном ветре характеристики поверхностных волн над гребнями и ложбинами внутренних волн могут различаться. Схематически влияние внутренних волн на поверхностные можно представить себе так, как изображено на рисунке 2: в верхней части гребня внутренней волны скорость воды направлена по движению волны, а в ложбине — в противоположном направлении.¹ Стало быть, на поверхностные волны над гребнем внутренней волны и над ее ложбиной действуют противоположные по направлению течения.

Для иллюстрации рассмотрим случай, когда поверхностные и внутренние волны бегут навстречу друг другу. Тогда на волны, которые оказались над ложбиной, действует попутное течение, а на волны над гребнем — встречное. Попутное течение «растягивает» волны, и они становятся

более длинными и более пологими, в то время как встречное течение «сжимает» их, и они становятся короче и круче. Следует отметить, что при определенном соотношении между скоростями встречного течения и волн последние могут совсем остановиться или даже отразиться, как от препятствия. Участки поверхности океана, где высоты и периоды волн изменились под влиянием внутренних волн, могут существенно отличаться по внешнему виду от окружающей акватории. При определенных условиях такие зоны с измененными параметрами поверхностных волн прекрасно видны сверху с самолета или даже из космоса.

В настоящее время океанологи разных стран продолжают интенсивные

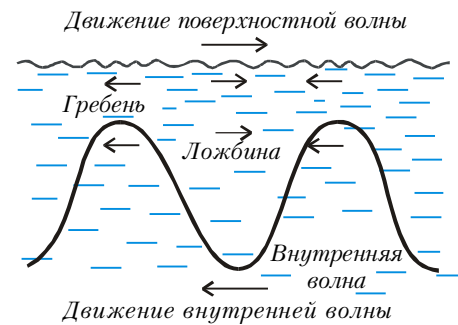


Рис. 2. Влияние внутренних волн на поверхностные. Когда они бегут навстречу друг другу, поверхностные волны, оказавшиеся над гребнем внутренней волны, «сжимаются», а над ее ложбиной — «растягиваются»

как теоретические, так и натурные исследования внутренних волн. Есть все основания полагать, что исследования эти приведут к открытию новых интересных особенностей внутренних волн и к дальнейшему прогрессу этой важнейшей ветви океанологии.

¹ О движении воды в различных точках волны можно прочитать, например, в статье И.Воробьева «Океанская зыбь» («Квант» №9 за 1992 г.). (Прим.ред.)