

Рис.3. Лабораторний експеримент, що демонструє ефект утворення внутрішніх хвиль об'єктом, що рухається (R. Vasseur, M. Mercier, T. Dauxois, 2008)



Катерина Терлецька

канд. фіз.-мат. наук,
старший наук. співробітник
Інституту проблем математичних
машин і систем НАН України,
м. Київ

Стипендіат НАН України 2010 р.
Стипендіат
Президента України 2008-2009 рр.

Одне з найпривабливіших явищ, що спостерігає людина — це хвилі на поверхні води. Від прадавніх мореплавців і філософів, художників і поетів до звичайних сучасних людей — немає нікого, хто залишався би байдужим до мінливої краси морських хвиль.

Поверхневі хвилі красиві як з естетичного погляду, так і з позицій отримання надзвичайних наукових результатів. Розмаїття хвильових явищ можна вивчати, просто спостерігаючи за поверхнею водою. Пригадується порада класиків, вимовлена вустами Козьми Прутькова: *"Кидаючи камінчик у воду, спостерігай кола, ними утворені, інакше твоє заняття виявиться марною тратою часу"*. Тож не будемо гаяти час, а відмітимо ті фізичні явища, які можна спостерігати на поверхні води. Дивлячись на хвилі, що розбігаються від кинутого у воду камінчика, можна вивчати явище дисперсії хвиль, яке проявляється у тому, що межа хвиль буде розповсюджуватись не рівномірно, а приблизно рівноприскорено, тому що довгохвильові коливання будуть розповсюджуватись швидше за короткохвильові. Якщо ж дочекатися того, що поверхня води стане повністю спокійною, а потім ще дочекатися легкого вітерцю — то ми побачимо утворення на поверхні малих хвильок (брижі) — це утворення нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. А милуючись, як хвилі набігають на узбережжя, ми спостерігаємо за нелінійними поверхневими хвилями (нелінійними є хвилі, в яких амплітуда велика порівняно з глибиною). При підході поверхневої хвилі з глибокої води на мілку її амплітуда стає великою порівняно з глибиною, хвиля стає нелінійною, що проявляється у тому, що гребінь починає рухатися швидше ніж підшва, фронт стає крутішим, і

хвиля перекидається. При певних умовах дисперсія, що намагається розмити профіль хвилі, повністю компенсує вплив нелінійності, що робить профіль крутішим — і хвиля може певний час зберігати свою попередню форму — таким чином утворюється усамітнена хвиля або солітон. Солітони мілкої води виникають, наприклад, у весняних струмках. Джон Рассел вперше так описав поверхневий солітон у каналі, що поєднав Единбург і Глазго у 1834 році: *"Маса води, яку баржа привела до руху, зібралася біля носа судна в стані скаженого руху, потім несподівано залишила його позаду, рухаючись вперед з величезною швидкістю, приймаючи форму великого поодинокого підвищення — округлого, гладкого і чітко вираженого водяного пагорба. Він продовжував свій шлях вздовж каналу, анітрохи не змінюючи своєї форми і не знижуючи швидкості."* Як з'ясувалося пізніше, солітонні явища виявилися універсальними і були виявлені в математиці, гідромеханіці, акустиці, радіофізиці, астрофізиці, біології, океанографії та оптичній техніці.

І це тільки найяскравіші хвильові явища, які можна побачити на поверхні води, що дають естетичну насолоду й ілюструють фундаментальні фізичні ефекти. Але зовсім несподіваним може виявитися той факт, що під штильовою поверхнею моря можуть бушувати свої безшумні і зовсім невидимі буревії, можуть повільно гуляти хвилі висотою ледве чи не в сотню метрів. Доречно буде ще раз згадати вислів Прутькова *"... не вір очам своїм"*.

Своїм існуванням ці підводні хвилі зобов'язані вертикальній неоднорідності густини рідини, тобто вертикальній стратифікації густини. Влітку в існуванні такої неоднорідності можна впевнитися на власному досвіді при плаванні у водоймі. В наших широтах

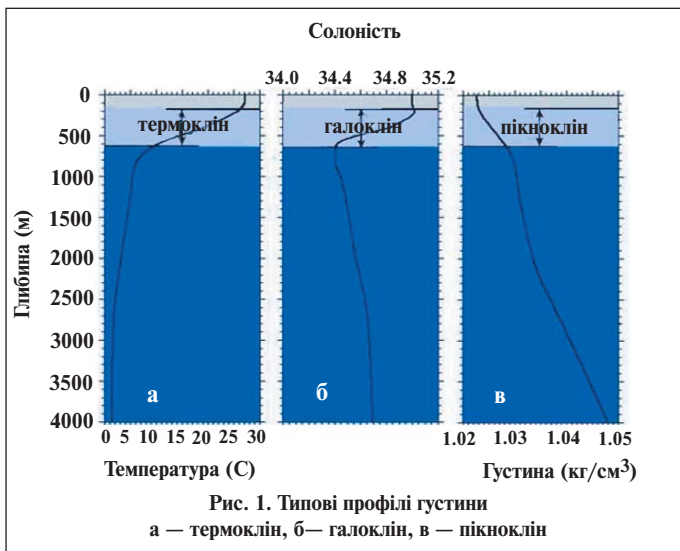


Рис. 2. Склянка з водою й олією, подібна до склянки Бенджаміна Франкліна

товщина верхнього прогрітого шару води зазвичай менша, аніж нам би хотілося. В океані, особливо у тропічних районах верхній прогрітий шар сягає декількох десятків метрів. Шар рідини, який розділяє теплу і холодну воду називають *термокліном* (рис. 1а). Біля полюсів стратифікація в океані виникає за рахунок танення льодовиків. *Фрітв'юф Хансен*, видатний норвезький дослідник-морезнавець і політичний діяч, під час подорожі на дослідницькому судні "Фрам" так описує стратифіковану воду: "Вода, що була взята з поверхні, була придатна навіть для того, щоб пити, а вода, що надходила через кінгстон, була занадто солонна навіть для котла". Шар між більш та менш солоною водою називають *галокліном* (рис. 1б). *Пікноклін* (рис. 1в) — це різкий стрибок густини. Моряки-підводники називають його "рідким ґрунтом", оскільки підводний човен при потраплянні в цей шар може перебувати на глибині без ходу.

Розглянемо детальніше явище внутрішніх хвиль. Уявимо собі стратифіковану рідину, в якій під дією певної зовнішньої сили порушується природна рівновага шарів. При цьому частинки води будуть занурюватися на глибину, що залежатиме від перепаду густини та прикладеного зусилля. Досягнувши певної глибини, де густина навколишньої рідини і частинок стане рівною, вони не зупиняться, а за інерцією занурюватимуться у шари з ще більшою густиною. Занурення триватиме до того часу, поки

сили інерції не урівноважаться силами плавучості. Потім частинки почнуть підніматися. Коливання будуть тривати доти, доки діє зовнішня сила, що їх викликала. Після припинення дії сили амплітуда стане зменшуватися і коливання затухатимуть.

Внутрішні хвилі характеризуються такими ж елементами, що і поверхневі хвилі. Але їх висота може перевищувати висоту поверхневих хвиль у десятки разів. Швидкість внутрішніх хвиль значно менша за швидкість поширення поверхневих хвиль. Явище, що з давніх часів було відоме морякам під назвою "*мертвої води*", — це також прояв внутрішніх хвиль. "Мертва вода" виникає на пікнокліні, якщо він розташований приблизно на глибині кіля судна. Тоді при русі судна з невеликою швидкістю створюються не лише корабельні хвилі на поверхні, але і внутрішня хвиля на межі розділу шарів води. Протягом багатьох сторіч "мертва вода" засмучувала досвідчених капітанів, а простих моряків взагалі жахала. Судно, що ішло малим ходом, раптово зупинялося, наче чиясь рука тримала його знизу. Вітрильні судна під дією "мертвої води" збивалися з курсу й переставали слухатися керма. *Пліній Старший* розповідав, що цей ефект приписували молюскам або особливому типу риб, які прикріплювалися до кіля. Документам, що містять описи "мертвої води" вже століття, якщо не тисяча років, а от першому науковому спостереженню внутрішніх хвиль трохи більше 250 років.

Перше задокументоване спостереження внутрішніх хвиль — це лист одного з батьків-засновників США *Бенджаміна Франкліна* від 1 грудня 1762 року. В цьому листі він писав [2]: "*На Мадейрі ми дістали олію для освітлювання і за допомогою звичайного скляного бокала або склянки обв'язаної дротом і підвішеної до стелі каюти... я зробив італійську лампу... Склянка на дні містила воду приблизно на одну третину своєї висоти; інша третина була заповнена олією... За вечерею, дивлячись на лампу, я помітив, що поверхня олії була повністю спокійною та зберігала своє положення відносно краю склянки, вода ж під олією була у великому хвилюванні, підіймаючись та падаючи безладними хвилями*". І це була не просто "буря в склянці з водою", а перший лабораторний експеримент з дослідження внутрішніх хвиль.

Наукове дослідження ефекту "мертвої води" почалося після знаменитої полярної експедиції 1893-1896 рр., де *Фрітв'юф Хансен* виразно описав картину збурень на поверхні води при потраплянні судна в "мертву воду" в норвезьких фіордах та біля берегів Таймиру, коли швидкість "Фрама" падала з 6 до 1.5 вузлів. Він ініціював постановку циклу експериментальних досліджень внутрішніх хвиль, що забирають енергію руху судна, які виконав океанолог *Вагн Вальфрід Екман* на початку минулого століття. Екман писав: "*Якщо шар прісної води лежить над солоною, то корабель спричиняє не тільки звичайні видимі хвилі на межі між водою та повітрям, але і буде породжувати невидимі хвилі на межі солоної та несолоної води (рис. 3); я припускаю, що величезний опір, що відчуває корабель, зумовлений роботою, що витрачається на утворення цих невидимих хвиль*".

Група дослідників з університету Ліону відтворила в лабораторних умовах ефект "мертвої води" (рис. 3). Французькі вчені показали, що при певних умовах корабель при русі в стратифікованій воді утворює довгі внутрішні хвилі, що призводять до гальмування і навіть зупинки корабля, незважаючи на двигун, що працює. Моделювання "мертвої води" започаткувало лабораторні дослідження внутрішніх хвиль, які через шістьдесят років почали проводити систематично для розв'язання завдань навігації, динамічної та акустичної прихованості підводних човнів.

У пошуках внутрішніх хвиль

Початок сучасних досліджень внутрішніх хвиль у прибережній зоні океанів припадає на середину 1960-х рр. Це явище стало об'єктом пильної уваги дослідників відразу декількох розділів науки: дистанційного зондування, прикладної математики, експериментальної гідромеханіки, а останні двадцять років і обчислювальної гідромеханіки.

а) спостереження

При натурних дослідженнях для визначення амплітуд і періодів внутрішніх хвиль використовуються одночасно декілька приладів, розмішених по горизонталі, багатовіментні датчики фіксують температуру, її вертикальний градієнт та хімічний склад на певній глибині. Ще одним джерелом інформації є поплавки нейтральної плавучості. Такий поплавок, врівноважений у деякому шарі води певної густини, залишається в ньому довгий час і виконує разом із ним коливання в горизонтальній і вертикальній площинах. Такий поплавок інформує про своє положення в просторі і це дає можливість оцінювати параметри внутрішніх хвиль.

Під час вимірювань було відмічено, що внутрішні хвилі можуть проявлятися на поверхні. Оскільки поверхневі хвилі сильно впливають на коефіцієнт відбиття електромагнітних, зокрема світлових хвиль, внутрішні хвилі добре виявляються дистанційними методами, наприклад, їх можна спостерігати з космосу. На радіолокаційному зображенні можна побачити картину (рис. 4а) у вигляді майже паралельних періодичних світлих (збурена поверхня — сулої) та темних (згладжена поверхня — сліки) смуг, вони утворюються при модуляції внутрішніми хвилями поверхневих хвиль (див. рис. 4б)

Спостереження усамітнених хвиль в океані, отримані за допомогою супутника ERTS (Earth Resources Technology Satellite) дозволили побудувати карту їх місцезнаходження [18]. На рис.5 показано розташування місць в океані, де спостерігаються внутрішні хвилі. Одним із найефективніших засобів дистанційного зондування, що використовуються для вивчення внутрішніх хвиль, є радіолокатори з синтезованою апертурою SAR (англ. synthetic aperture radar) — цей спосіб дозволяє отримувати радіолокаційні зображення незалежно від метеорологічних умов та рівня природної освітленості.

б) математичні моделі

Результати натурних спостережень показали, що внутрішні хвилі мають форму, далеку від синусоїдальної, а іноді і просто форму окремого імпульсу. Такі хвилі називають усамітненими хвилями. Виявилось, що теорія слабо нелінійних внутрішніх хвиль у двошаровій рідині, що заснована на рівнянні Кортевега-Де Вріза (КдВ), непогано описує такі усамітнені внутрішні хвилі. Основні ідеї було взято з теорії поверхневих хвиль в однорідній рідині, де основним є рівняння КдВ, яке описує поверхневий солітон. Але ця теорія заснована на припущенні слабкої нелінійності, і вона не описує хвилі дуже великих амплітуд. Тому важливим напрямком у математичній теорії внутрішніх хвиль є дослідження стаціонарних відокремлених хвиль довільної амплітуди без використання наближення слабкої нелінійності. Треба також відзначити, що в природних умовах стратифікація не зводиться до двошарової, і в теоретичних моделях є необхідність отримання розв'язків для рідини з багатошаровими та довільними стратифікаціями. Тому за останні десятиріччя були побудовані складніші аналітичні розв'язки, що ігнорують

обмеження, які існують в простіших математичних моделях. Але на жаль, аналітичні розв'язки хвильових задач механіки стратифікованої рідини в рамках вихідних рівнянь гідродинаміки Ейлера або Нав'є-Стокса існують тільки в декількох ідеалізованих випадках.

в) лабораторні експерименти

Ще одним із методів вивчення властивостей внутрішніх хвиль є дослідження їх у лабораторних умовах. Для експериментатора внутрішні хвилі є досить привабливим об'єктом дослідження, тому що для експериментів із ними не потрібні громіздкі установки, цілий ряд найцікавіших гідродинамічних ефектів може бути отриманий у відносно невеликих басейнах. У лабораторному лотку можна відтворити режими стратифікованих течій, що виникають в озерах [7], дослідити взаємодію усамітнених хвиль з похилим дном, підводними перешкодами та вузькостями [1]. При лабораторному експерименті спостерігається велике розмаїття режимів течій, багато з яких поки не мають теоретичного опису.

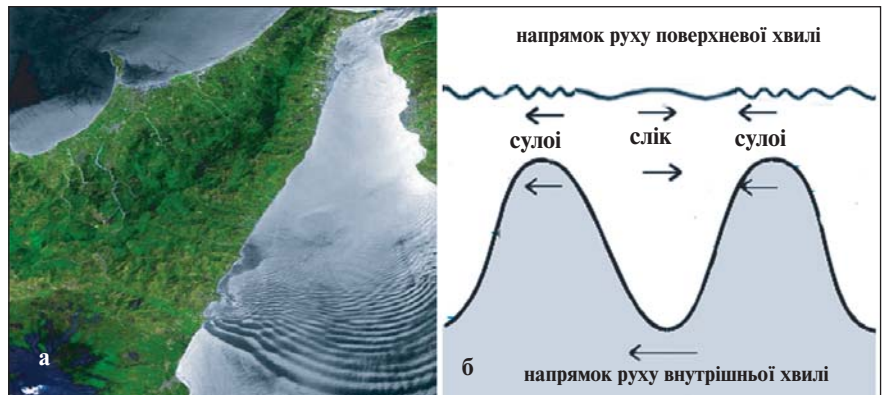


Рис. 4. а — внутрішні хвилі, що проявляються на поверхні в Мессінській протоці <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7630>; б — вплив внутрішніх хвиль на поверхневі. При русі назустріч поверхневі хвилі, що опинились над гребенем внутрішньої хвилі, "стискаються", а ті, що над пониженням — "розтягуються"

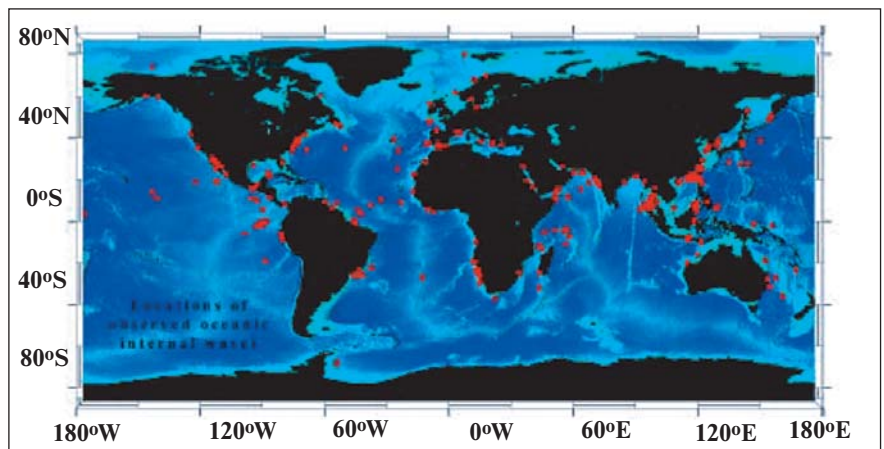


Рис. 5. Спостереження внутрішніх усамітнених хвиль у світовому океані <http://www.internalwaveatlas.com/>

г) чисельне моделювання і негідростатична модель, розроблена в ПММС

В останні двадцять років завдяки зростанню можливостей обчислювальної техніки почали розвиватися чисельні моделі, засновані на безпосередньому розв'язанні вихідних рівнянь гідродинаміки. Чисельне моделювання є одним з ефективних та найдешевших із методів дослідження внутрішніх хвиль. При цьому можна досліджувати генерацію і поширення внутрішніх хвиль у різного типу басейнах (від лабораторних басейнів до океанів) з довільною стратифікацією. Моделювання дає можливість одержувати оцінки характеристик внутрішніх хвиль для широкого діапазону умов стратифікації середовища, параметрів припливу й рельєфу морського дна, а також досліджувати інші фактори, які впливають на властивості хвиль, що неможливо зробити при натурному та лабораторному експерименті. Рівняння Нав'є-Стокса у поєднанні з рівняннями збереження солі, тепла і маси та рівняння стану описують весь спектр рухів стратифікованої рідини. З урахуванням характеру течії в чисельних моделях вводиться ряд припущень, що спрощують вихідні рівняння. В задачах, для яких вертикальний масштаб руху набагато менший за горизонтальний, використовується припущення про гідростатичне представлення тиску. Такі моделі називають гідростатичними, вони застосовуються для опису великомасштабних циркуляцій в океані або для моделювання динаміки у водоймах, де горизонтальні розміри набагато більші за вертикальні [5, 9]. Однак у багатьох випадках гідростатичне наближення не може коректно описувати фізичну сторону процесів, це може відбуватися, коли вертикальні швидкості є значними, наприклад, при різких змінах рельєфу та при описі коротких хвиль. Тому останні десять років відбувається розвиток так званого негідростатичного моделювання.

В Інституті проблем математичних машин і систем НАНУ у відділі морських та річкових систем під керівництвом професора *Володимира Станіслава Мадерича* була створена одна з перших негідростатичних чисельних моделей [8], яка на відміну від більшості негідростатичних моделей, що існують у світі зараз [6, 13] використовує найефективніший алгоритм розрахунку динамічного тиску, що дозволяє принципово прискорювати розрахунки порівняно з моделями, які базуються на прямому розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса. Ця модель застосовується для моделювання істотно

негідростатичних задач, до яких належать розповсюдження внутрішніх хвиль, турбулентні струмені від гвинтів корабельних двигунів, що впливають на прибережні ділянки; моделювання впливу теплових струменів та процеси шельфової конвекції, які регулюють формування глибинних вод, що може мати важливе значення при оцінюванні майбутніх змін клімату. Для моделювання, що потребує великих обчислювальних ресурсів, модель має паралельну версію, що запускається на кластері ПММС.

Взагалі у відділі морських та річкових систем розробляються різноманітні дво- та тривимірні гідродинамічні моделі, що застосовуються для моделювання динаміки водних мас, розповсюдження радіоактивних, теплових, нафтових та інших типів забруднень у різного типу водоймах та прибережних зонах морів. Колектив упродовж останніх 15 років виконує моделювання різних екологічних систем та бере участь у багатьох міжнародних та вітчизняних проектах, керівниками яких є *Володимир Станіславович Мадерич* та *Марк Йосипович Желєзняк*. Результати робіт опубліковано у провідних світових наукових виданнях та виголошено на престижних конференціях.

Дослідження внутрішніх хвиль є одним із напрямків досліджень нашого відділу. Чисельні експерименти, що виконуються за допомогою негідростатичної моделі, дозволяють виявити нові якісні властивості, отримати точні кількісні дані. Для перевірки моделі результати моделювання порівнюються з результатами різноманітних лабораторних експериментів. Серію робіт проведено у співпраці з Інститутом гідромеханіки НАН України, експерименти з внутрішніми хвилями проводились у лабораторному басейні цього інституту. Водночас чисельне моделювання дає можливість проводити перевірку наявних теоретичних моделей. Цікаві результати були отримані колективом при поєднанні всіх вище зазначених підходів при дослідженні внутрішніх хвиль [1,4,10,11].

Внутрішні хвилі в океанах, морях та озерах

Розміри й швидкість переміщення внутрішніх хвиль багато в чому визначаються їхньою природою, походженням і розвитком. Найбільш вивченими експериментально та теоретично є внутрішні хвилі в океані, що генеруються припливними течіями. Географія спостережень таких внутрішніх усамітнених хвиль досить широка: вони трапляються скрізь у прибережних

ділянках океану, в зонах із сильними змінами рельєфу дна (рис. 5). Внутрішні хвилі також трапляються поблизу гирл великих річок: Амазонки, Оріноко, Міссісіпі, Колумбії, Єнісею, Лени тощо, де прісна легка вода змішується з важкою солоною океанічною водою. Є багато спостережень у норвезьких фіордах, в арктичних та антарктичних морях, наприклад у Баренцовому морі та морі Веддела. Тут внутрішні хвилі утворюються внаслідок танення льоду в спокійну погоду, коли відносно тонкий шар майже прісної води розташовується над солоною морською водою великої густини. В океані хвилі розповсюджуються на відстані декілька сотень кілометрів та переносять масу й імпульс, при цьому страшними є непередбачено великі навантаження, що такі хвилі чинять на підводні бурові платформи та підводні човни. При поширенні на шельфі внутрішні хвилі відчувають вплив дна, стають динамічно нестійкими і руйнуються, трансформуючись у придонні течії та вихори. Таким чином поживні речовини із придонних шарів переміщуються у верхні. При цьому може відбуватися явище, передбачене теорією — розщеплення відокремленої хвилі на цуг хвиль при зменшенні глибини моря. Це відбувається в тому разі, коли усамітнена хвиля, що утворилась на глибині, виходить на шельф, рівновага між нелінійністю й дисперсією починає порушуватися, і первісна хвиля починає розпадатися. Далі при подальшому русі на шельфі кількість хвиль, організованих у цуги, різко скорочується, хвильовий хвіст значно відстає й розмивається, утворюючи після проходження кожного цугу складне хвильове поле. Крім цього, на мілкій воді може спостерігатися так званий ефект "зміни знака усамітненої хвилі", тобто хвилі пониження, що є типовими для глибокої води, можуть трансформуватися у хвилі підвищення на мілкій воді (рис. 6). Ці ефекти спостерігаються в тих районах, де пікноклін розташовано на глибинах 40-60 м, наприклад, у Південно-Китайському морі.

Як ми бачимо, ці невидимі, сховані від наших очей внутрішні хвилі дуже схожі на звичайні хвилі, які ми звикли бачити на поверхні моря. Але слід відзначити, що не можна провести повну аналогію між поверхневими та внутрішніми хвилями, оскільки повітря має густину в тисячі раз меншу, ніж вода. Для внутрішніх хвиль різниця між густинами шарів води має порядок 10^{-2} , і тому для них важливою є динаміка в обох шарах, на відміну від поверхневих хвиль.

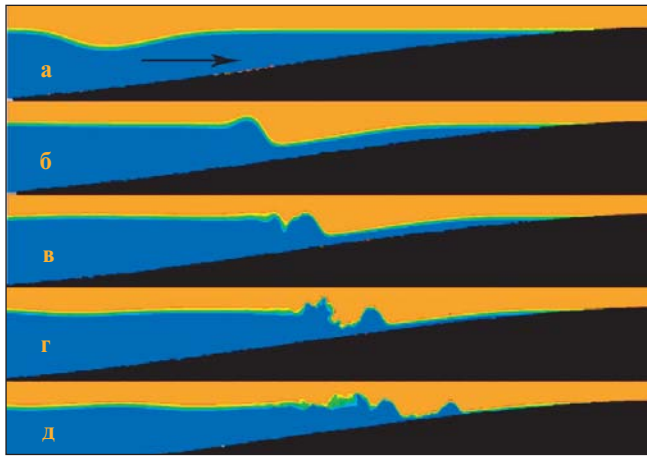


Рис. 6. Моделювання негідростатичною моделлю [8] накуту внутрішньої хвилі на шельфі. Хвиля розщеплюється на окремі солітони, які мають знак, протилежний до початкової внутрішньої хвилі

У вузьких протоках (типу Гібралтарської або Мессінської, рис. 4 а), коли різниця швидкостей течій на межі розділу густини стає досить великою, відбувається порушення стійкості шарів води. При виникненні нестійкості (це вже згадувана нестійкість Кельвіна-Гельмгольца), межа розділу скручується у вихори. Наприклад, у Мессінській протоці існує яскраво виражений шар стрибка густини між важкою водою Іонічного моря й розташованою над нею легкою водою Тірренського моря. У північній частині протоки внаслідок її сильного звуження обидві водні маси розташовуються поруч, тому вихровий рух внутрішньої хвилі сягає поверхні й викликає сильне збурення, назване Сциллою та Харибдою. Це бурхливе місце відоме з прадавніх часів з "Одіссеї" Гомера. Щоправда, після того, як під час землетрусу 1783 року скелі поблизу містечка Сцилла поглинуло море, протока стала ширшою, і вир у цьому місці значно послабшав. Тепер Сцилла й Харибда не становлять небезпеки навіть для невеликих суден [19]. Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца може розвиватися і на гребні усамітненої хвилі великої амплітуди. Це є яскравим прикладом, коли хвилі розповсюджуються на іншій хвилі. Таке явище в

океані спостерігали на хвилях, що розповсюджуються на шельфі Орегону [15] і на шельфі Південно-Китайського моря [16] (рис.7 а, в). Нестійкість утворюється при проходженні хвилі великої амплітуди над неоднорідним дном. В чисельних експериментах таке явище також спостерігалось [4, 11]. Внутрішні хвилі трапляються й у безприпливних морях, зокрема у Чорному і Каспійському. Різноманітність умов, вплив величезної кількості факторів не дають загальної картини щодо виникнення внутрішніх хвиль у замкнених безприпливних морях. Генерація таких хвиль відбувається в результаті згінно-нагінних вітрових явищ, осциляцій гідрологічних фронтів. Внутрішні хвилі, що спостерігаються в замкнених морях, значно менш інтенсивні, ніж їхні аналоги в океані, або в морях з припливами, однак вони різноманітніші з погляду свого походження.

В прісних озерах стратифікація виникає внаслідок сезонного прогріву верхнього шару, і вітрові нагони утворюють довгі (з довжинами хвиль порядку розмірів озера) низькочастотні стоячі внутрішні хвилі, які називають внутрішніми сейшми. Як показують натурні дослідження, такі внутрішні хвилі при розповсюдженні утворюють внутрішній вал (*солібор*), або пакети усамітнених хвиль, які формуються завдяки укреченню термокліну.

Історія досліджень цих хвиль в озерах нараховує вже понад 100 років. Перші публікації щодо польових спостережень внутрішніх хвиль були написані ще на початку ХХ сторіччя і стосувалися містичного Лох-Несського озера. Глибоке та загадкове тектонічне Лох-Несське озеро являє собою вузький та глибокий басейн, що має довжину 35 км, глибину 200 м та майже скрізь однакову ширину 1.4 км. У жовтні термоклін тут розташовується на глибині 40 м і розділяє шари води з температурою 12 та 6 градусів, а період коливань внутрішньої сейші дорівнює 52 годинам. В середині минулого сторіччя у Лох-Несському озері [17] зафіксовано утворення внутрішнього солібора, а пізніше і нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. Встановлено, що внутрішні сейші в озері є нелінійним явищем, що призводить до появи внутрішнього валу з крутим фронтом, що подорожує вздовж усього озера. Часто, завдяки сильному вітру, вал, що сформувався, декілька разів перетинає Лох-Несс, відбиваючись від крутих схилів, повільно зменшуючи свою амплі-

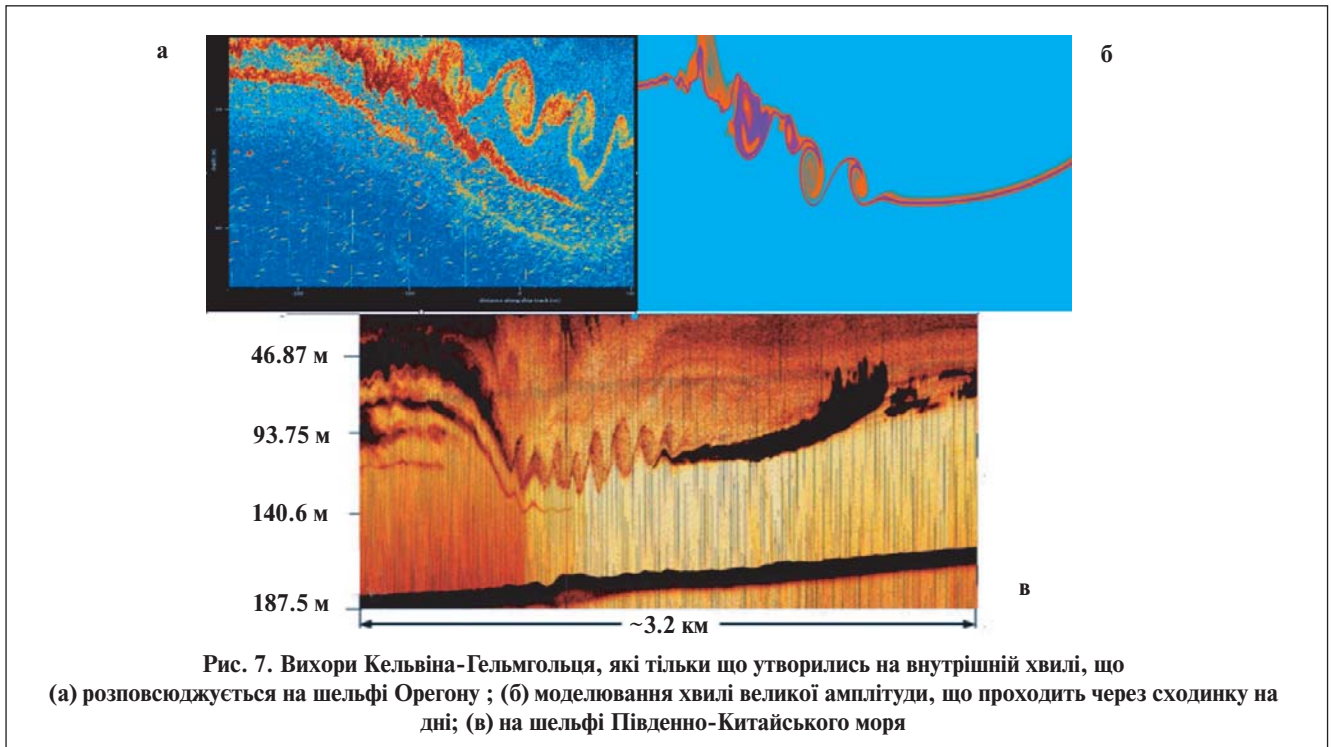


Рис. 7. Вихори Кельвіна-Гельмгольца, які тільки що утворились на внутрішній хвилі, що (а) розповсюджується на шельфі Орегону ; (б) моделювання хвилі великої амплітуди, що проходить через сходинку на дні; (в) на шельфі Південно-Китайського моря

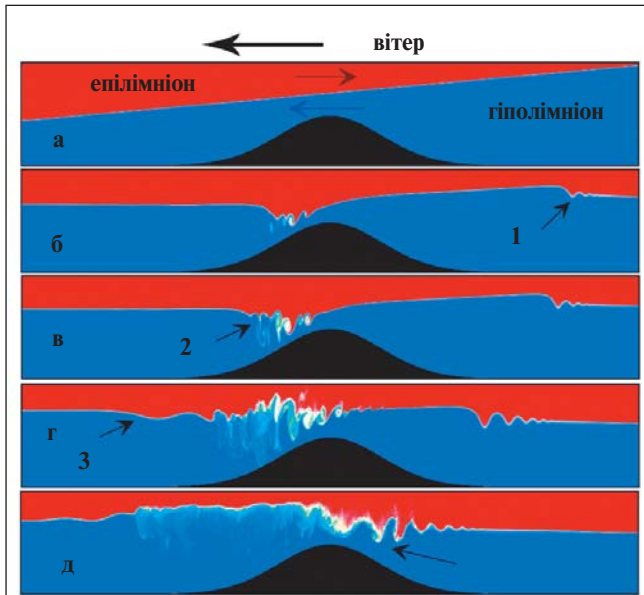


Рис.8. Ідеалізоване моделювання негідростатичною моделлю [8] розщеплення довгохвильових збурень на короткохвильові в озері з пагорбом

літуду, але іноді він резонує з вітром і може не затухати довгий час. Зважаючи на те, що внутрішні хвилі мають прояви на поверхні та радіолокаційних зображеннях, є припущення [14], що ці явища можуть пояснити факти спостережень раптового хвилювання поверхні озера, що приписують загадковій Нессі. "Родичі Нессі" — чорт з озера Лабінкир (Росія), змії Огопо з озера Окананган (Канада), монстр Сельма озера Сельйорд (Норвегія), монстр Лорі з озера Лох-Рі (Ірландія), монстр з озера Лоен (Норвегія) та багато інших озерних "чудовиськ" мають дещо спільне, а саме: домівками їм служать глибокі та вузькі, майже прямокутні озера з крутими схилами, для яких характерна чітка температурна стратифікація.

Для того, щоб зрозуміти, яким чином відбуваються перетворення первинних нагінних хвиль у нелінійні короткі хвилі в озері, й енергія перерозподіляється від великих до менших масштабів, розглянемо результати дещо

ідеалізованого чисельного експерименту, що відтворює хвильові ефекти в озері з пагорбом посередині. Цей приклад вибрано саме тому, що тут відтворюються різноманітні фізичні ефекти, що можуть відбуватися в озерах. Розглядається стратифікація, що складається з двох шарів різної густини, із тонким проміжним шаром. Потім завдяки дії вітру, який у нашому випадку мав напрямок справа наліво (рис. 8), поверхня відхиляється від горизонтального положення, що призводить до того, що пікноклін також відхиляється на певний кут (рис. 8а). При ослабленні дії вітру пікноклін намагається відновити горизонтальне положення, і при цьому виникають течії: рідина в верхньому шарі рухається праворуч, в нижньому — ліворуч (двосторонній водообмін). Перше, що ми бачимо — утворення пакету солітонів (рис. 8б (1)), далі на пагорбі з підвітряного боку виникає нестійкість і формується вже відомі вихори Кельвіна-Гельмгольца (рис. 8в (2)). Через певний час за пагорбом формується усамітнена хвиля (рис. 8 г (3)). Цуг солітонів, що вже сформувався, рухається до схилу та взаємодіє із пагорбом (рис.8 д (4)). При цьому усамітнені хвилі пониження змінюють знак — тобто стають хвилями підвищення і перекидаються.

Приблизно половина населення землі живе в прибережній смузі завширшки 60 км. При тому, що населення світу постійно зростає, і прибережні зони постійно розвиваються, стратегія розвитку цих районів стає однією з головних проблем людства. Внутрішні хвилі — цікаве природне явище, яке ще недостатньо вивчене. Теорія внутрішніх хвиль ще тільки формується. Дослідження вертикальної структури океану та внутрішніх хвиль у цей час приваблює до себе все більше й більше уваги не тільки океанологів, але й вчених інших спеціальностей, пов'язаних з дослідженнями океанів і морів. Це підтверджується тим, що в цьому році на зібранні океанологів, організованому Американським геофізичним товариством (AGU) у Портленді [12] велика кількість робіт була присвячена саме вивченню внутрішніх хвиль.

Варто прислухатися до сказаних колись слів американського президента *Джона Кеннеді*: "*Прагнення пізнати океан — це щось більше, ніж просто допитливість. Від рівня наших знань про нього може залежати наша доля*".

Література

1. Бровченко И.А., Городецкая Н.С., Мадерич В.С., Никишов В.И., Терлецкая Е.В. Взаимодействие внутренних уединенных волн большой амплитуды с препятствием // Прикладная гидромеханика. — 2007.—9(81).—Р.3-7.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана: В 2-х томах. Т.2. Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 415 с.
3. Kanarska Y., Maderich V. A non-hydrostatic numerical model for calculating of free-surface stratified flow // Ocean Dynamics. 2003. — № 51. — p. 176-185.
4. Терлецкая Е.В., Мадерич В.С., Бровченко И.А. Трансформация уединенных внутренних волн большой амплитуды над ступенькой на дне // Прикл. гидромеханика. — 2009. — № 11. — с.65-76.
5. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Am Geoph Union. 1987, New York
6. Casulli V., Zanoli P. Semi-implicit numerical modeling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems // Math. Comput. Model. —2002. —N36. —P. 1131-1149
7. Horn D.A., Imberger J., Ivey G.N. The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes // J. Fluid Mech. —2001.—434.— P. 181-207
8. Kanarska Y., Maderich V. A non-hydrostatic numerical model for calculating free-surface stratified flows // Ocean Dynamics. — 2003. — 53. — P. 176-185
9. Maderich V., Heling R., Bezhenar R., Brovchenko I., Jenner H., Koshebutskyy V., Kuschan A., Terletska K. Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water

transport and mixing in the inland and coastal waters // Hydrological Processes. — 2008.— 22. — P. 1000-1013.

10. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Pelinovsky E., Choi B.H., Brovchenko I., Terletska K., Kim D.C. The transformation of an interfacial solitary wave of elevation at a bottom step // Nonlinear Proc. Geoph. 2009. — №16. —P.33-42.

11. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Terletska K., Brovchenko I., Pelinovsky E., Choi B.H. Transformation of the Large Amplitude Interfacial Solitary Waves of depression at the Bottom Step // Physics of Fluids. 2010. — № 22. — p. 176-185.

12. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Pelinovsky E., Choi B.H., Brovchenko I., Terletska K. Transformation of large amplitude interfacial solitary wave at the step // AGU Ocean Sciences meeting, 22-26 Feb 2009, Portland, Oregon, USA.

13. Mahadevan A., Olinger J., Street R. A nohydrostatic mesoscale ocean model. Part I, II // J Phys Oceanogr. 1996. — 26. — P. 1860-1879.

14. Mortimer C.H. The Loch Ness Monster -limnology or paralimnology? // Limnology and Oceanogr. 1973. — 18. — P. 343 345.

15. Moum N., Nash D., Klymak Small-scale processes in the coastal ocean // Oceanography. 2008 — V. 21 № 4. — p. 22-33.

16. Orr M.H., Mignerey P.C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves // J Geophys. Res. 2003 — V. 108. — P. 16.

17. Thorpe S.A. Near-resonant forcing in a shallow two-layer fluid: a model for the internal surge in Loch Ness? // J Fluid Mech. — 1974 . — 63. —3— P. 509-527.

18. <http://www.internalwaveatlas.com/>

19. <http://www.hydrometeorology.ws/>