

ПЕРЕГОВОРНА ТРУБКА ЗАВДОВЖКИ З ЕКВАТОР?

А ті стіни і справді мали вуха. Вірніш, тільки одне вухо. То була дірка, ніби таємний телефон, через який усі слова линули простісінько до кімнати синьйора Помідора.

Джанні Родарі. *Пригоди Цибуліно*

У сорокових роках ХХ століття вчені СРСР і США виявили дивовижне явище. Поширені в океані звукові хвилі інколи вдавалося зареєструвати за тисячі кілометрів від їхнього джерела. Так, в одному з найвдаліших експериментів звук від підводного вибуху, здійсненого вченими біля берегів Австралії, обійшов половину земної кулі і був зареєстрований іншою групою дослідників біля Бермудських островів на відстані 19 600 км від Австралії (рекорд дальності поширення імпульсних звукових сигналів). Який же механізм такого, наддалекого, поширення звуку?

Аби відповісти на це запитання, згадаймо, що з випадками несподівано далекого поширення звуків доводиться стикатися не тільки між берегами Австралії й Бермудським трикутником, а й у повсякденному житті. Так, сидячи на кухні за сніданком, часто можна почути не надто приємне деренчання, яке один жартівник назвав «співом водопровідних труб»⁴. Припинити це «комунальне музикування» іноді вдається, відкривши водопровідний кран у своїй квартирі. Більшість людей після цього з полегкістю повертаються до перерваного сніданку, не надто замислюючись над фізичною сутністю події. А замислитися варто. Чому звук, що порушується струменем води в несправному крані в одній із квартир, не дає спокою мешканцям усього під'їзду, пов'язаного одним водопровідним стояком? Адже якщо в тій самій квартирі подути у свисток, то це почують хіба що сусіди в найближчих квартирах. А от «спів» водопровідних труб чути скрізь, від першого по останній поверх.

Така відмінність зумовлена двома причинами. Перша — це звукоізолююча дія стін і перекриттів, які відбивають і поглинають звуки свистка. А звукова хвиля, що розповсюджується по водопровідній трубці, проходить з поверху на поверх безперешкодно. Тепер про другу причину. При звучанні свистка акустична хвиля поширюється в просторі в усіх напрямках, і її хвильовий фронт має форму сфери. Площа цієї сфери зростає в міру віддалення від джерела звуку, і інтенсивність звукової хвилі — тобто енергія, що проходить через одиницю площі хвильового фронту в одиницю часу, — у міру віддалення від джерела падає (знайдіть самі, за яким законом). А звукова хвиля, що виникає всередині водопровідної труби, «одномірна»: відбиваючись від стінок труби, вона не розходить по різні боки в просторі, а поширюється в одному напрямку — уздовж самої труби — без розширення хвильового фронту; так що інтенсивність звуку в міру віддалення від джерела практично не змінюється. У цьому сенсі водопровідна труба є акустичним хвилеводом — каналом, у якому звукові хвилі поширюються майже без послаблення.

Інший приклад акустичного хвилеводу — переговорні труби, з допомогою яких здавна на кораблях передаються команди з капітанського містка в машинне відділення. Зауважимо, що затухання звуку в повітрі при поширенні хвилеводом виявляється настільки малим, що якби вдалося зробити таку трубку завдовжки 700 км, то вона змогла б слугувати своєрідним «телефоном» для передачі розмови, наприклад, з Києва до Ужгорода й назад. Однак вести розмову по такому телефону було б украй складно, адже співрозмовник чув би сказане вами приблизно через півгодини.

Підкреслимо: відбиття хвилі, що розповсюджується в хвилеводі від його границь є визначальною властивістю хвилеводу — саме завдяки їй енергія хвилі поширюється не в усі сторони в просторі, а передається в заданому напрямку.

Ці приклади наводять на думку, що й наддалеке поширення звуку в океані, з якого ми почали цей розділ, зумовлене хвилеводним механізмом. Проте як саме утворюється такий гігантський хвилевід? За яких умов він може виникнути, і що в цьому випадку слугує його відбивальними межами, що змушують звукові хвилі поширюватися на такі величезні відстані?

У ролі верхньої межі може слугувати поверхня океану, яка доволі добре відбиває звук. Співвідношення між інтенсивностями відбитої й такої, що пройшла через межу розподілу двох середовищ, звукової хвилі істотно залежить від густини цих середовищ і

значень швидкостей звуку в кожній з них. Якщо середовища розрізняються значуще (наприклад, для води й повітря густина відрізняється майже в тисячу разів, а швидкість звуку — у 4,5 раза), то навіть за нормального (перпендикулярно до поверхні) падіння звукової хвилі на плоску межу розподілу між водою й повітрям практично вся хвиля відіб'ється назад у воду — інтенсивність звукової хвилі, що пройшла в повітря, складе всього лише 0,01 % падаючої. За похилого падіння хвиля відбивається ще сильніше. Однак поверхня океану рідко буває рівною через постійне хвилювання. Це призводить до хаотичного розсіювання на ній звукових хвиль і, таким чином, до порушення хвилеводного характеру їх поширення.

Не кращі справи і з відбиттям від дна океану. Густина донних відкладів зазвичай перебуває в межах 1,24–2,0 г/см³, а швидкість поширення звуку в них лише на 2–3 % менша, ніж у воді. Тому, на відміну від межі «вода — повітря», значна частка енергії звукової хвилі, що падає з води на дно, поглинається в донному ґрунті.

Таким чином, дно відбиває звук слабко, і слугувати нижньою межею хвилеводу ніяк не може.

Отже, межі хвилеводу в океані слід шукати десь між дном і поверхнею. І вони були знайдені. Ними виявилися шари води на певних глибинах океану.

Як же відбувається відбивання звукових хвиль від «стінок» підводного звукового каналу (ПЗК)? Щоб відповісти на це питання, нам доведеться розглянути, як узагалі відбувається поширення звуку в океані.

Досі ми говорили про хвилеводи, припускаючи, що швидкість поширення звуку в них постійна. Тим часом відомо, що швидкість звуку в океані коливається від 1450 до 1540 м/с. Вона пов'язана з температурою води, її солоністю, з величиною гідростатичного тиску і з іншими чинниками. Зростання гідростатичного тиску приводить до того, що при зануренні на кожні 100 м швидкість звуку збільшується приблизно на 1,6 м/с. З підвищенням температури швидкість звуку також зростає. Однак в океані температура води зазвичай доволі різко зменшується в міру віддалення з верхніх, добре прогрітих, шарів води в глибину, де вона виходить практично на постійне значення. Дія цих двох механізмів приводить до такої залежності швидкості звуку від глибини, як це показано на рис. 3.1. Поблизу поверхні переважний вплив справляє швидке падіння температури — у цих шарах швидкість звуку зменшується із заглибленням. У міру занурення температура змінюється повільніше, а гідростатичний тиск продовжує зростати. На певній глибині вплив цих двох чинників «урівноважується» — тут швидкість звуку виявляється мінімальною; далі вона починає зростати зі збільшенням глибини за рахунок зростання гідростатичного тиску.

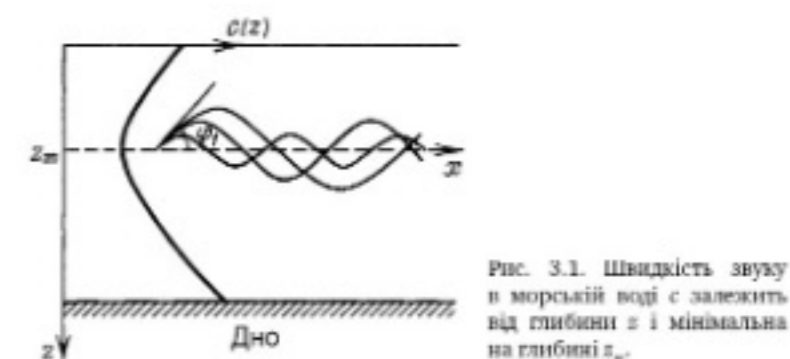


Рис. 3.1. Швидкість звуку в морській воді є залежить від глибини z і мінімальна на глибині z_0 .

Отже, швидкість поширення звуку в океані залежить від глибини. І це позначається на характері поширення звуку. Аби зрозуміти, чим визначається хід звукових променів в океані, звернімося до оптичної аналогії: погляньмо, як поширюється світловий промінь у стосі з плоскопаралельних пластинок з різними показниками заломлення, а потім узагальнимо наш результат у випадку середовища з повільно змінними показниками заломлення.

Розгляньмо стос із плоскопаралельними пластинами з різними показниками заломлення $n_0, n_1, \dots, n_k, \dots$, причому $n_0 < n_1 < \dots < n_k < \dots$ (рис. 3.2). Промінь, що падає з верхньої пластини на пластину 1 під кутом α_0 , після заломлення на межі 0–1 складе кут α_1 з нормаллю до цієї межі; під таким кутом він упаде на межу 1–2; після заломлення на цій межі промінь, пройшовши пластину 2, упаде на межу 2–3 під кутом α_2 , знову заломиться і т. д. Відповідно до закону заломлення,

$$\frac{\sin \alpha_k}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_0}, \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \frac{\sin \alpha_{k-1}}{\sin \alpha_k} = \frac{n_k}{n_{k-1}}, \quad \dots$$

Згадуючи, що відношення коефіцієнтів заломлення двох середовищ обернене відношенню швидкостей поширення світла в цих середовищах, перепишемо все співвідношення так:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} = \frac{c_0}{c_1}, \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}, \quad \frac{\sin \alpha_{k-1}}{\sin \alpha_k} = \frac{c_{k-1}}{c_k}, \quad \dots$$

($c_0 > c_1 > \dots > c_k > \dots$). Помноживши послідовно ці рівності одна на одну, отримаємо співвідношення:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_k} = \frac{c_0}{c_k}.$$

Спрямовуючи товщину кожної пластини до нуля, а кількість пластин до нескінченності, ми прийдемо до узагальненого закону заломлення, який описує хід світлового променя в середовищі з плавно змінних показників заломлення (цей закон називають узагальненим законом Снеліуса²):

$$c(z) \sin \alpha(0) = c(0) \sin \alpha(z),$$

де $c(0)$ — швидкість світла в місці входу променя в середовище, $c(z)$ — швидкість світла на відстані z від межі середовища. За такого граничного переходу ламана лінія, що показує хід променя, перетворюється на плавну криву. Таким чином, при поширенні світлового променя в оптично неоднорідному середовищі в міру збільшення швидкості світла (зменшення показника заломлення) цей промінь дедалі більше відхиляється від вертикалі й «притискається» до межі розподілу.

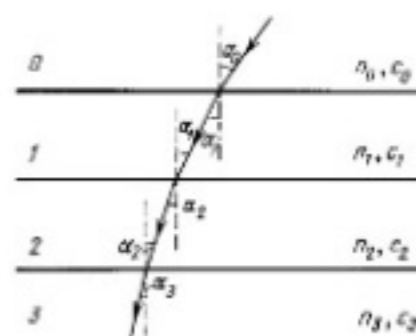


Рис. 3.2. Оптично неоднорідне середовище можна представити як стос склавих пластин з різними показниками заломлення.

Явище викривлення світлових променів під час поширення світла в середовищі з безперервно змінним показником заломлення називають рефракцією.

Знаючи, як змінюється швидкість світла в середовищі, ми можемо, користуючись узагальненим законом Снеліуса, указати, яким буде хід того чи іншого променя, який потрапив у неоднорідне середовище. Точно так само відбувається й викривлення звукових променів при поширенні звуку в неоднорідному середовищі, де змінюється швидкість звуку. Окремим випадком такого середовища і є океан.

Тепер повернемося до питання, як поширюється звук у ПЗК. Уявімо, що джерело звуку перебуває на глибині z_m , що відповідає мінімуму швидкості звуку (рис. 3.3). Яким буде хід звукових променів, що виходять із джерела? Промінь, що йде вздовж горизонталі $z = z_m$, буде прямолінійним. А ті промені, які виходять під певним кутом до цієї горизонталі, викривлятимуться. За аналогією до рефракції світла це явище називають рефракцією звуку. Оскільки і вище, і нижче рівня z_m швидкість звуку зростає, звукові промені викривлятимуться в напрямку горизонталі $z = z_m$, у якийсь момент промінь знову стане «паралельним» до цієї горизонталі і, «відбившись», поверне до неї (див. рис. 3.3).

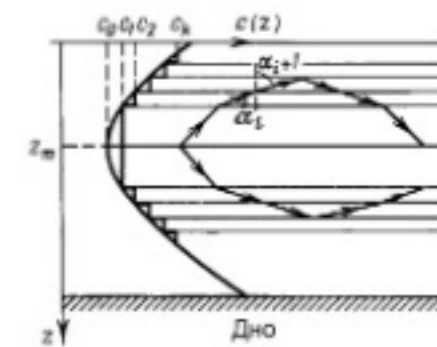


Рис. 3.3. Заломлення звуку в акустично неоднорідному середовищі (швидкість звуку $c(z)$ має мінімум на глибині $z = z_m$).

Отже, рефракція звуку в океані приводить до того, що частина звукової енергії, випромінюваної джерелом, може поширюватися не виходячи на поверхню води й не доходячи до дна. А це й означає, що в такому середовищі реалізується хвилеводний механізм поширення звуку — підводний звуковий канал. Роль «стінок» цього хвилеводу виконують шари води на тих глибинах, де відбувається «поворот» звукового променя.

Рівень глибини z_m , на якій швидкість звуку мінімальна, називають віссю ПЗК. Зазвичай величини z_m лежать у діапазоні 1000–1200 м; проте в тропічних широтах, де вода прогривається на велику глибину, вісь ПЗК може опускатися й до глибин у 2000 м. Навпаки, у високих широтах вплив температури на розподіл швидкості звуку позначається тільки в приповерхневому шарі, і вісь ПЗК піднімається до глибин 200–500 м, а в полярних широтах — ще ближче до поверхні.

В океані можуть існувати два різних типи ПЗК. Канал першого типу утворюється в тому випадку, коли швидкість звуку біля поверхні води (c_0) менша, ніж біля дна (c_2). Цей випадок зазвичай трапляється в глибоководних районах, де тиск біля дна сягає сотень атмосфер. Як ми вже говорили, звук, що йде з води в повітря, добре відбивається від поверхні їх розподілу, і якщо поверхня океану гладка (штиль), то вона слугує різкою верхньою межею хвилеводу, і канал займає весь шар води від поверхні до дна (рис. 3.4).

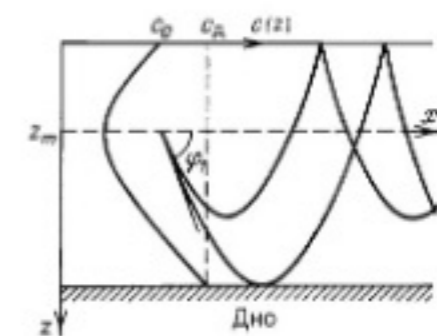


Рис. 3.4. Підводний звуковий канал першого типу: штиль, $c_0 > c_2$. Звук відбивається від поверхні й заломлюється в глибині.

Поглянемо, яка частина звукових променів «захоплюється» в ПЗК. Для цього перепишемо співвідношення Снеліуса так:

$$c(z) \cos \varphi_1 = c_1 \cos \varphi(z),$$

де φ_1 і $\varphi(z)$ — кути, утворені звуковим променем з горизонтальною площиною на глибинах z_1 і z відповідно. Ці кути називають кутами ковзання (зрозуміло, що $\varphi_1 > \varphi(z)$). Якщо джерело звуку перебуває на осі ПЗК, то $c_1 = c_m$; канал захоплює промені, для яких кут ковзання біля дна дорівнює $\varphi(z) = 0$. Так що всі промені, які виходять із джерела під кутами ковзання φ_1 , що відповідають умові (див. рис. 3.4)

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1, \quad \varphi(z) = \frac{\pi}{2} - \alpha(z)$$

$$\cos \varphi_1 \geq \frac{c_m}{c_1}$$

потрапляють у ПЗК.

За нерівної поверхні води звукові промені будуть розсіюватися на ній; ті промені, які підуть від поверхні під досить великими кутами ковзання, дійдуть до дна і там поглинуться. Однак і в цьому випадку канал може захоплювати всі ті промені, які, завдяки

рефракції, трохи не доходять до хвилястої поверхні (рис. 3.5). Канал при цьому тягнеться від поверхні до глибини z_m , яка визначається з умови $c(z_m) = c_0$.

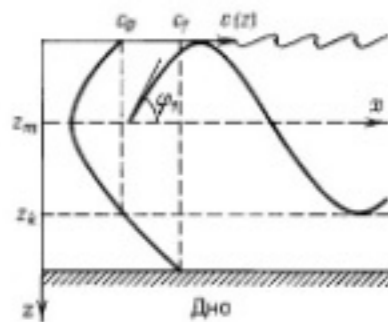


Рис. 3.5. Ще один ПЗК першого типу: море хвилюється, $c_h > c_0$. Звук заломлюється біля поверхні, проте не досягає дна.

Зрозуміло, що такий канал захоплює всі звукові промені з кутами ковзання

$$\varphi_1 \leq \arccos \frac{c_m}{c_0}.$$

Канал другого типу характерний для мілководних районів і утворюється, коли швидкість звуку поблизу поверхні виявляється більшою, ніж біля дна (рис. 3.6). Він займає шар води від дна до глибини z_k такої, що $c(z_k) = c_0$. Це ніби перевернутий канал першого типу у випадку хвилястої поверхні.

Якщо джерело звуку розташоване поблизу осі ПЗК, то в точку прийому сигналу надходить зазвичай безліч звукових променів, причому час проходження звуку ними різний. Інтенсивність короткого імпульсного сигналу, реєстрованого в точці прийому, зростає від початку прийому до кінця, оскільки різниця між часом отримання імпульсів за різними променями до кінця прийому сигналу зменшується, і вони починають накладатися один на одного, що і приводить до збільшення інтенсивності. Останнім приходиться звуковий промінь, що поширюється уздовж осі ПЗК (з нульовим кутом ковзання), після чого сигнал різко обривається.

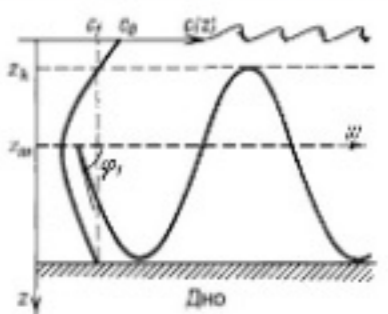


Рис. 3.6. Підводний звуковий канал другого типу. Коли $c_0 < c_m$, звук заломлюється ближче до дна й не досягає поверхні.

Для певних типів залежності швидкості звуку від глибини ПЗК діє на звукові промені подібно до фокусувальної лінзи: якщо випромінювач розташований на осі ПЗК, то промені, що вийшли під різними кутами ковзання, періодично сходяться на осі каналу в точках, які називаються фокусами ПЗК. Так, для каналу, у якому швидкість звуку змінюється з глибиною за законом, близьким до параболізації, $c(z) = c_0 \left(1 + \frac{1}{2} b^2 \Delta z^2\right)$, де $\Delta z = z - z_m$, фокуси для променів, що вийшли під малими кутами ковзання, будуть перебувати в точках $x_n = x_0 + \pi n / b$, де $n = 1, 2, \dots$, а коефіцієнт b має розмірність, обернену довжині (рис. 3.7).

Такий профіль кривої $c(z)$ близький до реального розподілу швидкості звуку в глибинних ПЗК. Відхилення від точної параболічної залежності в $c(z)$ приводять до розмивання фокусів на осі ПЗК⁴.

Ну, а чи можна змусити звук, що поширюється вздовж ПЗК, здійснити навколосвітню подорож — облетіти під водою всю земну кулю й повернутися до свого джерела? Ні, не можна. Першою і найнепереборнішою перешкодою слугують материки і значні перепади в глибинах Світового океану. Тому не можна обрати такий шлях, уздовж якого існував би єдиний ПЗК навколо всієї земної кулі. Але це не єдина причина. Звукова хвиля, поширена в ПЗК, відрізняється від звукових хвиль у водопровідній трубці й переговорній трубці. Як уже говорилося, при поширенні в цих хвилеводах звукова хвиля одномірна, площа її хвильового фронту постійна на будь-якій відстані від джерела звуку, а отже, інтенсивність звуку (без урахування теплових втрат) також буде постійна в будь-якому розрізі труби. У підводному звуковому каналі звукова хвиля поширюється не вздовж прямої, а в усіх напрямках у

площині $z = z_m$. Тому хвильовим фронтом є циліндрична поверхня, і вже через це інтенсивність звуку падає в міру віддалення від джерела пропорційно $1/R$, де R — відстань від джерела звуку до місця спостереження (отримайте цю залежність і порівняйте її з отриманим вами раніше законом спадної інтенсивності для сферичної звукової хвилі в тривимірному просторі).

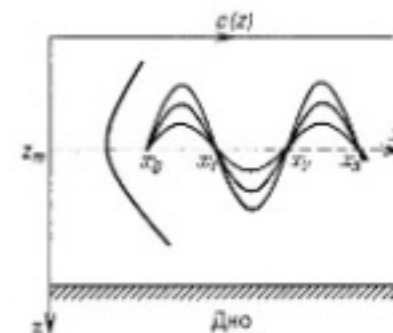


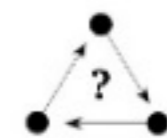
Рис. 3.7. Звуковий канал фокусує звук, що йде від джерела (x_0), як акустична лінза. Промені перетинаються в точках x_n , які називають фокусами.

Другою причиною ослаблення звуку слугує загасання звукової хвилі при її поширенні в морській воді. Енергія хвилі переходить у тепло через в'язкість води, а також через інші незворотні процеси. Крім того, звукова хвиля розсіюється в океані на різних неоднорідностях, якими можуть бути зважені у воді частинки, бульбашки повітря, планктон і навіть плавальні міхури риб.

Існування підводних звукових каналів використовується під час моніторингу температури океанів і інших великих водойм, адже імпульси низькочастотного звуку в них можуть долати тисячі кілометрів і все ще бути виявлені. Тривалості проходження імпульсів можуть бути виміряні за допомогою мережі станцій для моніторингу температури води. Порівняння цих даних з передбаченнями кліматичних моделей може дати певне уявлення про те, чи відбувається у світі глобальне потепління. Подібні експерименти здатні показувати коливання температури в океані з точністю до сотих градуса. Спостереження під льодами Північного полюса вказують на потепління на 0,5 градуса за останні 10 років.

За допомогою глобальної гідроакустичної мережі у Світовому океані контролюється дотримання угоди про заборону підводних ядерних випробувань. Ця мережа гідрофонів фіксує акустичні хвилі, що виникають у результаті підводних вибухів, а в деяких випадках і як наслідок вибухів у низьких шарах атмосфери.

На завершення зазначимо, що описаний підводний звуковий канал — аж ніяк не єдиний приклад хвилеводу, що існує в природі. Так, далеке радіомовлення з наземних радіостанцій можливе тільки завдяки поширенню радіохвиль в атмосфері гігантськими хвилеводами. У певних умовах в атмосфері можуть утворюватися хвилеводні канали і для електромагнітних хвиль світлового діапазону. Тоді, у результаті наддалеких міражів, у центрі пустелі можна побачити величний морський корабель, а серед океану раптом постає місто.



Покажіть, що траєкторії променів у підводному звуковому каналі підпорядковуються правилу гармонійних коливань.

⁴ Про причини «співу» водопровідних труб див. статтю О.М. Воїнова та О.І. Пальчикова (Квант, 1984, № 7).

⁵ В. Снеліус (1580–1626) — нідерландський математик, оптик і астроном.

⁶ Як і багато інших періодичних процесів, поширення променів параболічним хвильовим каналом слідує гармонічному закону. Траєкторії променів поблизу осі описуються рівнянням

$$\frac{d^2 \Delta z}{dx^2} = -b^2 \Delta z,$$

де роль часу виконує горизонтальна координата x . Очевидно, що траєкторії — це синусоїди $\Delta z = A \sin b(x - x_0)$, що перетинаються в точках, де синус дорівнює нулю, $x_n - x_0 = \pi n / b$.

У БЛАКИТНОМУ ПРОСТОРИ

Минулася буря — і сонце засяло,
Веселка всміхнулась в ясних небесах,
Проміння у краплях прозорих заграло,
І хмари у шати блискучі убрало,
І світ стрепенувся, мов збуджений птах.

Павло Тичина

Гостротою професійної спостережливості вирізняються художники, тому світ, зображений художниками-реалістами в їхніх пейзажах, особливо яскравий і багатовимірний, а окремі явища природи поступають виразніше. І при цьому навіть дуже хорошему художнику немає потреби розуміти часом досить складну сутність явищ, що відбуваються в природі, які він реалістично відображає на своїх полотнах. А от вивчати навколишній світ за картинами хорошого художника-пейзажиста можна навіть краще, ніж у природі, бо в пейзажі автор ніби зупиняє мить, інтуїтивно посилюючи значуще й опускаючи зайве, випадкове.

Вдивіться в картину Аркадія Олександровича Рилова «У блакитному просторі», її репродукцію наведено на першому форзаці книжки. «Білі птахи, як і хмари, легко летять, купаючись у голубій блакиті. І так само плавно, як білий птах, спокійно розгойданими синіми хвилями океану ковзає вкритий вітрилами корабель» — так описує цю картину відомий мистецтвознавець О. О. Федоров-Давидов. Милуючись у Третьяковській галереї цим чудовим полотном, забуваєш, що стоїш у залі музею, і відчуваєшся учасником цього свята природи.



Рис. 3. Картина А. О. Рилова «У блакитному просторі».