

Л.С. Долин, И.М. Левин

**ОБ ЭФФЕКТЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОДЪЕМЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ**

Объясняются причины известного эффекта аномального космического видения подводных объектов. Показано, что в самых благоприятных условиях дальность видимости крупных высококонтрастных объектов из космоса в наиболее чистых океанских водах может достигать 500 м.

Давно известен и широко обсуждается в литературе [1–4] эффект увеличения дальности видимости дна при подъеме наблюдателя над поверхностью водоема. С самолета дно видно лучше, чем с борта судна. Космонавтам удавалось наблюдать морское дно до глубин порядка 400 м [2], в то время как, согласно теоретическим оценкам и натурным наблюдениям, визуальная дальность видимости подводных объектов с поверхности или из-под воды даже в самых чистых океанских водах не превышает 100 м [5].

Какова же физическая природа рассматриваемого эффекта? На наш взгляд, зависимость видимости дна от высоты ( $H$ ) расположения наблюдателя можно объяснить несколькими основными причинами.

1. При наблюдениях с борта судна сильнейшее мешающее действие оказывает поверхностное волнение. Волнение приводит к возникновению пространственных флуктуаций изображения поверхности, накладывающегося на изображение дна. Кроме того, появляются искажения структуры воспринимаемого изображения, вызванные преломлением идущего от объекта света на наклонных участках взволнованной поверхности. Фотографирование подводных тест-объектов с надводной платформы ( $H = 8$  м) [5] показало, что даже при высокой прозрачности воды (видимость диска Секки  $z_6 = 20$  м) и относительно слабом волнении (скорость ветра  $v = 2,5$  м/с) дальность видимости мелких деталей в мгновенном изображении объекта может быть очень мала: при увеличении глубины погружения ( $L$ ) сначала ( $L = 1$  м) искажается форма элементов, затем ( $L = 5$  м) в изображении появляются разрывы, а при  $L = 10$  м информация о структуре объекта полностью утрачивается.

При увеличении высоты наблюдения пространственные флуктуации изображения дна и поверхности сглаживаются и уменьшаются (этот эффект подробно рассмотрен в [6, 7]). Кроме того, уменьшается и искажение мгновенных изображений. Действительно, можно показать [8], что если  $l$  — смещение точки в изображении, обусловленное волнением (и отсчитываемое в плоскости объекта), то дисперсия этого смещения

$$\sigma_l^2 = \frac{L^2 \sigma^2 (n-1)^2}{n^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия уклонов поверхности;  $n$  — показатель преломления воды. Волнение практически не приводит к искажению изображения, если размер подлежащего разрешению элемента  $D_{эл} \gg l$ . Поскольку с вероятностью 0,99 смещение  $l \lesssim 2,5\sigma_l$ , условие отсутствия искажений

$$D_{эл} \gg 2,5\sigma_l \quad (2)$$

или, используя для дисперсии уклонов выражение  $\sigma^2 = 3,16 \cdot 10^{-3}v$  [8] и значение  $n = 1,34$ , из (1), (2) получим:  $D_{эл} \gg 0,035L\sqrt{v}$ . Например, при  $v = 10$  м/с и  $L = 20$  м искажением изображения из-за волнения можно пренебречь для  $D_{эл} \gg 2$  м. Таким образом, достаточно крупные объекты видны через взволнованную границу практически без искажений. Но и задачей наблюдения с больших высот чаще всего является различение крупномасштабных структур.

Следует подчеркнуть, что рассматриваемый эффект не приводит к увеличению дальности видимости по сравнению с подводным наблюдением: в последнем случае дальность будет максимальной.

2. При увеличении  $H$  дальность видимости увеличивается за счет более перпендикулярного наблюдения участков плоскости объекта, лежащих на краю поля зрения (уменьшается расстояние «по лучу» от поверхности до края поля зрения). За счет этого эффекта максимальное увеличение дальности видимости из воздуха  $L$  по сравнению с дальностью видимости того же объекта из-под воды  $L'$  равно  $\cos^{-1}\varphi$ , где  $2\varphi$  — угол поля зрения (в воде). Например, при  $2\varphi = 90^\circ$  дальность увеличивается на 40%.

3. Основная причина улучшения видимости при увеличении  $H$ , на наш взгляд, заключается в том, что с больших высот наблюдаются крупные объекты (например, большие песчаные отмели с однородным коэффициентом отражения на фоне темных участков дна, покрытых водорослями), которые при наблюдении из-под воды или с малых  $H$  не «умещаются» в поле зрения и поэтому вообще не видны («большое видится на расстоянии»). Они могут оказаться невидимыми и при наличии мелко-масштабных неоднородностей коэффициента отражения, контраст которых (без учета помехи обрат-

ного рассеяния) ослабляется в воде по закону  $K \sim \exp(-\sigma L)$  ( $\sigma$  — показатель рассеяния). Вместе с тем при достаточно большом значении  $H$  наблюдатель начинает воспринимать как целое крупномасштабные неоднородности коэффициента отражения или крупномасштабные неровности рельефа дна, изображение которых, благодаря их большим размерам, переносится через водный слой без потери контраста (частотно-контрастная характеристика воды, как правило, стремится к 1 при увеличении размера элемента  $D_{эл}$ , и к  $\exp(-\sigma L)$  при уменьшении  $D_{эл}$  [1, 5]). При наблюдении неровностей рельефа дна яркостный образ крупномасштабного рельефа дна возникает, благодаря вариациям толщины водного слоя, через который наблюдаются различные элементы этого рельефа.

При объяснении явления «аномального космического видения», вероятно, следует учитывать и тенденцию увеличения прозрачности воды с ростом глубины (под сезонным термоклином).

Появившиеся в свое время сообщения о наблюдении космонавтами подводных хребтов привели к появлению гипотезы [3, 4], согласно которой ложное изображение этих хребтов может формироваться слоями повышенной мутности, поднимающимися на несколько километров от дна и повторяющими форму данного рельефа.

В заключение определим максимально достижимую дальность видимости крупных подводных объектов из космоса. Воспользуемся формулой для видимого контраста при наблюдении крупных объектов [5]

$$K = \frac{K_0 k k_a}{1 + B_\phi / B}, \quad (3)$$

где  $K_0$  — истинный контраст;  $k$  и  $k_a$  — частотно-контрастные характеристики воды и атмосферы;  $\bar{B}$  и  $B_\phi$  — средние яркости объекта и фона. При этом

$$B = \pi^{-1} n^{-2} E T_a R \exp(-\kappa L) \exp[-(\kappa + \varphi_0 \sigma) L \mu^{-1}], \quad B_\phi = \pi(E \rho_a + E T_a^2 \rho_n^{-2} + E T_a^2 \rho_n), \quad (4)$$

где  $E$  — облученность на верхней границе атмосферы;  $T_a$  — прозрачность атмосферы;  $R$  — средний коэффициент отражения объекта;  $\kappa$  — показатель поглощения;  $\varphi_0$  — параметр индикатрисы рассеяния воды (доля света, рассеянного назад);  $\mu$  — косинус зенитного угла Солнца;  $\rho_a$ ,  $\rho$  и  $\rho_n$  — коэффициенты яркости атмосферной дымки, яркости воды и поверхности.

Для крупных объектов можно принять  $k = k_a = 1$ . Поскольку мы проводим оценки «сверху», примем также  $K_0 = 1$ ,  $T_a = 1$ ,  $\varphi_0 = 0$  и максимальное значение  $R = 0,15$ . Тогда из (3), (4) получим

$$K = \left[ 1 + \frac{\rho + n^2(\rho_a + \rho_n)}{0,15 \exp[-(1 + \mu^{-1}) \kappa L]} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Примем далее типичное для чистых вод значение  $\rho = 0,02$  [5]; положим  $\mu = 0,88$  (зенитный угол Солнца  $\theta_0 = 40^\circ$ ). Для этого значения  $\theta_0$  для наиболее чистой атмосферы  $\rho_a = 0,04$  [9], а  $\rho_n = 0,01$  (при  $v = 10$  м/с) [5].

Подставив перечисленные значения в (5), положив  $K = K_{пр}$  ( $K_{пр} = 0,01$  — предельная контрастная чувствительность приемника [5]) и решив уравнение (5) относительно  $L$ , получим  $L \approx 2,3/\kappa$ .

Если в соответствии с [10] взять минимальное значение  $\kappa = 0,004$  м<sup>-1</sup> (длина волны 470–490 нм), то предельная дальность видимости  $L$  составит 575 м. Таким образом, зафиксированная космонавтами дальность видимости  $L = 400$  м является вполне реальной.

1. Белов В. В., Зуев В. Е., Креков Г. М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 9. С. 903–909.
2. Лазарев А., Севастьянов В. // Наука и жизнь. 1987. № 9. С. 27–32.
3. Прохоренко Ю. Д., Неуймин Г. Г. // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Таллинн. 1980. С. 117–121.
4. Соломаха В. Л., Федоров К. Н. // Оптика моря и атмосферы (тезисы докл.). Л., 1984. С. 248.
5. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 230 с.
6. Вебер В. Л., Долин Л. С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 11. С. 1166–1177.
7. Доценко Ф. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 4. С. 408–415.
8. Левин И. М., Литвин В. X. // Оптика моря. М., 1983. С. 166–169.
9. Шифрин К. С., Пятовская Н. П. // Таблицы наклонной дальности видимости и яркости дневного неба // Л.: Гидрометеиздат, 1959. 211 с.
10. Копелевич О. В., Шифрин К. С. // Оптика океана и атмосферы. М., 1981. С. 4–55.

Санкт-Петербургский отдел Института океанологии РАН,  
Институт прикладной физики РАН

Поступила в редакцию  
15 мая 1992 г.

#### L. S. Dolin, I. M. Levin. Effect of the Visibility Range Enhancement in Observations of Underwater Objects at Increasing Height of the Observation Point above Sea Surface

Nature of the known effect of anomalously high visibility of underwater objects observed from space is explained. It is shown that under most favourable conditions the visibility range of large highly contrast objects could reach 500 meters.