

1987, 36, 4

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1987.4.06>

УДК 629.783 : 551.426.6

**А. ЛАЗАРЕВ, В. КОВАЛЕНКО, Т. ДАМИНОВА, Ч. ВИЛЛМАНН**  
**НАБЛЮДЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА МОРЕЙ И ОКЕАНОВ**  
**ИЗ КОСМОСА**

(Представил К. К. Ребане)

Опыт визуальных наблюдений советских космонавтов показывает, что с околоземных орбит видно не только дальше, но и глубже, чем обычно. Это относится к наблюдениям как суши, так и морей и океанов. Причем, к наблюдениям морей и океанов в прямом смысле этого слова. Многие советские космонавты наблюдали из космоса дно морей и океанов на глубинах в десятки и сотни метров. В первое время к этим сведениям относились очень осторожно. Дело в том, что с кораблей и самолетов дно морей и океанов в лучшем случае видно на глубинах в несколько десятков метров. Поэтому результаты наблюдений морского и океанского дна из космоса пытались объяснить оптическими эффектами, вызванными скоплениями взвешенных в воде частиц, возникающих при обтекании подводными течениями рельефа дна.

Впервые за глубоководным рельефом дна морей и океанов из космоса следил американский астронавт Купер с космического корабля «Джемини-5» в августе 1965 г. Первыми из советских космонавтов такие же наблюдения вели А. Г. Николаев и В. И. Севастьянов с космического корабля «Союз-9» в июне 1970 г. [1].

По записям в бортжурналах и рассказам советских космонавтов выяснилось, что явных случаев наблюдения рельефа дна морей и океанов из космоса шесть: в 1970 г. — А. Г. Николаев, В. И. Севастьянов; в 1974 г. — А. В. Сарафанов, Л. С. Демин; в 1975 г. — П. И. Климук, В. И. Севастьянов; в 1978 г. — В. В. Коваленок, А. С. Иванченков; в 1979 г. — В. А. Ляхов, В. В. Рюмин; в 1980 г. — В. А. Ляхов, В. В. Рюмин.

Для примера приведем здесь сведения В. А. Ляхова и В. В. Рюмина, полученные в мае—июне 1980 г. с борта орбитальной станции «Салют-6» в ходе наблюдений подводного рельефа дна в некоторых участках Атлантического и Тихого океанов на глубинах в сотни метров [2]. В частности, в Атлантическом океане они отметили пятно диаметром 30—40 км в районе с координатами  $\varphi=23^{\circ}$  S и  $\lambda=9^{\circ}$  W, которое могло быть подводной горой Юинга, а в Тихом океане в районе около  $\varphi=35^{\circ}$  N и  $\lambda=164^{\circ}$  W на глубине 250 м видели гору на восточном фланге возвышенности Шатского.

По данным космонавтов, подводные горные хребты воспринимаются так же, как и горные хребты на поверхности Земли. Они видны как образ горы, а не как изменения оптических характеристик воды, возникающие при взаимодействии океана (главным образом течений) с подводными горными хребтами. Подводные горные хребты отличаются от других океанических образований землисто-серым цветом, неравномерно распределенным по структуре хребта. Поэтому космонавты по визуальному восприятию цветовых контрастов безошибочно отличают планктон или взвесь в океане от подводных горных хребтов.

Анализ результатов наблюдений рельефа дна морей и океанов советскими космонавтами на глубинах в сотни метров показал, что они проводились при следующих условиях:

- высота Солнца над горизонтом  $38^\circ$ — $40^\circ$ ;
- наблюдения проводились в направлении угла рассеяния  $90^\circ$ — $110^\circ$  и в направлении от надира до  $18^\circ$ — $20^\circ$ ;
- были видны пятна одного и того же цветового контраста с некоторыми изменениями яркости.

В чем же дело? Почему из космоса виден рельеф дна морей и океанов на глубинах до сотни метров? Почему этого не видно с надводного корабля?

I. Рассмотрим более подробно эту проблему. Возможность этих наблюдений, как и любых других наблюдений протяженных источников, определяется пороговыми значениями частотно-контрастных характеристик исследуемой из космоса картины подводного рельефа дна морей и океанов. При этом анализ или регистрация возможны только на тех частотах и при таких условиях, при которых видимый из космоса контраст подводного рельефа дна превышает пороговое значение контрастной чувствительности зрительной системы или регистрирующей аппаратуры.

Пороговые значения контрастной чувствительности зрительной системы наиболее благоприятны в диапазоне частот 0,040—0,10 лин/угл. мин и обнаруживают ухудшение как в сторону более высоких, так и в сторону более низких частот. Следовательно, с высоты полета орбитальной станции «Салют-6» (около 350 км) наиболее благоприятными для наблюдения в надир являются наземные и морские объекты и образования с линейными размерами 1—3 км. Пороговое значение контраста зрительной системы при дневных условиях освещения для этих частот колеблется около 1%. Кстати, заметим, что при наблюдении через иллюминатор в условиях малых угловых размеров фонового поля существенно улучшаются некоторые пороговые характеристики зрительной системы космонавтов. Естественно, что для исследования объектов или образований с меньшими или большими размерами необходим более высокий контраст.

Видимая из космоса яркость дна морей и океанов  $B_D$  на глубинах в сотни метров невелика по сравнению с видимой из космоса яркостью океана  $B_0$ . Поэтому дно морей и океанов можно изучать при условии минимальной видимой яркости океана  $B_0$ , которая включает видимую из космоса яркость отраженного поверхностью океана  $B_{OP}$  излучения Солнца и атмосферы и видимую из космоса яркость рассеянного толщей морской воды  $B_{ОР}$  излучения Солнца и атмосферы. Выбор условий освещения, при которых минимально значение  $B_0$ , но еще достаточно  $B_D$  сводится к выбору условий, при которых максимально отношение

$$\frac{B_D}{B_{OP} + B_{ОР}} \quad (1)$$

Отраженное от поверхности океана излучение Солнца и атмосферы можно оценить по френелевским формулам с учетом взволнованности поверхности океана. Наиболее интенсивна составляющая, связанная с зеркальным отражением прямого солнечного излучения. От взволнованной поверхности океана Солнце отражается в виде блика или солнечной дорожки, угловые размеры которых зависят от степени взволнованности поверхности океана и могут достигать  $\pm 30^\circ$  во всех направ-

лениях зеркального отражения. Это излучение частично поляризовано в соответствии с законами френелевского отражения. Естественно, исследования подводных объектов и образований в направлении блика, особенно в его самой яркой зоне  $\pm 15^\circ$  от направления зеркального отражения, практически невозможны, из-за высокой яркости океана.

Вторая составляющая  $B_{\text{оп}}$  включает отраженное от поверхности океана излучение атмосферы. Оно также частично поляризовано, поскольку поляризация при отражении от поверхности океана происходит по френелевскому закону. Кроме того, известно, что частично поляризовано также излучение атмосферы, причем максимум наблюдается при угле рассеяния  $90^\circ$ , а степень поляризации зависит от замутненности атмосферы. Следует отметить, что над океаном расположена наиболее чистая, наименее замутненная атмосфера, поэтому степень поляризации рассеянного атмосферой солнечного излучения при углах рассеяния  $90^\circ$  будет достаточно высокой. Следовательно, при наблюдении поверхности океана под углом рассеяния  $90^\circ$  и в направлениях, близких к углу Брюстера, частично поляризованное излучение атмосферы существенно уменьшается за счет эффекта поляризации при френелевском отражении от поверхности океана. Таким образом, величина  $B_{\text{оп}}$  будет минимальной при наблюдении вне зоны бликов солнца при углах рассеяния излучения около  $90^\circ$  и в направлениях, близких к углу Брюстера.

Вторая составляющая  $B_{\text{ор}}$  зависит в основном от уровня солнечной освещенности и индикатрисы рассеяния морской воды, которая сильно вытянута вперед, слегка вытянута в противоположном направлении и имеет минимум при углах рассеяния  $120^\circ$ — $130^\circ$ . Таким образом, величина  $B_{\text{ор}}$  при прочих условиях равенства будет минимальной в направлении углов рассеяния  $120^\circ$ — $130^\circ$ .

Сопоставляя условия минимизации значений  $B_{\text{оп}}$  и  $B_{\text{ор}}$  можно предположить, что видимая яркость океана минимальна при наблюдениях в направлении вне зоны солнечных бликов при углах рассеяния между  $90^\circ$ — $130^\circ$ , причем в направлениях, при которых угол визирования не превышает угла Брюстера.

Несколько слов о величине видимой из космоса яркости дна морей и океанов  $B_{\text{д}}$ . Наиболее благоприятны условия наблюдения дна морей и океанов при максимальном контрасте

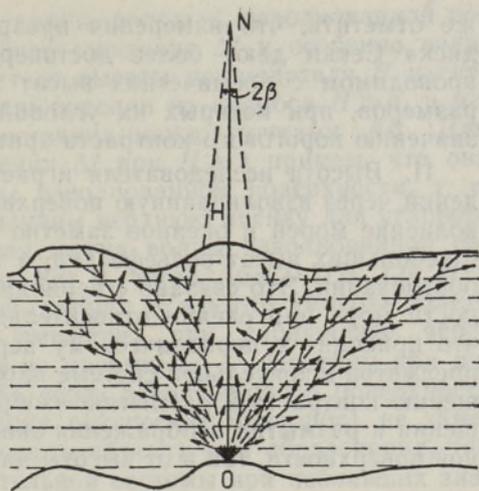
$$K_{\text{д}} = \frac{B_{\text{д}}}{B_{\text{о}} + B_{\text{д}}}, \quad (2)$$

который зависит от условий освещенности, условий наблюдения и прозрачности морской воды.

Анализ этих условий показывает, что глубина, на которой возможно изучение рельефа дна морей и океанов, существенно зависит от высоты наблюдателя. Этот неожиданный эффект обусловлен тем, что в элемент разрешения зрительной системы наблюдателя из космоса попадает не только прямое излучение со дна морей и океанов, но и та его часть, которая рассеивается толщей морской воды. При этом, чем выше находится наблюдатель, тем глубже он видит. Кроме того, при исследовании из космоса практически не сказывается искажающее влияние взволнованной поверхности океана. Кстати, и оценки прозрачности морской воды, полученные по экспериментальным исследованиям, также зависят от высоты наблюдателя (или измерительной аппаратуры) и частотно-контрастной характеристики зрительной системы (или измерительной аппаратуры).

Рис. 1. Схема наблюдения рельефа дна океана:  $O$  — объект,  $N$  — наблюдатель,  $2\beta$  — разрешающая способность зрительной системы наблюдателя.

Поясним это схемой, изображенной на рис. 1. Излучение от объекта  $O$ , распространяющееся в морской воде и в атмосфере в направлении к наблюдателю  $ON$  многократно рассеивается в воде и в других направлениях (рис. 1). При этом на поверхности океана образуется светящаяся область, размеры и распределение яркости в которой зависят от глубины объекта  $O$  и рассеивающих свойств морской воды.



Таким образом, в элемент разрешения зрительной системы наблюдателя  $N$ , имеющей при контрасте  $K_D$  разрешающую способность  $2\beta$ , в зависимости от высоты его нахождения попадает световой поток от площади на поверхности морской воды, ограниченной телесным углом, определенным разрешающей способностью с линейным углом  $2\beta$ . Естественно, что при наблюдении с различных высот  $H$  в элемент разрешения зрительной системы попадают различные световые потоки. Если осуществляются оценки прозрачности морской воды, то они также зависят от высоты, с которой проводятся наблюдения. Следовательно, при одинаковом угловом разрешении возможность наблюдения рельефа дна морей и океанов существенно зависит от высоты наблюдателя.

Нами рассмотрены условия наблюдения одной точки подводного образования. Аналогично можно проанализировать и условия наблюдения ряда точек, характеризующих излучение протяженного подводного образования, угловые размеры которого при исследовании из космоса в условиях, когда контраст  $K_D$  данного образования превышает соответствующую разрешающую способность зрительной системы. Рассеяние в морской воде приводит к тому, что видимое изображение протяженного подводного объекта или образования размыто, при этом степень размытости зависит от глубины подводного объекта или образования и рассеивающих свойств морской воды. При наблюдении подводных объектов и образований, находящихся на глубинах в сотни метров, с небольших высот наблюдатель видит их размытое изображение, которое зрительной системой не воспринимается в виде четкой картины. Примерно также зрительной системой не воспринимается в виде четкого изображения большая картина с близкого расстояния. С увеличением высоты наблюдателя угловые размеры размытия изображения уменьшаются и постепенно зрительная система начинает воспринимать вначале отдельные, наиболее контрастные детали наблюдаемой картины рельефа дна, а затем всю ее целиком. При этом размытие видимой картины рельефа дна приводит к тому, что в ней практически невозможно различить небольшие детали подводного объекта или образования, а видны только достаточно крупные элементы.

Качественно можно показать, что наиболее благоприятны возможности наблюдения из космоса с высоты около 350 км, при этом линейные размеры отдельных образований рельефа дна морей и океанов должны составлять несколько километров. В связи с этим можно так-

же отметить, что измерения прозрачности морской воды с помощью диска Секки дают более достоверные результаты при исследовании, проводимом с космических высот и при использовании дисков таких размеров, при которых их угловой размер соответствует наилучшему значению порогового контраста зрительной системы.

II. Высота исследователя играет существенную роль и при наблюдении через взволнованную поверхность морей и океанов. Известно, что волнение морей и океанов заметно ухудшает возможности наблюдения с небольших высот рельефа дна, а также других подводных объектов и образований. Это связано с периодическим изменением наклона поверхности моря или океана относительно направления линии визирования, что приводит к периодическому перемещению изображения подводных предметов в зрительной системе наблюдателя и, следовательно, к уменьшению контраста и размытию изображения. Величина углового перемещения и размытия изображения зависит как от параметров взволнованной поверхности, так и от высоты наблюдателя.

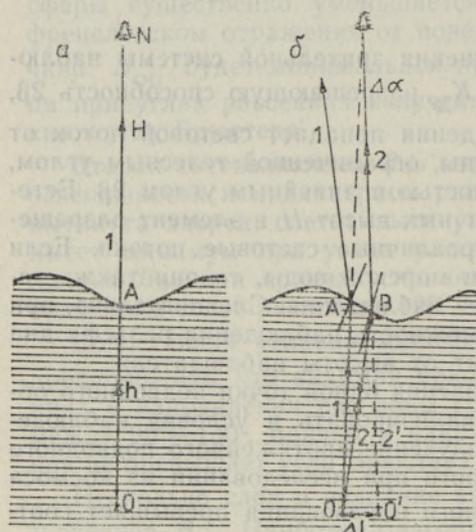


Рис. 2. Наблюдения подводных объектов и образований через взволнованную поверхность океана:  $O$  — объект,  $N$  — наблюдатель,  $H$  — высота наблюдателя,  $h$  — глубина объекта,  $A$  — точка пересечения линии  $ON$  с поверхностью океана,  $\Delta l$ ,  $\Delta \alpha$  — кажущиеся смещения объекта при наблюдении,  $1$ ,  $2$  — лучи,  $2'$  — кажущееся направление луча  $2$ ,  $B$  — точка пересечения луча  $2$  при наблюдении через наклонный участок поверхности океана.

В связи с этим рассмотрим условия исследования подводных объектов и образований через взволнованную поверхность морей и океанов при наблюдении с высоты полета орбитальной станции «Салют-6». С целью упрощения рассмотрим эти условия для случая визирования в надир. На рис. 2 изображен ход лучей от одной из точек подводного объекта  $O$  через взволнованную поверхность для двух положений взволнованной поверхности относительно линии объект—наблюдатель  $ON$ . В первом положении (рис. 2, а) в точке  $A$  пересечения взволнованной поверхности и линии объект—наблюдатель  $ON$  поверхность горизонтальна и вертикальный луч  $1$  от объекта  $O$  проходит через границу раздела вода—воздух без изменения направления и попадает к наблюдателю. Во втором положении (рис. 2, б) в точке пересечения  $A$  линии объект—наблюдатель  $ON$  с взволнованной поверхностью моря или океана поверхность имеет максимальный наклон относительно горизонта и вертикальный луч  $1$  от объекта  $O$  после преломления изменяет свое направление и не попадает к наблюдателю  $N$ . К наблюдателю попадает луч  $2$ , преломленный на взволнованной поверхности в точке  $B$ . Поэтому наблюдателю кажется, что объект  $O$  переместился на расстояние  $\Delta l$  в точку  $O'$ . Не трудно показать, что расстояние между точ-

ка́ми  $AB$  не превышает четверти длины волны  $L$  взволнованной поверхности моря или океана. Линейное смещение  $\Delta l$  и особенно величина углового смещения  $\Delta\alpha$  зависят от высоты наблюдателя  $H$  и глубины подводного объекта  $h$ . При наблюдении из космоса  $H \gg h$ , а величина  $\Delta l$  мало отличается от расстояния между точками  $AB$ . Для верхней оценки кажущегося смещения  $\Delta l$  при  $H \gg h$  примем, что оно составляет четверть длины волны взволнованной поверхности, т. е.  $L/4$ . Тогда, учитывая, что  $H \gg h$ , получим верхнюю оценку для углового смещения  $\Delta\alpha \leq L/4H$ . Максимальная длина волны взволнованной поверхности океана составляет около 400 м, тогда  $\Delta\alpha \leq 0,1/H$ , где  $H$  в км. Таким образом, для орбитальной станции «Салют-6» (высота полета около 350 км) величина углового смещения при наблюдении через взволнованную поверхность океана не превышает  $1'$ . Поэтому при визуальном наблюдении с «Салюта-6» через взволнованную поверхность океана космонавт (без использования оптических приборов) не замечает смещения изображения подводного объекта или образования, так как разрешающая способность зрительной системы при небольших значениях контрастов, характерных для подводных объектов и образований, значительно больше одной минуты.

Следовательно, для наблюдателя на орбитальной станции «Салют-6» изображения подводных объектов и образований через взволнованную поверхность морей и океанов будут неподвижными и неразмытыми. Подводя итоги, можно сказать, что волнение морей и океанов не оказывает существенного влияния на возможность наблюдения с орбитальной станции «Салют-6» подводных объектов и образований, угловые размеры которых превышают разрешающую способность зрительной системы космонавта.

\*

При одинаковой прозрачности морской воды значения  $V_d$  будут иметь максимальные уровни в случае наблюдения в надир при Солнце, находящемся вблизи зенита. Однако при этих условиях наблюдения в поле зрения попадают яркие солнечные блики, что существенно уменьшает видимый из космоса контраст подводного образования на фоне бликующей поверхности моря или океана. Наиболее благоприятными для наблюдения рельефа дна морей и океанов, по всей вероятности, будут следующие условия:

- высота Солнца над горизонтом  $30-40^\circ$ ,
- углы рассеяния от  $90^\circ$  до  $150^\circ$ ,
- углы визирования, не превышающие  $30-40^\circ$  от направления надира и обязательно вне зоны бликов.

Таким образом, некоторое совпадение экспериментальных условий освещения и наблюдения и результатов качественного рассмотрения оптимальных условий наблюдения рельефа дна морей и океанов позволяет высказать предположение о возможности визуальных наблюдений из космоса таких мало контрастных образований, как крупные элементы рельефа дна морей и океанов на глубинах в сотни метров.

На космических фотоснимках также можно зарегистрировать подводный рельеф дна морей и океанов, но только на значительно меньших глубинах, чем при визуальных наблюдениях. Это связано с тем, что пороговые контрасты при фотографической регистрации почти на порядок ниже, чем у зрительной системы при дневных условиях наблюдения. Одна из первых попыток анализа фотографий рельефа дна предпринята в [3]. В ней отмечается, что «фотографирование из космоса дает изображение подводного рельефа до большей глубины, чем аэрофотосъемка. Подводные песочные валы и отмели при благоприят-

ных условиях съемки различимы по более светлому тону или оттенкам цвета на цветных фотографиях». В частности, на фотографиях Багамских островов в районе острова Аклин подводный рельеф лагуны просматривается до глубины 50—80 м. На фотографиях наиболее светлыми изображаются участки дна с глубинами 2—4 м. Глубинам до 40 м соответствует светло-серый тон, глубинам до 80 м — темновато-серый.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Освоение космического пространства в СССР, 1973. М., «Наука», 1975.
2. Исаков В. Т., Коваленок В. В., Лазарев А. И., Даминова Т. А. Исследование Земли из космоса, № 1, 20—25 (1986).
3. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Л., Гидрометеонздат, 1972.

*Институт астрофизики и физики атмосферы  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
4/II 1987

*Государственный оптический институт  
им. С. И. Вавилова*

*Отряд космонавтов СССР*

A. LAZAREV, V. KOVALJONOK, T. DAMINOVA, Ch. VILLMANN

#### MERE JA OOKAANI PÕHJARELJEEFI VAATLUSED KOSMOSEST

Töös on analüüsitud Nõukogude kosmonautide poolt orbitaaljaamast «Saljut-6» tehtud avaookeani põhjareljeefi visuaalvaatlusi. Tõdetakse, et teatud tingimustel on võimalik kosmosest näha mere ja ookeani põhjareljeefi kuni mõnesaja meetri sügavuseni. Seejuures lainetav ookeanipind eriti ei häiri niisuguseid vaatlusi.

A. LAZAREV, V. KOVALYONOK, T. DAMINOVA, Ch. VILLMANN

#### OBSERVATIONS OF THE BOTTOMRELIEF OF THE SEA AND OCEAN FROM SPACE

The paper deals with the results of studying the visual observations of the bottom-relief of the open ocean obtained by Soviet astronauts aboard the orbital station «Salyut-6». It is shown that in some conditions it is possible to examine bottom-relief of the sea and ocean from space at a depth of one hundred meters. Agitate seasurface has no considerable influence on these observations.