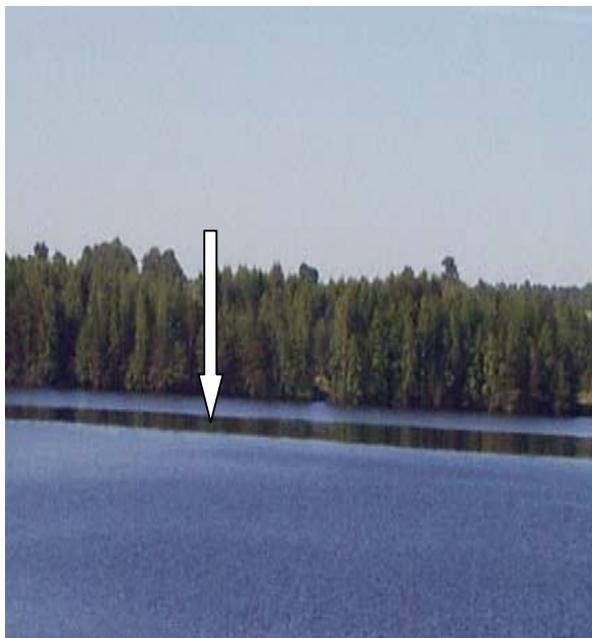


СЛИКИ И БЛИКИ

Учебный материал, подготовленный в рамках ФЦП
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»
Соглашение 8332



Пленочный слик (показан стрелкой)



Солнечные блики и изображение волн
в отраженном свете неба

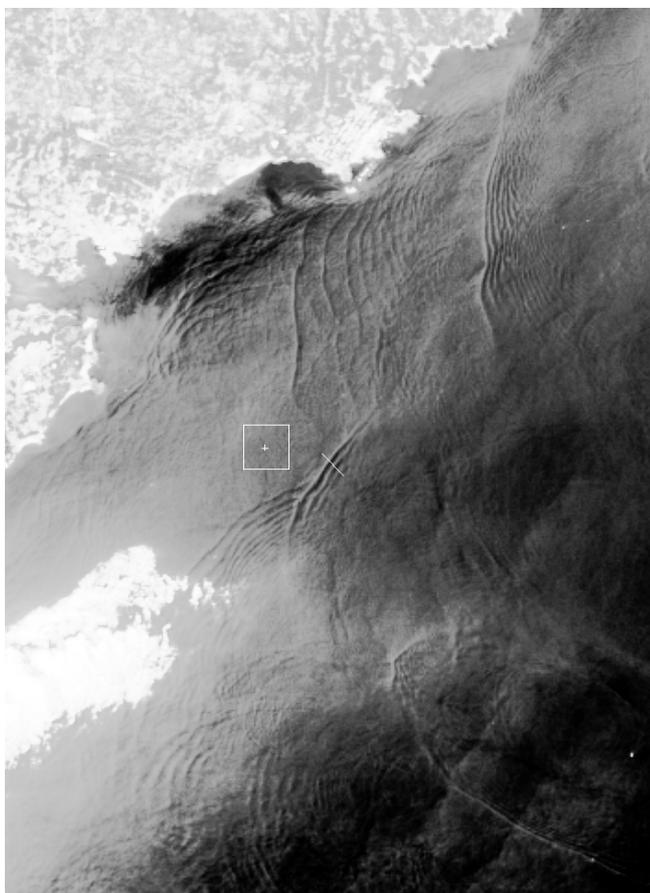
В настоящее время оптические средства наблюдения стали играть важную роль в решении задач дистанционного контроля физических параметров Океана и протекающих в нем динамических процессов. Изображения морской поверхности, получаемые со спутников, летательных аппаратов, судов, океанологических платформ и береговых сооружений используются для получения информации о характеристиках ветрового волнения и факторах, определяющих его изменчивость, таких как ветер, поверхностные течения, внутренние волны (ВВ), пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ). С помощью космических сканеров цвета определяется состав растворенного и взвешенного в воде вещества, оценивается биопродуктивность наблюдаемого района Океана. На основе лидарной, телевизионной и спектрофотометрической технологий создаются самолетные комплексы аппаратуры для картографирования и профилирования мелководных участков дна и контроля мутности воды.

Извлечение полезной информации из изображений морской поверхности невозможно без хорошего понимания механизмов изменчивости ветрового волнения и использования математических моделей, устанавливающих взаимосвязь между характеристиками изображения и взволнованной водной поверхности.

Аномалии ветрового волнения

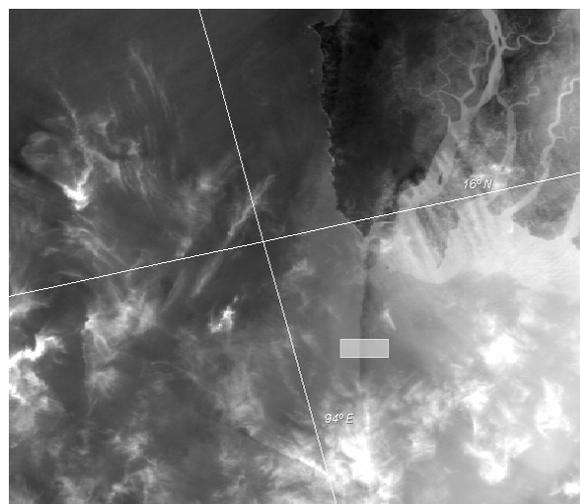
Весьма распространенными аномалиями ветрового волнения являются слики и сулои. Сликами называют области с пониженной интенсивностью коротких ветровых волн, а сулоями - области с повышенной интенсивностью. Большое разнообразие форм сликов и сулоев (полосы, спирали, пятна, нитевидные структуры и т.д.) обусловлено структурой переменных приповерхностных течений, которые связаны с зонами фронтов, внутренними и

длинными поверхностными волнами, океаническими и приповерхностными вихрями и т.д. Приповерхностные течения оказывают как непосредственное влияние на короткие гравитационно-капиллярные волны («кинематический» механизм), так и косвенное - через перераспределение поверхностно-активных веществ («пленочный» механизм). Кинематический механизм определяет трансформацию поверхностных волн за счет эффекта «растяжения» – изменения длины волны и ее интенсивности в поле переменного течения. Волны при этом могут как усиливаться, так и подавляться с образованием и сликов, и сулоев. Пленочный механизм связан с эффектом дополнительного (по сравнению с чистой водой) затухания коротких гравитационно-капиллярных волн в областях, покрытых пленками. Именно поэтому на водной поверхности хорошо видны области загрязнений, в том числе нефтяных. Поверхностно-активные вещества практически повсеместно в той или иной степени присутствуют на морской поверхности (например, вещества, выделяемые морскими организмами в процессе жизнедеятельности), их перераспределение приводит к образованию областей с повышенной концентрацией поверхностно-активных веществ и пониженной интенсивностью коротких ветровых волн. Пленочный механизм, как правило, действует одновременно с кинематическим и фактически является «усилителем» проявлений переменных течений на морской поверхности.



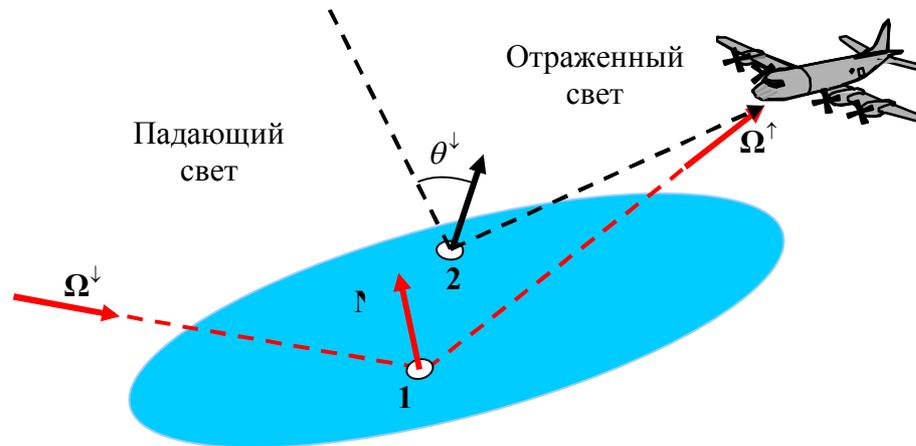
MERIS image (Green Band; 560 nm) 01 August 2003 (Cape Finisterre, Spain)

Космический снимок водной поверхности, на котором отчетливо видны поверхностные проявления внутренних волн



Фрагмент спутникового изображения Meris 26.12.2004г. (длина волны регистрируемого излучения 412 нм). На снимке представлен район г. Рангуна, через три часа после землетрясения в районе о-ва Суматры, ставшего причиной возникновения волны цунами в Индийском океане. Отчетливо видна вертикальная темная полоса – область выглаженной ряби (помечена прямоугольником). Механизм воздействия длинной волны на ветровую рябь основан на том, что орбитальные скорости в волне на поверхности океана вызывают вариации скорости воздушного потока, что, в свою очередь, приводит к изменению эффективной скорости трения и инкремента роста коротких ветровых волн и, соответственно, интенсивности ветровой ряби.

Почему мы видим волны?



Картина волн на поверхности воды может существенно меняться в зависимости от условий освещения и наблюдения. В основном мы видим волны благодаря отражению света от границы раздела воздух-вода, хотя прошедший через границу свет из-за рассеяния в воде частично возвращается обратно и тоже принимает участие в формировании их изображения.

Рельеф поверхности становится видимым, если яркость наблюдаемого элемента поверхности зависит от его ориентации (уклона). При неоднородной яркости небосвода яркость отраженного поверхностью света будет зависеть от ее уклона потому, что при изменении уклона меняется положение точки небосвода, из которой приходит свет в глаз наблюдателя. Другими словами: рельеф поверхности может стать видимым благодаря тому, что в элементах поверхности с различным наклоном мы видим зеркальные отражения частей небосвода, имеющих разную яркость. Это поясняет рисунок, на котором белыми кружочками показаны элементы поверхности **1** и **2** с различными уклонами. Через $\mathbf{N}(\mathbf{r})$ обозначена единичная нормаль к поверхности в точке с горизонтальными координатами $\mathbf{r}(x, y)$, единичные вектора Ω^\downarrow и Ω^\uparrow характеризуют направления падающего и отраженного лучей света. Из рисунка видно, что если яркость небосвода растет к горизонту, то элемент **1** будет более светлым по сравнению с элементом **2**, повернутым к наблюдателю.

Изменения яркости отраженного поверхностью света возникают также из-за того, что ее отражательная способность зависит от локального угла падения света на поверхность θ^\downarrow , который в свою очередь зависит от уклона поверхности (см. рисунок). Коэффициент отражения поверхности растет с увеличением угла падения θ^\downarrow , и за счет этого элемент поверхности **1** будет становиться светлее элемента **2**.

Обычно ориентацию элемента поверхности характеризуют не нормалью $\mathbf{N}(\mathbf{r})$, а ее горизонтальной составляющей $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r})$, которую называют вектором уклона поверхности. Направления падения и отражения света тоже можно характеризовать горизонтальными составляющими \mathbf{n}_\downarrow , \mathbf{n}_\uparrow векторов Ω^\downarrow и Ω^\uparrow . При условии малости уклонов поверхности справедливы соотношения

$$\mathbf{n}_\downarrow(\mathbf{r}) \approx \mathbf{n}_\uparrow - 2\sqrt{1-n_\uparrow^2}\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}), \quad \cos\theta^\downarrow(\mathbf{r}) \approx \sqrt{1-n_\uparrow^2} - \mathbf{n}_\uparrow\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

которые показывают, из какой точки небосвода и под каким углом к поверхности пришел луч света, образовавший изображение элемента поверхности с горизонтальными координатами \mathbf{r} . Направление прихода луча от этого элемента к фотоприемнику определяется формулой

$$\mathbf{n}_\uparrow(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{R}_\perp - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|}, \quad (2)$$

где \mathbf{R} это радиус-вектор точки расположения фотоприемника, а \mathbf{R}_\perp - его горизонтальная составляющая. Используя соотношения (1) и (2), яркость изображения поверхности можно представить в виде

$$I(\mathbf{r}) = R_\phi [\cos\theta^\downarrow(\mathbf{r})] I^\downarrow[\mathbf{n}_\downarrow(\mathbf{r})] \quad (3)$$

через распределение уклонов $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r})$, коэффициент отражения Френеля R_ϕ плоской границы раздела сред воздух-вода (как функцию косинуса угла падения света на границу) и яркость падающего света I^\downarrow как функцию горизонтальной составляющей вектора $\boldsymbol{\Omega}^\downarrow$.

В формировании изображения поверхности в общем случае участвует прямой свет Солнца и свет неба, т.е. свет Солнца, рассеянный атмосферой. В результате отражения от поверхности прямого света Солнца образуется солнечная дорожка, которая несет информацию об уклонах поверхности в бликующих точках. Ее размеры зависят от высоты Солнца и характеристик волнения. Солнечную дорожку в основном используют для оценки функции распределения и дисперсии уклонов поверхности, хотя в сглаженной картине бликов может также проявляться крупномасштабная модуляция яркости поверхности, порождаемая длинными волнами.



Наиболее «правильное» изображение волн получается при их наблюдении в отраженном свете неба на участках поверхности, свободных от солнечных бликов. Для упрощения задачи определения характеристик волн по их изображению наблюдение целесообразно проводить в условиях, когда изображение формируется светом участка неба с линейно-неоднородной яркостью. При этом согласно (1)-(3) вариации видимой яркости поверхности будут непосредственно воспроизводить ее уклоны.

Материал подготовили Л.С. Долин и И.А. Сергиевская