ВЛИЯНИЕ ВОЛНЕНИЯ МОРЯ НА ОТРАЖЕНИЕ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

А.Х. Дегтерев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины.
Севастополь, ул. Капитанская, 2.

Путем численного моделирования рассчитаны траектории лучей, падающих на искривленную плоской волной поверхность моря. Учитывалось зависимость локального альбедо от наклона гребня волны, эффекты затенения гребня и вторичного отражения. Получена зависимость интегрального альбедо от высоты Солнца над горизонтом и крутизны волн. Показано, что при малой высоте Солнца из-за волнения альбедо понижается на 30 %..

Построение современных климатических моделей тесно связано с адекватным описанием составляющих радиационного баланса поверхности моря. Благодаря работам Кокса и Манка [1], а также других авторов в настоящее время сам факт зависимости коэффициента отражения неполяризованного света от степени волнения моря хорошо известен. Однако количественное описание этого эффекта связано со значительными трудностями [2]. Необходимо учитывать точную форму гребня волны, эффекты затенения одного гребня другим и множественного отражения света от склонов соседних гребней. Попытки экспериментального и аналитического решения этой задачи для случая плоской монохроматической волны были сделаны в работах [1,3], но они привели к противоречивым результатам. Так, в работе [1] при малой высоте Солнца над горизонтом альбедо поверхности моря существенно зависит от волнения, а в работе [3] существование такой зависимости вообще отвергается. Эти расхождения связаны в первую очередь с неадекватным описанием множественного отражения солнечных лучей [1]. В связи с этим в ряде работ впоследствии вообще не учитывалось влияние изменения альбедо при волнении на тепловой баланс поверхности моря [4]. В тоже время применение численных методов, в частности траекторно-имитационного подхода [5], позволяет решить данную задачу. По сути речь идет о построении хорошо известной в гидроакустике лучевой картины [6].

Как известно, отражение неполяризованного света от горизонтальной поверхности воды описывается формулами Френеля [1], в соответствие с которыми коэффициент отражения α выражается через угол падения θ_1 и угол преломления луча θ_2, которые отсчитываются от нормали к поверхности воды:

$$\alpha = [\sin^2(\theta_1 - \theta_2) / \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + \\ + \mathrm{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)/\mathrm{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)] /2 \quad (1)$$

Искривление поверхности воды при волнении приводит к тому, что на разных участках волны угол падения солнечных лучей становится разным и, соответственно, меняется коэффициент отражения. Представляет интерес оценить, чему равен при этом средний по периоду волны коэффициент отражения.

Рассмотрим плоскую монохроматическую волну, волновой вектор которой коллинеарен направлению на юг. Эта ситуация соответствует полуденному положению Солнца для волны, распространяющейся в меридиональном направлении. Прослеживая траектории пучка лучей, которые падают на волну при фиксированной высоте Солнца над горизонтом, нетрудно получить осредненные по длине волны результаты, приведенные в таблице 1. При этом считалось, что форма волны описывается синусоидой, а углы θ_1 и θ_2 связаны законом Снеллиуса [1]. Расчеты показывают, что если описывать волну формулой Стокса [2], то для волн малой крутизны результаты практически те же. Учитывался также эффект двойного отражения луча от соседних гребней волны, приводящий к уменьшению результирующего коэффициента отражения. При большой крутизне волн и высоте Солнца 10-15° вторичное отражение испытывают 11-12 % падающих на волну лучей. Из таблицы 1 видно, что хотя при высоте Солнца свыше 20° эффект отражения от искривленной поверхности ведет к увеличению отражения солнечных лучей, однако с учетом двойного отражения интегральный коэффициент отражения при большой крутизне волн и малой высоте Солнца меньше, чем от гладкой поверхности.

Таблица 1 – Зависимость коэффициента отражения поверхности моря (в %) от высоты Солнца над горизонтом для волн разной крутизны. В скобках даны значения с учетом множественного отражения.

Высота Солнца, °	Крутизна 0.1	Крутизна 0.05	Отсутствие волн
10	27,8 (24,7)	33,8 (33,8)	34,7
20	14,0	13,9	13,3
30	6,7	6,4	5,9
40	3,6	3,5	3,3
50	2,5	2,5	2,4
60	2,2	2,1	2,1
70	2,0	2,0	2,0

Разница особенно велика при малой высоте Солнца над горизонтом, когда оба эффекта ведут к уменьшению этого коэффициента и где зависимость α от угла падения (1) особенно сильна. При высоте Солнца 10-20° в зависимости от крутизны волны коэффициент отражения прямой солнечной радиации поверхностью воды уменьшается при волнении на 30%.

В работе [1] отличие альбедо α при волнении от альбедо α_0 в отсутствие волн описывается формулой вида:

$$\alpha = \alpha_0 \left[1 + C^* f(\theta_1)\right] , \qquad (2)$$

где параметр С характеризует крутизну волны. Приведенные в табл.1 результаты хорошо согласуются с представленной графически функцией $f(\theta_1)$, если под θ_1 понимать дополнение к высоте Солнца над горизонтом.

Полученная оценка соответствует наиболее сильному проявлению эффекта. В общем случае солнечные лучи падают таким образом, что соответствующий им единичный вектор **s** не лежит в одной плоскости с волновым вектором **k**, характеризующим направление распространения волны. Обозначим единичный вектор, направленный по нормали к поверхности воды в данной точке через **n**. При нулевом склонении Солнца вектор **s** параллелен плоскости экватора, поэтому в истинный полдень угол падения солнечных лучей на горизонтальную плоскость равен широте места φ. Соответственно проекция вектора **n** на вектор **s** равна $-\cos(\varphi)$. Фронт меридианально распространяющейся волны в полдень ориентирован по нормали к **s**, поэтому наклон гребня на угол β в направлении на юг соответствует углу падения величиной $\varphi - \beta$, в связи с чем скалярное произведение векторов (**s**, **n**) составит $-\cos(\varphi - \beta)$. Через время t после полудня проекция вектора **n** на **s** равна в этом случае:

$$(\mathbf{s}, \mathbf{n}) = -\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\omega t) , \qquad (3)$$

где время t определено в пределах продолжительности светового дня. Отсюда, в частности, следует, что в конце сентября на широте Крыма ($\theta = 45°$) при $t = 0$ и наклоне участка склона гребня волны на угол $\beta = 10°$ угол падения θ_1 равен 35° для одной стороны гребня и 55° - для другого. Из таблицы 1 видно, что эффект особенно велик при больших углах падения лучей (малых углах скольжения), что характерно для высоких широт. Именно с этим обстоятельством связана отмечавшаяся зависимость поглощенной морем радиации от скорости ветра в полярных областях [7].

В связи с нелинейностью соотношений (1, 3-5) и трехмерностью картины рассеяния осреднение альбедо по профилю волны для произвольного положения Солнца существенно усложняется. Необходимо для каждого значения момента времени t и заданного участка поверхности волны рассчитывать сначала угол падения θ_1, после чего определяется локальное значение альбедо. Интегральный коэффициент отражения определяется затем путем осреднения по времени светового дня и по профилю волны. Таким образом, данная модель имеет 3 свободных параметра (угол склонения Солнца

Таблица 2 – Рассчитанное изменение альбедо (в %) в течение суток при крутизне волны 0.1.

Местное время, часы	При волнении	Без волнения
7	33,5	33,2
8	13,2	12,8
9	6,6	5,9
10	4,0	3,9
11	3,2	3,0
12	3,0	2,9
13	3,2	3,0
14	4,0	3,9
15	6,6	5,9
16	13,2	12,8
17	33,5	33,2

к плоскости экватора, широта места и крутизна волны), а также 2 параметра, по которым проводится осреднение (время после полудня и наклон участка волны). В таблице 2 приведены результаты предварительных расчетов изменения альбедо в течение светового дня без учета множественного отражения для широты Крыма при нулевом склонении Солнца. В этом случае влияние волнения наиболее существенно в 8-9 часов утра и в 15-16 часов, причем оно всегда выражается в виде увеличения альбедо. Судя по значениям α в таблицах 1 и 2, вторичное отражение прямых лучей для волн малой крутизны с 9 до 15 часов практически отсутствует. В то же время рано утром и поздно вечером (в 6 и 18 часов), когда вектора **s** и **k** ортогональны, множественное отражение в принципе исключается, так как отражение происходит в вертикальной плоскости, параллельной линии гребня волны. Более точная оценка эффекта, в том числе при произвольном склонении Солнца и для волн любой ориентации, требует проведения дальнейших исследований. Можно показать, например, что вторичное отражение при произвольной ориентации фронта волны относительно направления на Солнце возможно лишь при той высоте Солнца над горизонтом, при которой оно имеет место в случае нормального падения лучей на фронт волны (таблица 1).

Рассмотренный подход позволяет также моделировать отражение от трехмерных волн произвольной формы и от случайного волнового поля (по методу Монте-Карло). Однако, следует иметь в виду, что помимо чисто геометрических факторов, рассмотренных в статье, существуют разумеется и другие. Это образование при волнении белых барашков, пятен пены, аэрозолей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ch. Cox, W. Mank. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Bulletin of the Scripps inst. of oceanography of the University of California. – v.6, № 9, 1956. – P. 401–488.

2. Н.И. Егоров. Физическая океанография. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 450 с.

3. W.V. Burt. Albedo over wind-roughened water // J.Meteorology. - .№ 11, 1954. – P. 283–290.

4. Г.С. Дворянинов. Влияние поверхностных волн на обмен теплом между океаном и атмосферой // Изв.АН СССР. ФАО. – т.15, № 9, 1979. – С. 953–963.

5. А.Х. Дегтерев. Оценка влияния поверхностных волн на радиационный баланс поверхности моря // Метеорология и гидрология. – № 7, 2007. – С. 69–73.

6. А.Х. Дегтерев. Моделирование объемной реверберации в лучевом приближении // Морской гидрофизический журнал. – № 5, 2007. – С. 50–58.

7. Н.Г. Ерлов. Оптика моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 247 с.