

# Оценка состояния моря по AVHRR/NOAA

П.В. Люшвин<sup>1</sup>, А.В. Кухарский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научный центр оперативного мониторинга Земли

127490 Москва, ул. Декабристов, вл.51, стр. 25

E-mail: [lushvin@mail.ru](mailto:lushvin@mail.ru)

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр космической метеорологии «ПЛАНЕТА»

123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 7

E-mail: [kukharsky@planet.iitp.ru](mailto:kukharsky@planet.iitp.ru)

В работе изложен подход к оценке пенного покрова акваторий – важнейшего признака состояния водной поверхности (шкалы Бофорта), определяющего влаго и газообмен между акваториями и атмосферой. Оценка проводится по данным оптических наблюдений AVHRR/NOAA для акваторий с глубинами свыше 10-20 м, вне зон интенсивного материкового стока. Важнейшим при этом является учет текущего искажающего влияния атмосферы и отраженной солнечной радиации от поверхности воды и пенно-брызговых образований, а также аппроксимация связи между альbedo отраженной радиации и альbedo моря с пенным покровом. Получение информации об этих трех параметрах среды – искажающем влиянии атмосферы, альbedo отраженной радиации и альbedo пенного покрова, обуславливается использованием всех каналов AVHRR. А именно, итерационно, по данным измерений в дальнем ИК диапазоне оценивается тепловое излучение водной поверхности и искажающее влияние водяного пара. Далее из интенсивности радиации в среднем ИК диапазоне исключается тепловая составляющая. И, наконец, по величинам альbedo в среднем, ближнем ИК диапазонах и альbedo в красном диапазоне видимого участка спектра определяются искомые три параметра.

## Введение

Оценка состояния водной поверхности по данным дистанционного зондирования, как правило, проводится по данным измерений на длинах волн сопоставимых с длинами ветровых волн - СВЧ диапазон. Основывается это на зависимости отраженной и собственной СВЧ радиации от шероховатости водной поверхности. Однако при этом в явном виде не используется второй критерий состояния моря (шкалы Бофорта) – пенный покров.

По-видимому, оценить состояние пенного покрова, в основном определяющего влаго и газообмен между акваториями и атмосферой, можно и по данным оптических наблюдений AVHRR/NOAA. Для этого следует провести те же действия, что делает глаз. Выделить в уходящей от Земли радиации составляющие, обусловленные отраженной солнечной радиацией, радиацией, выходящей из водной толщи. Учесть искажающее влияние атмосферы.

## Постановка задачи

Величина солнечной радиации, отраженной водной поверхностью и пенным покровом, определяется по данным измерений в среднем ИК диапазоне (3.7 мкм), в котором уходящая от моря солнечная радиация – радиация, отраженная водной поверхностью и пузырьками пены. Обусловлено это тем, что вода не прозрачна для волн ИК диапазона, длины волн оптического диапазона много меньше характерных неоднородностей на воде, включая волны и пузырьки пены. В ближнем ИК диапазоне (0.8 мкм) интенсивность уходящей от моря солнечной радиации определяется еще радиацией, выходящей из дециметровой - метровой толщи воды. В красном участке видимой области спектра (0.6 мкм) прозрачность воды выше, чем в ближнем ИК диапазоне, поэтому интенсивность радиации определяется отражением и рассеянием от внутриводного гидрозоль в большей толще воды. При обрушении волн, доминирующим в формировании спектра солнечной радиации, уходящей от водных объектов, становится пенный покров, включая пузырьки воздуха в толще воды.

С учетом этих особенностей спектра солнечной радиации уходящей от экваторий с глубинами свыше 10-20 м вне зон материкового стока запишем систему уравнений для трех указанных диапазонов спектра в следующем линеаризованном виде:

$$A_{0.6} = A_{\text{пост.}0.6} + A_{\text{атм.}0.6} + (A_{\text{блик.}0.6} + A_{\text{вода.}0.6}) * \exp^2(-\tau_{0.6}), \quad (1)$$

$$A_{0.8} = A_{\text{пост.}0.8} + A_{\text{атм.}0.8} + (A_{\text{блик.}0.8} + A_{\text{вода.}0.8}) * \exp^2(-\tau_{0.8}), \quad (2)$$

$$A_{3.7} = A_{\text{пост.}3.7} + A_{\text{атм.}3.7} + A_{\text{блик.}3.7} * \exp^2(-\tau_{3.7}), \quad (3)$$

где  $A_\lambda$  – альbedo Земли на длинах волн ( $\lambda$ ) 0,6, 0,8 и 3,7 мкм;  $A_{\text{пост.}\lambda}$  – квазипостоянные величины альbedo атмосферных газов;  $A_{\text{атм.}\lambda}$  – альbedo атмосферного аэрозоля;  $A_{\text{блик.}\lambda}$  – альbedo водной поверхности, обусловленное отраженной водной поверхностью солнечной радиацией;  $A_{\text{вода.}\lambda}$  – альbedo водной толщи, включая альbedo уходящее от гидрозоля, желтого вещества (мертвый планктон) и пенно-брызговых образований; квадрат экспонент оптических толщин ( $\tau_\lambda$ ) означает учет двойного ослабления прямого солнечного излучения при его прохождении в атмосфере до падения на водную поверхность, и после ухода от нее. Значения альbedo на длине волны 3,7 мкм получаются после коррекции уходящей от Земли радиации на волне 3,7 мкм на тепловую и паровую (водяной пар) составляющие, определенные по данным наблюдений на длинах волн 11 и 12 мкм. Числовые значения почти всех перечисленных характеристик определяются еще высотой Солнца и спутника над точкой зондирования и разностью азимутов.

Для сближения числа информационных каналов (3) и числа неизвестных параметров среды используются следующие приближения:

величины  $A_{\text{пост.}\lambda}$ ,  $A_{\text{атм.}\lambda}$  и  $\tau_\lambda$  оцениваются по процедуре LOWTRAN для всех условий прозрачности атмосферы, причем между величинами  $A_{\text{пост.}\lambda}$ ,  $A_{\text{атм.}\lambda}$  и  $\tau_\lambda$  существует почти однозначное взаимное соответствие;

аэрозоль над водой принят в целом морским, а именно, таким, для которого оптическая толщина пропорциональна  $\lambda^{-1.4}$ .

Отметим также, что при оценке спектрального хода трансформации солнечной радиации в атмосфере вне условий солнечного блика следует еще учитывать спектральную анизотропию рассеяния, обусловленную изменением отношения длины волны к характерному размеру аэрозоля. Поэтому регистрируемая на ИСЗ уходящая от Земли рассеянная атмосферой солнечная радиация в видимом диапазоне меньше ( $\eta = 0.3 \div 1$ ) чем в среднем ИК диапазоне. Оценка анизотропии спектральной ( $\eta$ ) и прозрачности атмосферы также проводится по процедуре LOWTRAN. Величина  $\eta$  стремится к 1 для сильно замутненных атмосфер или когда размер частиц аэрозоля достигает  $1 \div 4$  мкм, а также для прозрачных атмосфер, когда невелико содержание даже мелкодисперсного аэрозоля, например, в условиях безоблачного высокогорья. В условиях солнечного блика, когда на ИСЗ регистрируется в основном прямая солнечная радиация, величина  $\eta$  стремится к 1.

Величины диэлектрических констант воды для используемых длин волн практически неизменны, поэтому  $A_{\text{блик.}0.6-0.8} \approx A_{\text{блик.}3.7} * \eta$ . Для глубокой воды вне зон материкового стока величина  $A_{\text{вода.}0.6}$  составляет, как правило, менее 1%, что, как минимум, вдвое меньше характерных вариаций  $A_{\text{блик.}0.6}$  и  $A_{\text{атм.}0.6}$ . Величина отношения водной толщи  $A_{\text{вода.}0.8}/A_{\text{вода.}0.6}$  в отсутствии пенного покрова  $\approx 0.1$ , а при наличии пены  $\leq 1$ .

Чтобы замкнуть систему уравнений, вводим зависимость между величиной отраженной солнечной радиации ( $A_{\text{блик.}3.7}$ ) и спектральным ходом  $A_{\text{вода.}\lambda}$  в виде

$$A_{\text{вода.}0.8}/A_{\text{вода.}0.6} = 0.1 + 1.8 * (1.0 - (\eta * A_{\text{блик.}3.7})^{(\eta * A_{\text{блик.}3.7})}),$$

где  $A_{\text{блик.}3.7}$  в долях %; если эта величина меньше  $A_{\text{вода.}0.8}/A_{\text{вода.}0.6}$ , то принимается величина последнего отношения, но так чтобы  $1 > A_{\text{вода.}0.8}/A_{\text{вода.}0.6} > 0.1$ .

С учетом описанных приближений в системе уравнений (1)-(3) остаются неизвестными параметрами лишь три  $A_{\text{блик.}3.7}$ ,  $\tau_{3.7}$ , и  $A_{\text{вода.}0.6}$ . Попиксельные пошаговые (шаги по изменению прозрачности атмосферы) расчеты ведутся до достижения минимума величины разницы альbedo отраженной солнечной радиации на длинах волн 0,8 и 3,7 мкм.

Отметим, что для каждого сеанса данных AVHRR проводится дополнительно к стандартной аппаратурной калибровке физическая калибровка данных спутниковых измерений. Ее цель заключается в том, чтобы спектральные значения альbedo Земли были бы не меньше минимально возможных значений, а спектральный ход альbedo и радиационных температур безоблачных приглубых акваториях вне зоны блика, не выходил бы за пределы характерных региональных значений.

### Выходные данные

В результате итерационных расчетов кроме перечисленных трех параметров, в результате задания зависимости спектрального хода  $A_{вода \lambda}$  от  $A_{блик 3.7}$  получается еще оценка величины альbedo внутриводного гидрозоля (величина отношения  $A_{вода 0.8} / A_{вода 0.6}$  для которого равна 0.1, это характерно для приглубых акваторий вне ветрового волнения) и альbedo моря за счет альbedo дна, взмученного гидрозоля и пенного покрова (для которых  $A_{вода 0.8} \approx A_{вода 0.6}$ ).

Вне зоны солнечного блика уверенно дешифрируются квазиштилевые акватории со скоростями приводного ветра менее 7 узлов (0-2 балла шкалы Бофорта), области ветрового волнения со скоростями приводного ветра до 15 узлов (до 4 баллов) и свыше 12 узлов (свежий ветер). Возможность выделения нескольких градаций состояния поверхности приглубых акваторий обусловлено, прежде всего, оценкой величины альbedo пенного покрова. На мелководьях, где величины альbedo блика ( $\eta^* A_{блик 3.7}$ ) не превышают 5% (квазиштилевые условия) и  $A_{вода 0.8} / A_{вода 0.6} > 0.1$  гидрозоля либо взмучен, либо видно дно.

На рис. 1-3 даны иллюстрации выходной продукции, ее сопоставление с аналогичными данными, полученными иными средствами.

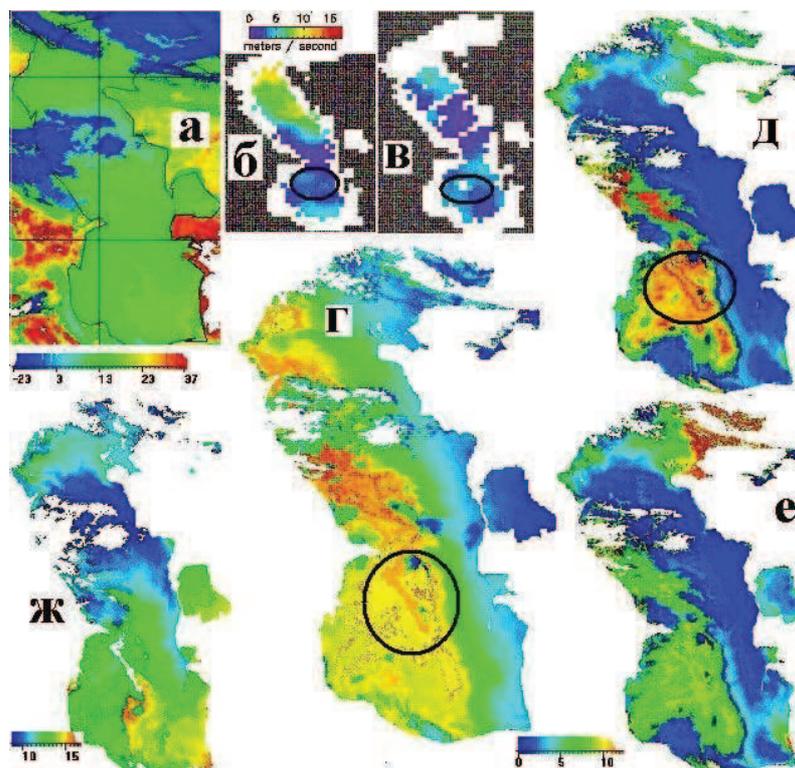


Рис. 1. ИК снимок Каспийского региона в 12 GMT 11.05.2000 г. AVHRR/NOAA (рис. а, внизу шкала в °C). Скорость приводного ветра в утренние часы (рис. б, в [<http://www.ssmi.com/ssmi/>]). Альbedo отраженной солнечной радиации, альbedo пенного покрова и гидрозоля (шкала в %, рис. з, д, е); ТПВ по AVHRR (шкала в °C, рис. ж)

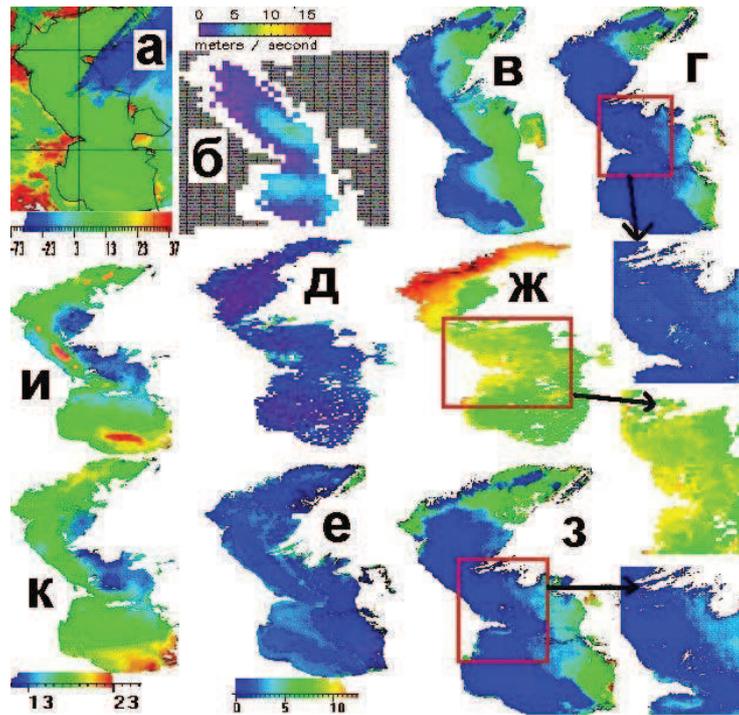


Рис. 2. ИК снимок Каспийского региона в 11 GMT 11.05.1999 г. AVHRR/NOAA (рис. а, внизу шкала в °С). Скорость приводного ветра в утренние часы, альbedo хлорофилла и альbedo аэрозоли (рис. б, д, ж [<http://www.ssmi.com/ssmi/>, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/>]). Альbedo отраженной солнечной радиации, альbedo пенного покрова и гидрозоля, а также альbedo атмосферной дымки (шкала в %, рис. в, з, е); ТПВ по AVHRR (шкала в °С, рис. и, к)

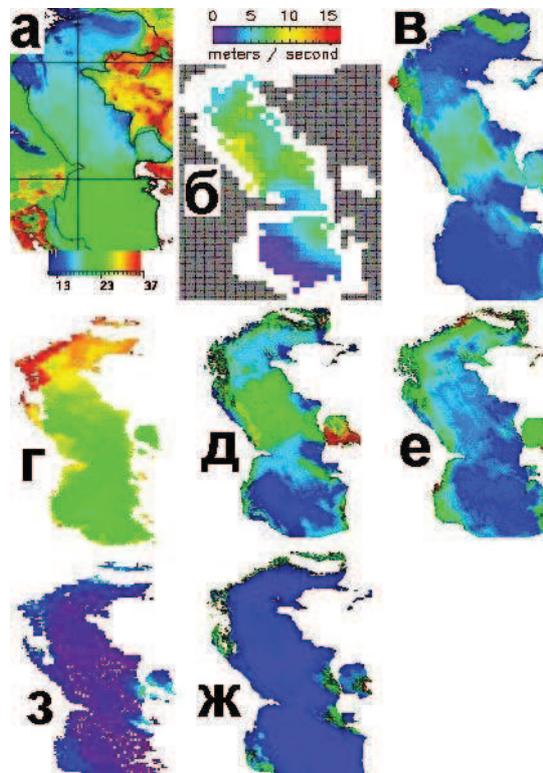


Рис. 3. ИК снимок Каспийского региона в 11 GMT 30.09.1999 г. AVHRR/NOAA (рис. а, внизу шкала в °С). Скорость приводного ветра в утренние часы, альbedo хлорофилла и альbedo аэрозоли (рис. б, з [<http://www.ssmi.com/ssmi/>, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/>]). Альbedo отраженной солнечной радиации, альbedo пенного покрова и гидрозоля, а также альbedo атмосферной дымки (шкала в %, рис. в, д, е, ж)

Из анализа рис.1 следует, что в полдень 11.05.2000 г. над Каспийским морем наблюдались две структуры облаков верхних ярусов. Одна над северо-восточной частью Каспийского моря, другая тянулась от Дагестанского берега к п-ову Мангышлак. Скорости ветра у поверхности воды на севере моря доходили до 12 м/с (5-6 баллов по шкале Бофорта; свежий-сильный ветер). Наблюдались также локальные пятна усиления ветра к юго-востоку от Апшеронского п-ова (оконтурено эллипсами). По данным AVHRR от Апшеронского п-ова на юго-запад тянется полоса повышенной шероховатости водной поверхности (отраженного альbedo, рис. г) и альbedo пенного покрова (рис. д). Повышенные значения альbedo гидрозоля (рис. е) наблюдаются в своих обычных местах у устьев рек (Волги, Урала, и у маловодных, но чрезвычайно замутненных рек - Атрек и Горган), а также в Среднем и Южном Каспии под пенным покровом. В зонах влияния материкового стока видна пятнистость альbedo гидрозоля (от 1 до 12%), на глубокой воде вне ветрового перемешивания альbedo гидрозоля не превышает 1%, в зонах повышенных значений альbedo пены (свыше 5%) пятнистости в поле альbedo гидрозоля почти не наблюдается (контура смазаны, альbedo гидрозоля составляет 4-8%). Косвенно достоверность дешифрирования ветровой ситуации подтверждает карта температуры поверхности воды (ТПВ) на рис. ж – язык теплых вод севернее Апшеронского порога и резкий фронт температуры воды в центре Южного Каспия совпадают с фронтами пенного покрова. Обусловлено это совпадение тем, что в середине мая толщина верхнего прогретого слоя воды невелика и ветровое волнение взмучивает зимние холодные воды.

11 мая 1999 г. Каспийское море было безоблачно за исключением лишь полосы облаков от п-ва Мангышлак (рис.2. а, д, ж). Вдоль восточного берега моря и на юге - квазиштилевые условия, на западе моря ветровые условия от умеренного до свежего ветра (5-10 м/с), что проявляется и в поле альbedo отраженной солнечной радиации, в полях альbedo пенного покрова и гидрозоля (рис.2. в, г, з). В поле альbedo гидрозоля имеются максимумы, обусловленные материковым стоком (у дельт рек Волги, Терека, Куры, Атрека и Горгана), а также гидрозолю в струях вдольберегового течения, огибающего Апшеронский п-ов. Разница между информацией о параметрах среды, размещаемой в Интернете и получаемой здесь, состоит в том, что у нас на глубокой воде в квазиштилевых условиях в зоне каймы полупрозрачных облаков рост отраженной радиации алгоритмически относится к альbedo пенного покрова (взмученного гидрозоля). К тому же здесь сведения об альbedo гидрозоли и состоянии поверхности получаются одновременно, поэтому в большинстве ситуаций изначально понятен генезис появления повышенного альbedo гидрозоля. В квазиштилевых акваториях оценивается возможный перегрев поверхности воды, а под аэрозольными облаками, наоборот – понижение ТПВ из-за ослабления инсоляции. Таким образом получают карты ТПВ по методике NOAA (температура слоя толщиной в несколько микронов) и информация по ТПВ, приведенная к условиям ветрового перемешивания и солнечной инсоляции, т.е. к температуре воды слоя ветрового перемешивания (рис.2. и, к).

30.09.1999 г. Средний и Южный Каспий безоблачны. С заливов Кара-Богаз и Красноводского дует умеренный ветер (рис.3. а, б), он несет полупрозрачные аэрозольные облака (рис.3. з). Этот ветер формирует волновые структуры. Отраженная радиация и альbedo пенного покрова от которых представлена на рис.3 (в, д). Ветер слабый, поэтому в поле альbedo гидрозоля (рис.3. е) пузырьки пены в толще воды дают вклад в альbedo гидрозоля в 3-5 раз меньше, чем материковый сток у устьев рек и в усилившемся течении вдоль берега.