

О.В. Копелевич

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ОКЕАНА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

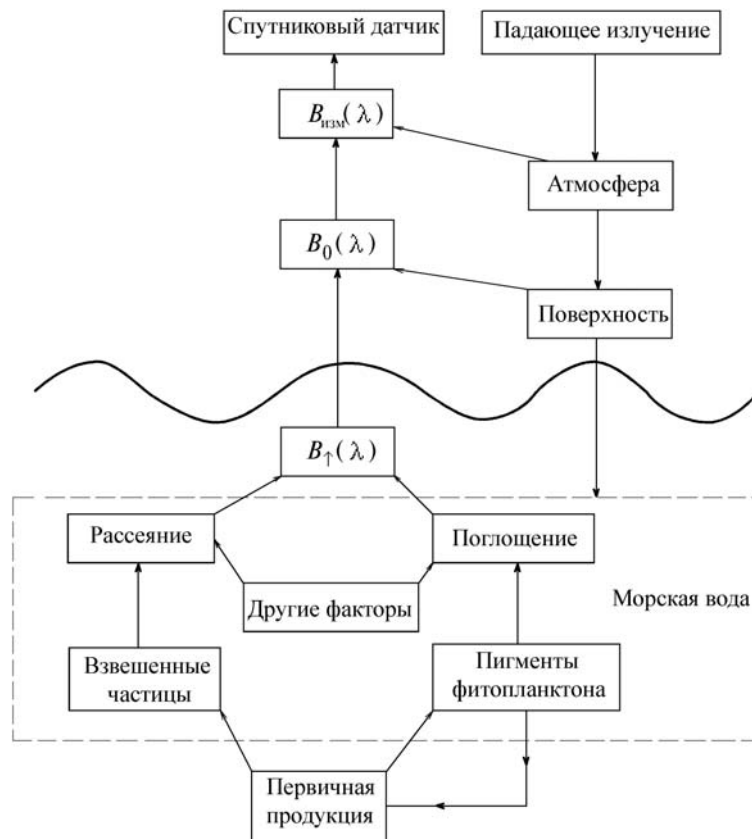
Рассмотрена совокупность явлений, определяющих спектральную яркость восходящего излучения, регистрируемую спутниковым датчиком, и сформулированы задачи, решение которых необходимо для глобальной оценки биопродуктивности океана.

Глобальная оценка первичной продукции океана возможна лишь при использовании спутниковых наблюдений, поскольку только они позволяют проводить синоптические съемки всего Мирового океана. Однако такая оценка невозможна лишь на основе спутниковых наблюдений, без привлечения данных судовых и других измерений, без проведения специальных подспутниковых экспериментов для контроля получаемых спутниковых данных и проверки разработанных расчетных алгоритмов. Целесообразно разделить две задачи: 1) выделение в океане районов различной биопродуктивности, или, в более общей формулировке, изучение относительной пространственно-временной изменчивости биопродуктивности вод Мирового океана; 2) количественная оценка биопродуктивности различных районов в разные сезоны и на ее основе потоков углерода из атмосферы в океан, что имеет важнейшее значение для прогноза содержания CO_2 в атмосфере и связанных с этим глобальных климатических изменений. Наглядное подтверждение возможности успешного решения первой задачи посредством спутниковых наблюдений – данные американского сканера цвета прибрежной зоны (CZCS), который функционировал на спутнике Nimbus-7 с 1978 по 1986 г. и дал огромное количество информации о цвете океана [1]. Карты, приведенные в [1], отображают в искусственных цветах распределение концентрации пигментов фитопланктона в разных районах Мирового океана (для некоторых из них по сезонам и даже по месяцам). Используются двадцать цветовых градаций для диапазона концентраций от меньше $0,05$ до 30 мг/м^3 . Такое большое число градаций отражает лишь чувствительность системы измерений и обработки данных, но отнюдь не реальную точность определения концентрации пигментов. Помимо случайной ошибки оценка концентрации пигментов по данным CZCS имеет систематическую погрешность: недооценивается концентрация пигментов, если она меньше 1 мг/м^3 (в среднем примерно на 20%), и переоценивается (в среднем на 150%), если она больше 1 мг/м^3 [2].

Осенью 1993 г. НАСА планирует запуск нового датчика цвета океана SeaWiFS-Sea-Viewing Wide Field Sensor, представляющего собой значительно усовершенствованный датчик второго поколения. Новый датчик будет давать полное покрытие поверхности Мирового океана каждые 2 суток с пространственным разрешением $4,4 \text{ км}$, а в необходимых случаях $1,1 \text{ км}$: Точность измерения абсолютных значений спектральной яркости восходящего излучения будет лучше 5%, а относительных измерений – лучше 1% [3]. Ожидаемая точность определения хлорофилла *a* составляет 35% для типа вод 1, когда оптические свойства морской воды определяются главным образом фитопланктоном; ошибки значительно возрастают для типа вод 2, где существенную роль играет неорганическая взвесь и желтое вещество. Точность оценки первичной продукции по спутниковым данным – предмет специального исследования [2].

На рисунке схематически представлена совокупность явлений, формирующих сигнал, регистрируемый на спутнике. Как видно из рисунка, цепочка действующих факторов оказывается достаточно длинной: от первичной продукции зависит содержание пигментов фитопланктона и взвешенных частиц, обуславливающих рассеяние и поглощение света морской водой; последние определяют спектральную яркость излучения, выходящего из водной толщи. Далее добавляется излучение, отраженное от поверхности и рассеянное в атмосфере – «атмосферная дымка». Вклад указанных факторов в измеряемую на спутнике яркость неодинаков и

различен в разных спектральных интервалах. Однако вклад атмосферной дымки доминирует по всему спектру: обычно он везде более 90%. Различие в яркости между водами с разной концентрацией хлорофилла, которая вблизи поверхности может изменяться в несколько раз, на спутнике проявляется лишь в коротковолновой части спектра и укладывается в пределах 20%.



Совокупность факторов, формирующих сигнал, регистрируемый спутниковым датчиком цвета.
 $B_{\downarrow}(\lambda)$, $B_0(\lambda)$, $B_{изм}(\lambda)$ – спектральные яркости восходящего излучения под поверхностью воды, над поверхностью, на верхней границе атмосферы

В рассматриваемой проблеме можно выделить четыре задачи:

- 1) получение спутниковой информации с высокой точностью и в широком спектральном диапазоне;
- 2) определение по спутниковым данным спектральных значений яркости выходящего из водной толщи излучения – задача «атмосферной коррекции» (здесь также учитывается вклад отраженного от поверхности излучения [4]);
- 3) расчет через полученные значения яркости биооптических характеристик приповерхностного слоя;
- 4) расчет первичной продукции и новой продукции, построение годовых, сезонных и месячных карт, оценка глобальной продукции и потоков углерода.

Рассмотрим по порядку каждую из этих задач.

1) У CZCS использовались четыре спектральных интервала с центрами 443, 520, 550 и 670 нм. У SeaWiFS планируется восемь спектральных интервалов: шесть шириной 20 нм в видимой области (центры полос 412, 443, 490, 510, 555 и 670 нм); еще два более широких интервала в ИК-Диапазоне(745–785 и 845–885 нм). Точность измерений, как уже отмечалось выше, очень высока: лучше 1 % для относительных измерений, лучше 5% для измерения абсолютных значений. Учтен один из главных недостатков CZCS – отсутствие постоянного контроля чувствительности датчиков: для SeaWiFS предусматривается калибровка по Солнцу и по Луне ежемесячно. Кроме того, предполагается периодическая проверка и согласование калибровок по данным подспутниковых измерений.

2) Атмосферная коррекция данных CZCS [4] основывалась на нескольких достаточно серьезных ограничивающих предположениях: во-первых, атмосфера считалась безоблачной; во-вторых, предполагалось, что поверхность океана плоская, солнечные блики не попадают в приемник (датчик на спутнике мог отклоняться от зеркально отраженного солнечного излучения) и на поверхности отсутствует пена. Еще одно существенное предположение – наличие участков «чистой воды» с концентрацией пигментов меньше $0,25 \text{ мг/м}^3$. Для них нормализованная яркость выходящего из водной толщи излучения для длин волн 520, 550 и 670 нм принималась постоянной (для 670 нм считалась равной 0). По данным измерений для этих длин волн оценивался показатель Ангстрема для спектральной зависимости аэрозольной толщины атмосферы; найденное значение принималось для всей площади анализируемого изображения и использовалось для расчета яркости атмосферной дымки для длины волны 443 нм. Были и другие предположения; в частности, что аэрозольная индикатриса не зависит от длины волны.

Два предположения существенно ограничивают возможность использования данных измерений. Это предположения о безоблачной атмосфере и о том, что океан черный в красной области, что неверно при наличии ветрового волнения и пены. Пена дает вклад, соизмеримый со вкладом излучения, выходящего из водной толщи, уже тогда, когда доля покрытия ею поверхности составляет лишь 0,5% [5]. Разработка методов учета вклада отраженного пеной излучения – одна из важнейших задач будущих исследований, и в первую очередь для этого надо как следует изучить характеристики отражения пенных образований, для которых сейчас нет точных данных. Другая важнейшая задача – учет влияния разорванной облачности (сплошная облачность – непреодолимое препятствие).

Очень важна точность экстраполяции значений атмосферной дымки, определенных в красной области, в коротковолновую часть. Для улучшения этой точности хотелось бы использовать статистические оценки спектральных зависимостей аэрозольной толщины для разных условий наблюдения, но для атмосферы над океаном таких оценок сейчас мало. Для их получения надо резко интенсифицировать сбор данных об оптических характеристиках океанской атмосферы.

3) Для определения биооптических характеристик приповерхностного слоя главная задача – разработка общего алгоритма и последующая дифференциация его параметров для разных океанологических условий. Принятое сейчас разграничение: случай 1 – случай 2 представляется достаточно искусственным; должен быть общий алгоритм с параметрами, адаптированными применительно к разным океанологическим условиям.

4) Четвертая часть проблемы – определение первичной продукции по спутниковым данным – в настоящее время менее всего проработана. Спутниковые наблюдения дают информацию лишь о достаточно тонком приповерхностном слое, толщина которого не превышает 20–30 м. Определить общее содержание пигментов в фотическом слое по этим данным можно: по оценке Мореля для 3500 станций даже в стратифицированных водах коэффициент корреляции между указанными величинами равен 0,934 в диапазоне изменения концентрации пигментов в приповерхностном слое более чем на 3 порядка: от $0,01 \text{ мг/м}^3$ до 20 мг/м^3 [6].

Существуют разные модели для расчета первичной продукции: простые эмпирические и более сложные полуаналитические. Известны модели *Ryther*, *Yentsch* [7]; *Bannister* [8]; *Platt*, *Sathyendranath* [9]; *Balch* с соавторами [10, 11]; в Институте океанологии алгоритм для расчета первичной продукции по спутниковым данным разработан Пелевиным и Кобленц-Мишке. Некоторые из этих моделей (не все) дают хорошие результаты, если известны значения входящих в них параметров. Но при использовании спутниковых данных эти параметры неизвестны и результаты оказываются неудовлетворительными [2]. Сопоставление результатов расчетов с использованием разных моделей с данными прямых определений первичной продукции, проведенное в [2], показало, что поверхностную продукцию еще удастся определить с приемлемой точностью, но для интегральной все рассмотренные модели дают плохой результат. Интересно, что худший из них дает самая сложная модель [9]. Причина, по-видимому, в многоступенчатости расчетов при недостаточно точном знании входящих параметров. В такой ситуации вполне возможно, что более эффективными окажутся простые полуэмпирические алгоритмы с малым числом параметров.

По-видимому, наиболее перспективен алгоритм P_m^b / K [8] (см. также [12, 13]), где оценка P_m^b – максимального ассимиляционного числа возможна при использовании спутниковых данных о поверхностной температуре. Можно надеяться, что, по сравнению с [2], точность такой оценки

P_m^b можно значительно улучшить на основе серьезного океанологического анализа [14]. Возможности для такого анализа сейчас есть: это, во-первых, данные CZCS и радиометра высокого разрешения AVHRR, во-вторых, данные судовых измерений.

Важнейшее условие успешного решения проблемы использования спутниковых данных – проведение комплексных подспутниковых экспериментов и дополнительных измерений на судах, буях, авианосителях. Разработанная в НАСА программа обеспечения работы SeaWiFS включает большой перечень судовых измерений [15]: спектральной облученности на поверхности и на разных горизонтах в водной толще, спектральной яркости восходящего излучения под водой, других оптических параметров, спектральной прозрачности атмосферы, скорости ветра и состояния морской поверхности, вертикальных профилей температуры и солёности; определения концентраций пигментов фитопланктона, взвеси, окрашенного органического вещества, общей первичной продукции, новой продукции, потерь на выедание и др. Для проведения таких комплексных исследований целесообразно использовать большие суда, которыми располагает Институт океанологии и некоторые другие институты, способные брать на борт 60–75 специалистов, что позволит осуществлять указанные измерения одновременно. В качестве примера таких комплексных исследований можно назвать экспедицию 23-го рейса НИС «Витязь», одна из главных задач которого как раз заключалась в верификации результатов спутниковых наблюдений по данным судовых измерений [16].

Целенаправленные исследования на судах в совокупности с измерениями на заякоренных и дрейфующих буях и с авианосителей позволят также, по крайней мере частично, заполнить пробелы, неизбежно имеющиеся место в спутниковой информации в первую очередь из-за облачности. Очень важен выбор районов для проведения таких измерений; необходим серьёзный предварительный анализ, в частности по данным CZCS. Ценность этих данных в том, что они показывают пространственно-временное положение наибольших градиентов изменения биологических характеристик, а недоучет пикового характера процессов продуцирования, как указано в [17], одна из возможных причин занижения оценки величины общей продукции Мирового океана. Именно таким районам следует уделить наибольшее внимание.

В ближайшее десятилетие, по-видимому, не будет недостатка в спутниковых данных о цвете океана. В 1995 г. планируется запуск американо-японского спутника с датчиком цвета и температуры OCTS, в 1998 г. – спектрорадиометра 3-го поколения MODIS-N [18]. Задача заключается в том, чтобы извлечь из этих данных возможно более полную и точную информацию об океане.

1. Ocean color from space. CZCS images prepared by G.C. Feldman with text by J. A. Yoder, M.R. Lewis, P.A. Banchard. NASA, 1989.
2. Balch W., Evans R., Brown J., Feldman G. et al. //J. Geophys. Res. 1992. V. 97 № C2 P. 2279–2293.
3. Hooker S.B., Esaias W.E. An Overview of the SeaWiFS Project, NASA GSFC. 1992. P. 7.
4. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W. et al. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 1. P. 20–36.
5. Копелевич О.В., Межеричер Э.М. //Океанология. 1980. Т. 20. № 1. С. 50–56.
6. Morel A., Berthon J.-F. //Limnol. Oceanogr. 1989. V. 34. № 8. P. 1545–1562.
7. Ryther J.H., Yentsch //Limnol. Oceanogr. 1957. V. 2. P. 281–286.
8. Banmister T.T. //Limnol. Oceanogr. 1974. V. 19. P. 1–12.
9. Platt T., Sathyendranath S. //Science. 1988. V. 241. P. 1613–1620.
10. Balch W.M., Abbott M.R., Eppley R.W. //Deep-Sea Res. 1989. V. 36. P. 281–295
11. Balch W.M., Eppley R.W., Abbott M.R. //Deep-Sea Res. 1989. V. 36. P. 1201–1217.
12. Smith R., Baker K. //Limnol. Oceanogr. 1978. V. 23. P. 247–259.
13. Eppley R. W., Stewart E., Abbott M.R., Heyman U. //J. Plank. Res. V. 7. P. 57–70.
14. Ведерников В.И. //Труды Института океанологии. 1976. Т. 105. С. 106–129.
15. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation. /Ed. by J.L. Mueller, R.W. Austin, Ch. R. McClain. NASA, 1991.
16. Виноградов М.Е. //Океанология. 1992. Т. 32. С. 609–612.
17. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана. М.: Наука, 1987. 240 с.
18. Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H. //IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. 1989. V. 27. № 2. P. 145–153.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Москва

Поступила в редакцию
29 сентября 1992 г.

O. V. K o p e l e v i c h . Problem and Outlook of an Assessment of Global Ocean Primary Production Using Satellite Data.

Totality of processes causing upwelled spectral radiance, which is measured by satellite sensor, is considered. Approaches for an assessment of global ocean primary production are discussed.