

О.А. Букин, П.А. Салюк, А.Ю. Майор, А.Н. Павлов

Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Поступила в редакцию 10.06.2005 г.

Рассматриваются функциональные соотношения между биооптическими компонентами, характеризующими концентрацию хлорофилла «А» и флуоресцирующую часть растворенного органического вещества в морской воде в различных районах Мирового океана. Выделены фитопланктонные сообщества (кластеры), где эта связь линейна. В кластерах, где наблюдалась высокая корреляция между вышеуказанными биооптическими компонентами, рассчитывались параметры линейной регрессии, характеризующие темпы воспроизводства и фоновые значения флуоресцирующей части растворенного органического вещества. Показано, что эти параметры могут быть использованы для исследования процессов воспроизводства органики клетками фитопланктона и позволяют классифицировать фитопланктонные сообщества в смысле воспроизводства органического вещества в океане.

Введение

Проблема мониторинга фитопланктонных сообществ приобретает в настоящее время особое значение в связи с явно выраженными климатическими изменениями на планете и все возрастающим антропогенным воздействием на морские экосистемы. Однако мониторинг фитопланктонных сообществ подразумевает измерение параметров, характеризующих отдельные клетки и работу фотосинтетической системы на молекулярном уровне, но применительно к большим пространственно-временным масштабам [1, 2].

Для возможно более полного исследования состояния фитопланктонных сообществ и воздействия процессов различной природы (включая антропогенные) на функционирование клеток фитопланктона необходимо определение целого набора параметров, таких как концентрации хлорофилла «А» и дополнительных пигментов, входящих в клетки, скорости электронного транспорта в реакции фотосинтеза органического вещества, воспроизводимого в результате реакции фотосинтеза, концентрации наиболее важных элементов, входящих в состав клеток, и т.д. Все это необходимо измерять оперативно и на больших морских акваториях, методы лазерной спектроскопии позволяют проводить подобные измерения [3–5].

Вопросы, связанные с применением метода лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) в исследовании воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона, представляют большой интерес не только в связи с определением состояния морских экосистем, но и в связи с оценками той роли, которую играют клетки фитопланк-

тона в глобальном цикле воспроизводства органического вещества на планете. Содержание растворенного органического углерода (РОУ) в океане соизмеримо по величине с содержанием CO_2 в атмосфере и составляет примерно 20% от общего органического вещества на Земле (исключая керогены и уголь) [6].

Основным источником поступления РОУ в океан является фитопланктон. По оценкам, приведенным в работе [7], он продуцирует 20 млрд т РОУ в год, в то время как поступление органического вещества с суши и первичная продукция фитобентоса дают лишь 5% вновь поступающего органического вещества. При этом биомасса самого фитопланктона, выраженная в единицах органического углерода, относительно мала – всего лишь 80 млн т. Таким образом, его ежегодная продукция превышает его биомассу в 250 раз. Это говорит о большой роли фотосинтеза в процессе воспроизводства органики на планете и обуславливает интерес к исследованию циклов воспроизводства органического вещества именно клетками фитопланктона [8].

Подавляющее количество органического углерода в океане находится в растворенной форме (по разным оценкам 90–98%) [7, 9] и входит в состав растворенного органического вещества (РОВ). РОВ представляет собой очень сложные соединения. Только 10–20% этих соединений можно описать в виде отдельных компонентов, остальные 80–90% – это сложные органические смеси, которые нельзя разложить по компонентам и представить в аналитической записи [10, 11]. Вследствие сложной структуры измерение РОВ является очень не простой задачей. Химические методы крайне трудоемки и не всегда позволяют измерять концентрацию

каждого отдельного компонента, входящего в состав РОВ. Несмотря на то что оптические методы регистрируют лишь хромофоры и флуорофоры (т.е. соединения, поглощающие свет или флуоресцирующие под его действием), тем не менее для проведения мониторинга процессов воспроизводства органического вещества в морской воде они являются наиболее подходящими, так как позволяют проводить оперативные измерения на больших акваториях.

В статье [4] была показана возможность использования ЛИФ спектроскопии морской воды для исследования циклов воспроизводства флуоресцирующей части РОВ клетками фитопланктона. На больших пространственных масштабах, в период цветения водорослей, была обнаружена линейная связь между биооптическими компонентами спектров ЛИФ, которые определяются концентрацией хлорофилла «А» и относительной интенсивностью флуоресценции РОВ.

В данной статье рассматриваются масштабы, на которых наблюдается однородная линейная связь между биооптическими параметрами ЛИФ спектра для разных районов Мирового океана, в которых нами были проведены измерения спектров ЛИФ, а также рассмотрена связь между биооптическими компонентами в различные периоды развития водорослей (не только в период цвета). Анализируются параметры линейных связей биооптических компонентов спектров ЛИФ, характеризующих процессы воспроизводства органики клетками фитопланктона и позволяющих классифицировать фитопланктонные сообщества в смысле воспроизводства органического вещества в океане.

Методы измерений

Методика измерения и используемая аппаратура были описаны подробно в [12, 13], здесь приведем лишь краткое описание. Возбуждение спектров флуоресценции морской воды осуществлялось второй гармоникой Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 нм. Измерение интенсивности флуоресценции проводилось в диапазоне 560–740 нм. Спектры ЛИФ корректировались на спектральную функцию пропускания фильтра, служащего для подавления упругого рассеяния, и спектральную чувствительность фотокатода, регистрирующего ФЭУ. Флуориметр был установлен на борту судна и работал по проточной схеме, пространственное разрешение измерений одного спектра не превышало 500 м и зависело от скорости движения судна.

Для исследования процесса воспроизводства органического вещества фитопланктоном необходимо определить количество РОВ, воспроизводимое клетками, или удельное воспроизводство (количество РОВ, воспроизводимое таким количеством фитопланктона, которое содержит 1 мкг/л хлорофилла «А»). При этом важно иметь возможность измерять только «молодой» РОВ, т.е. выделять ту часть РОВ, которая воспроизводится прижизненными выделениями фитопланктона [15]. Эту часть

можно описать одним из биооптических параметров (параметр Q) ЛИФ-спектра [4].

Концентрация хлорофилла «А» (обозначена — C) и параметр Q , который представляет собой нормированную площадь под огибающей спектра флуоресценции РОВ (приведенную к спектральному интервалу в 1 нм), определялись из спектров ЛИФ следующим образом:

$$C = kI_{\text{ХлА}}/I_{\text{к.р}}; \quad (1)$$

$$Q^* = qQ = q \int_{560}^{740} \frac{I_{\text{РОВ}}(\lambda)}{I_{\text{к.р}}} d\lambda, \quad I_{\text{РОВ}}(\lambda) = a \exp(-b\lambda), \quad (2)$$

где $I_{\text{к.р}}$ — максимум интенсивности комбинационного рассеяния морской воды; $I_{\text{ХлА}}$ — максимум интенсивности линии флуоресценции хлорофилла «А»; $I_{\text{РОВ}}(\lambda)$ — интенсивность флуоресценции РОВ (ИФРОВ); k — калибровочный коэффициент, определяемый из сравнения со стандартными измерениями концентрации хлорофилла «А» [12]; q — коэффициент, который переводит размерность нормированной площади под линией флуоресценции РОВ в рассматриваемом спектральном диапазоне к размерности концентрации РОВ в мкг/л — Q^* ; a и b — коэффициенты регрессионной экспоненты, описывающей огибающую спектра флуоресценции РОВ. Величины интенсивностей определялись методом наименьших квадратов (МНК) при разложении спектра на отдельные биооптические компоненты, где пики флуоресценции пигментов представлялись в виде гауссианов, а спектр флуоресценции РОВ в рассматриваемом диапазоне описывался экспонентой [4].

Методом Монте-Карло были определены случайные и систематические ошибки измерения C и Q . С учетом ошибки калибровок, которую вносит МНК, и шума на спектрах ЛИФ суммарная относительная ошибка (δC) для концентрации хлорофилла «А», равной 0,1 мкг/л (при шуме 30% от сигнала), составила 105%, что вполне соизмеримо с чувствительностью других методов [14]. При увеличении концентрации относительная ошибка резко падала. Так, при $C = 0,25$ мкг/л $\delta C = 58\%$, а в диапазоне концентраций с 1 до 8 мкг/л $\delta C = 17\text{--}19\%$, далее относительная ошибка плавно возрастала и при концентрации 30 мкг/л составила 35%. Оценки, приведенные выше, были получены при моделировании 100 ЛИФ спектров с заданными параметрами.

Сложным является вопрос о калибровке ИФРОВ (определение коэффициента q). Это обусловлено тем, что общепринятые методики часто дают не концентрацию всего РОВ, а лишь состав его отдельных компонент. В работе [15] подробно рассмотрен вопрос о связи ИФРОВ и концентрации органического углерода. В ряде случаев невозможно установить связь между ИФРОВ и РОУ, одним из возможных объяснений этого является тот факт, что большинство атомов углерода может находиться в группах, которые слабо флуоресцируют

или не флуоресцируют вообще, в зависимости от того, какую стадию деградации РОВ представляет данный комплекс. Однако в работе [4] было показано, что в высокопродуктивных районах мирового океана, где наблюдаются относительно высокие концентрации хлорофилла «А», а также в периоды цветения водорослей, когда доля «молодого» РОВ (т.е. РОВ, которое воспроизведено функционирующими на момент измерения клетками фитопланктона) высока, наблюдается линейная связь между ИФРОВ и концентрацией хлорофилла «А», т.е. в этом случае возможно установить непосредственную связь между ИФРОВ и концентрацией хлорофилла «А» в клетках, которые воспроизводят этот РОВ.

Районы измерений

Всего в данном рассмотрении использовано более 100 тыс. ЛИФ-спектров, которые получены во время экспедиций в период с 2000 по 2004 г. на акватории открытых океанических вод и вод окраинных морей Тихого, Индийского и Атлантического океанов. Разрез, вдоль которого проводилось измерение спектров ЛИФ, температуры и солёности морской воды на глубине 4 м, показан на рис. 1. В полученных данных представлены воды практически всех типов, наблюдаемых в различных климатических зонах и в различные периоды развития водорослей.

На акватории Охотского моря измерения выполнялись с 2000 по 2002 г. в период с июля по сентябрь. Основной пик цветения водорослей в Охотском море приходится на май [4]. Хотя в отдельных районах Охотского моря и в летне-осенний период наблюдались высокие концентрации хлорофилла «А», которые связывались с локальным цветением водорослей. Например, в августе 2002 г. вдоль Курильских проливов фиксировались значе-

ния концентрации хлорофилла «А» на уровне 20 мкг/л.

В период с января 2003 по апрель 2004 г. в рамках кругосветной экспедиции измерения были проведены дважды в Восточно-Китайском и Южно-Китайском морях: в феврале 2003 г. в отсутствие цветения и в марте 2004 г. в начальный период цветения водорослей. В Индийском океане и Красном море – в феврале–марте 2003 г., в Средиземном море и Атлантическом океане вдоль побережья Португалии – в апреле 2003 г. Во всех указанных районах концентрация хлорофилла «А» не превышала 3 мкг/л. Высокие значения концентраций хлорофилла «А» (до 20 мкг/л) были зарегистрированы в Северном море в апреле 2003 г., а также в южной части Атлантики и вдоль Чилийского побережья Тихого океана в ноябре–декабре 2003 г. В этих районах измерения проводились в период цветения водорослей.

Анализ данных

Для исследования процессов воспроизводства РОВ фитопланктонными сообществами были проанализированы соотношения между ИФРОВ532 (532 означает, что возбуждение флуоресценции РОВ проводилось излучением с длиной волны 532 нм), которое у нас численно выражено параметром Q , с концентрацией хлорофилла «А» – C (восстановленной из спектров ЛИФ). Для этого строились диаграммы рассеяния $Q-C$ (рис. 2). В некоторых районах между Q и C наблюдалась линейная зависимость, и в этом случае, если коэффициент корреляции между Q и C (обозначен R) статистически значим, мы вводили линейную регрессию для описания $Q-C$ -соотношений, в которой свободный член обозначен Q_0 , а тангенс угла наклона v :

$$Q(C) = Q_0 + C_{\text{ХЛА}}v. \quad (3)$$

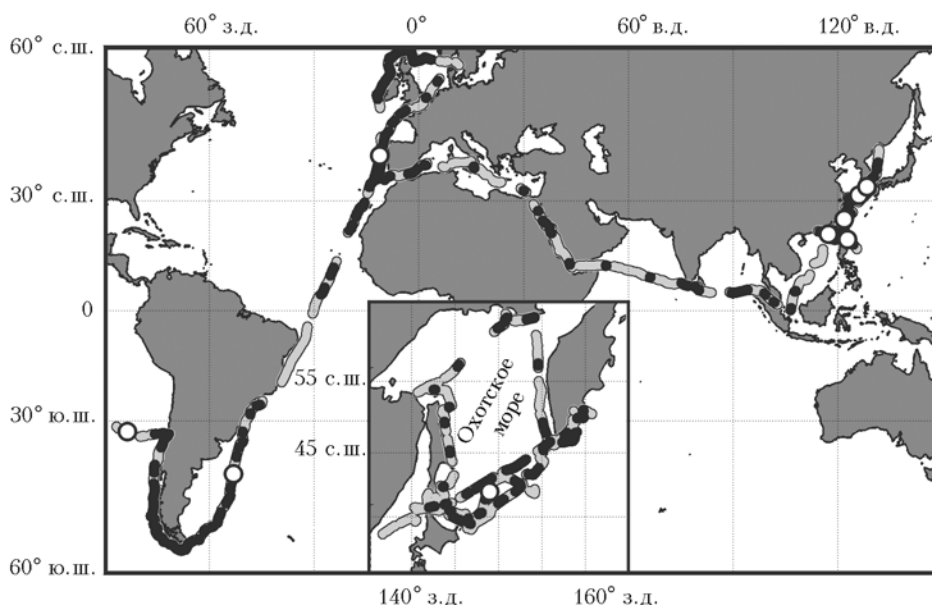


Рис. 1. Районы измерений спектров ЛИФ

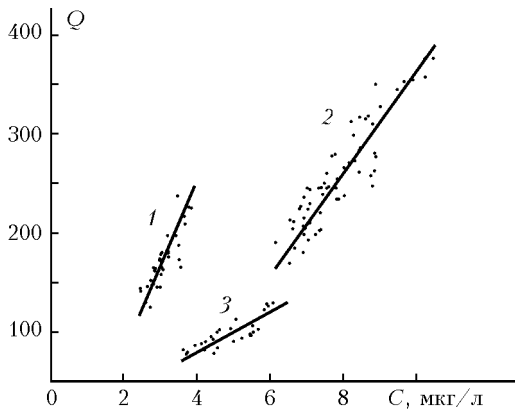


Рис. 2. Пример линейных диаграмм рассеяния для различных районов Мирового океана: 1 – Охотское море, 5 августа 2002 г.; 2 – Северное море, 28 апреля 2003 г.; 3 – юго-западная часть Атлантического океана, 10 декабря 2003 г.

Из общих соображений Q_0 можно интерпретировать как некое фоновое значение флуоресцирующей части РОВ (т.е. либо РОВ, которое не воспроизведено рассматриваемым фитопланктонным сообществом в рассматриваемый период времени, либо РОВ, которое поступило от источников, вообще не связанных с фитопланктонным сообществом), а коэффициент v – как производство флуоресцирующей части РОВ одной единицей хлорофилла «А» в рассматриваемый период времени [4].

Далее встает вопрос о том, как выбрать границы района, в которых бы связь между C и Q была линейной и «однородной», т.е., другими словами, как выделить линейный кластер данных, в рамках которого процесс воспроизводства органики описывался бы одними и теми же параметрами. Визуальное разделение с помощью диаграмм рассеяния $Q-C$ провести очень сложно и порой просто невозможно, так как часто на одной диаграмме рассеяния пересекается множество различных кластеров с похожими параметрами. Для кластеризации были выбраны следующие параметры: коэффициент корреляции R между C и Q , наклон линейной регрессии v и ее свободный член Q_0 [см. формулу (3)], т.е. кластеры определялись только параметрами линейной зависимости между C и Q и не зависели от величин C и Q .

Сам процесс кластеризации заключался в следующем: в окне заданной ширины рассчитывались коэффициент корреляции R , коэффициенты линейной регрессии и соответствующие им статистические ошибки. Размер окна был выбран в 60 точек (порядка 30 км). Уменьшение окна приводило к увеличению ошибок определения коэффициента корреляции и параметров регрессии, а увеличение окна вело к большему заглаживанию рассчитываемых новых параметров и к потере мелких масштабов. Далее выборка передвигалась по всему массиву точек с шагом в одну точку. Чтобы не захватить точки из заведомо разных районов, пропускались выборки с временным разрывом между соседними точками более 20 мин. Рассчитанным параметрам присваивалось среднее по выборке время. Таким

образом, были получены три новых временных ряда R , v и Q_0 с соответствующими ошибками (рис. 3,а–в).

Мы считаем, что одинаковые (в пределах ошибки) значения получившихся параметров описывают отдельный кластер или отдельное фитопланктонное сообщество (в смысле воспроизводства РОВ). В нем наблюдается одинаковая связь между количеством фитопланктона и производимым им РОВ, при этом РОВ воспроизводится одинаковыми темпами на одном уровне фонового РОВ. Из получившихся временных рядов R , v и Q_0 определялись границы района, где все три параметра были бы одинаковы в пределах ошибки (рис. 3,г). Соответствующие диаграммы рассеяния представлены на рис. 3,д, а на рис. 3,е представлены примеры трехмерных диаграмм параметров кластеров, которые описывают «однородные» фитопланктонные сообщества. Такие диаграммы строятся для наглядного представления различных кластеров. На них отдельные кластеры различаются намного лучше, чем на двумерной диаграмме рассеяния $Q-C$ (рис. 3,д).

С помощью этой процедуры из наших данных было выделено 319 кластеров со статистически значимым коэффициентом корреляции R . Наибольший интерес вызывают фитопланктонные сообщества, в которых наблюдается сильная линейная связь (большие коэффициенты R) между концентрацией хлорофилла «А» и воспроизводимым фитопланктонным РОВ. Стоит отметить, что если концентрация хлорофилла «А» превышает 5 мг/л, то коэффициент корреляции R не опускается меньше 0,4, а при $C > 10$ мг/л $R > 0,6$ (рис. 4,а). То есть можно утверждать, что при достаточно высокой концентрации хлорофилла «А» (по крайней мере больше 5 мг/л) в сигнале флуоресценции преобладает РОВ, которое произведено фитопланктонным сообществом в рассматриваемом районе в данный период времени (это так называемый «молодой» РОВ).

Кластеры с коэффициентом корреляции больше 0,5 наблюдались, в основном, в период цветения водорослей: например, в конце апреля 2003 г. в Северо-восточной части Атлантики и на акватории Северного моря, а в начале декабря 2003 г. – по маршруту от Фолклендских островов до траверза Магелланова пролива с тихоокеанской стороны. Но были и отдельные линейные кластеры в Красном и Средиземном морях, а также целый ряд в Охотском море в 2001, 2002 гг. вне периода цветения. Мы отнесли эти кластеры к локальному цветению водорослей.

На протяжении всего маршрута довольно часто определялись фитопланктонные сообщества с $R < 0$. Если многие отрицательные значения R можно было не интерпретировать, так как они не значимо отличались от нуля, то были такие фитопланктонные сообщества, где R был значительно меньше нуля, например наблюдались 32 сообщества с $R < -0,5$ (в то время как $R > 0,5$ было зарегистрировано для 120 сообществ). На рис. 1 черным цветом обозначены на маршруте судна участки, где R были

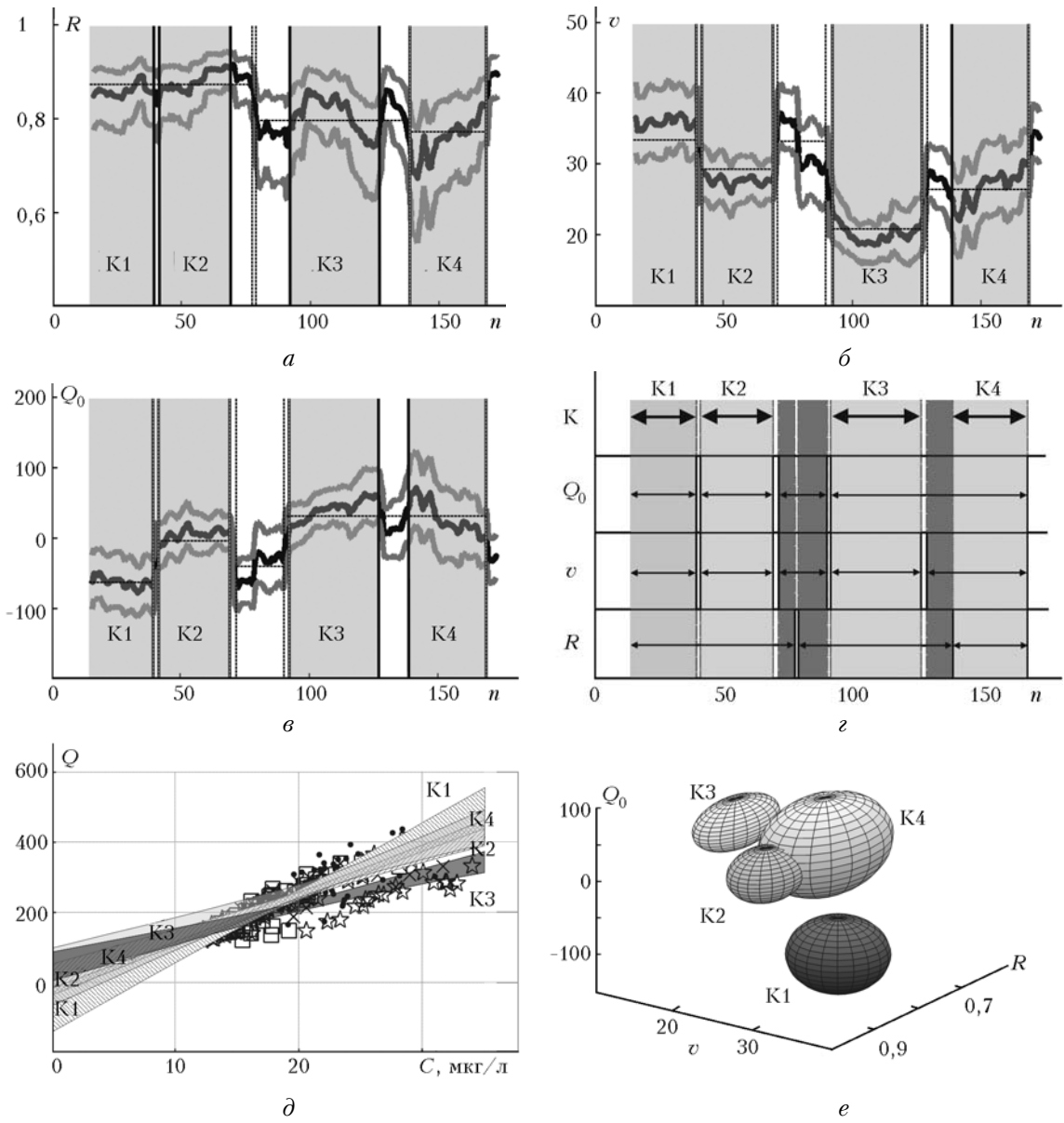


Рис. 3. Пример определения стационарных участков на временных рядах R , v и Q_0 . К1–К4 – выделенные кластеры

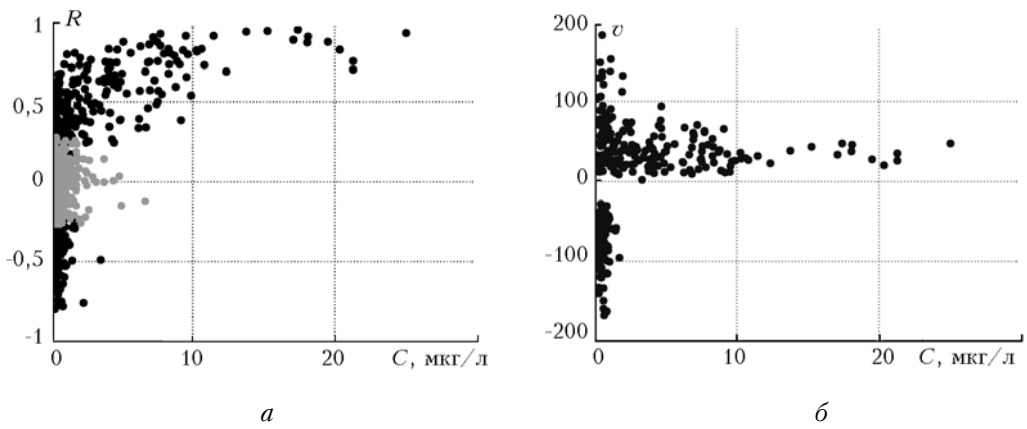


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции R от концентрации хлорофилла «А» (а), серым цветом обозначены статистически незначимые R (по критерию Стьюдента, с уровнем значимости 5%); зависимость параметра v от концентрации хлорофилла «А» (б)

статистически значимы (по критерию Стьюдента), белыми большими кружками — участки со статистически значимыми отрицательными R . Практически все отрицательные R наблюдались в период перед цветением водорослей. Можно сделать предположение, что на начальном этапе развития фитопланктонного сообщества происходит активное потребление РОВ клетками фитопланктона.

Из диаграммы рассеяния $v-C$ (рис. 4, б) видно, что при увеличении концентрации хлорофилла «А» наблюдается тенденция уменьшения темпов воспроизводства органического вещества v . По всей видимости, с увеличением концентрации хлорофилла «А» до некоторой величины падает эффективность воспроизводства РОВ, при этом параметр v примерно одинаков у кластеров с концентрацией хлорофилла «А» больше 8 мкг/л и составляет порядка 30.

О возможном отрицательном влиянии высокой плотности популяции на фотосинтетическую активность фитопланктона говорится и в работе [14]. Отметим также, что для отрицательно-линейных кластеров значение v не превышает -30 , при этом концентрация хлорофилла «А» таких отрицательно-линейных кластеров не превышает 1,5 мкг/л. Это также подтверждает предположение о том, что на начальном этапе развития фитопланктонного сообщества РОВ активно используется клетками для увеличения концентрации фитопланктона. На рис. 5 приведены гистограммы значений параметра v для наиболее биопродуктивных районов Мирового океана.

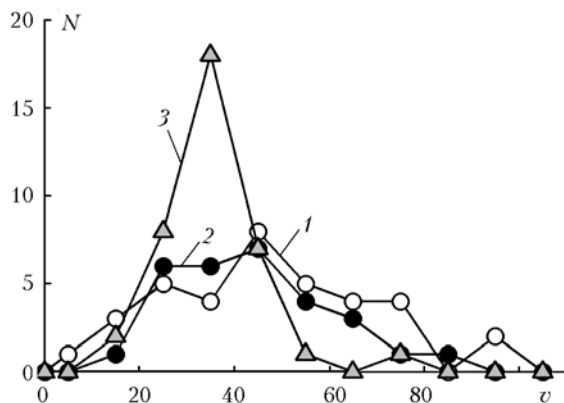


Рис. 5. Гистограммы v для наиболее биопродуктивных районов Мирового океана: 1 — Охотское море (с 20 июля по 10 августа 2002 г.); 2 — Северное море (с 20 апреля по 5 марта 2003 г.); 3 — юго-западная часть Атлантического океана и тихоокеанское побережье Чили (с 25 ноября по 10 декабря 2003 г.)

Во всех трех районах наблюдалось одномодовое распределение. Совпадение (по порядку величины) наиболее вероятных значений v для разных географических и климатических зон Мирового океана в периоды цветения или близкие к ним (Южная Атлантика и Тихий океан — 35, Северное и Охотское моря — около 45) говорит об универсальном характере процесса фотосинтеза в смысле воспроизводства органики клетками фитопланктона.

Особенно это заметно при рассмотрении гистограмм двух районов Северного полушария (Северное и Охотское моря), где гистограммы практически совпадают. Однако различия в гистограммах исследованных районов Южного и Северного полушарий следует, вероятно, отнести к особенностям функционирования фитопланктонных сообществ в различных климатических и гидрофизических условиях.

Встает вопрос о том, какая часть РОВ флуоресцирует при возбуждении длиной волны 532 нм. В целом ряде работ (например, [16, 17]) проводились исследования трехмерных ЛИФ-спектров, где интенсивность флуоресценции морской воды представлена в виде функции, зависящей от двух переменных — длины волны возбуждения флуоресценции и длины волны свечения флуоресценции. На основе экспедиционных или лабораторных измерений тот или иной пик интенсивности на трехмерных ЛИФ-спектрах относился авторами к определенному типу РОВ. Так были выделены три основных типа флуоресценции: протеиноподобная, гуминоподобная и тирозиноподобная. К сожалению, в найденных нами работах возбуждение флуоресценции проводилось только ультрафиолетовым излучением. В тех работах, где использовалось зеленое излучение для возбуждения флуоресценции (например, [18]), не был проведен анализ того, какая часть РОВ при этом флуоресцирует. Для этого мы сравнили результаты работ [15, 19, 20], где исследуется связь между соленостью и ИФРОВ при возбуждении УФ-излучением, с нашими измерениями.

В приведенных работах практически всегда наблюдается обратная зависимость между соленостью морской воды и ИФРОВ-УФ, это позволяет сделать предположение о том, что при возбуждении УФ-излучением наибольший вклад в общую флуоресценцию дают «старый» РОВ и РОВ терригенного происхождения. При аналогичных измерениях, проведенных нами на акваториях с резкими изменениями солености морской воды (устье р. Амур в Охотском море и переход из Северного моря в Балтийское), не было выявлено никаких зависимостей между ИФРОВ532 и соленостью морской воды. Это может служить вторым аргументом в пользу того, что больший вклад в общую ИФРОВ, при возбуждении длиной волны 532 нм, дает «молодой» РОВ (первым аргументом является сильная корреляция между Q и C при высоких концентрациях хлорофилла «А»).

Заключение

Анализ корреляционных соотношений биооптических параметров спектров ЛИФ морской воды позволил классифицировать фитопланктонные сообщества в различных географических и климатических зонах Мирового океана по темпам воспроизводства растворенного органического вещества. В основных биопродуктивных районах Мирового океана воспроизводство РОВ происходит примерно одинаковым образом и имеет схожие статистические параметры. Однако в Северном и Южном полушариях сообщества имеют несколько различные параметры.

В районах с высокими концентрациями хлорофилла «А» (Северное, Охотское моря, южные части Атлантики и Тихого океана) наблюдаются примерно одинаковые наиболее вероятные значения параметра v (около 40). Характерно, что измерения в данных районах проводились в период цветения водорослей или при локальном цветении (в Охотском море). Гистограммы распределения v для биопродуктивных районов Северного полушария практически одинаковы, в то время как в южных частях Атлантики и Тихого океана наблюдаются более однородные по темпам воспроизводства органики фитопланктонные сообщества (более узкая гистограмма).

На протяжении всех измерений, выполненных в Индийском океане и в экваториальной части Атлантики, удалось обнаружить значимую линейную связь между Q и C , в пределах анализируемых пространственных масштабов, лишь в нескольких случаях. Это объясняется низкими средними значениями концентрации хлорофилла «А» в этих районах, что приводит к малому вкладу «молодого» РОВ в общий сигнал флуоресценции РОВ.

Данный подход при описании функционирования фитопланктонных сообществ в сочетании с методиками определения химического состава морской воды и клеток фитопланктона [21], соотношения пигментного состава клеток и определения скоростей электронного транспорта в реакции фотосинтеза [3] может позволить проводить более полное описание и более детальную классификацию фитопланктонных сообществ.

Авторы выражают благодарность М.С. Пермякову за консультацию и помощь, оказанную в процессе обработки ЛИФ-спектров.

1. Карнаухова В.Н. Спектральный анализ в клеточном мониторинге состояния окружающей среды. М.: Наука, 2004. 186 с.
2. Рубин А.Б. Биофизические методы в экологическом мониторинге // Сорос. образ. ж. 2000. Т. 6. № 4. С. 7–13.
3. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Palucci A., Ribezzo S. Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica // Int. J. Remote Sens. 2001. V. 22. N 2, 3. P. 369–384.
4. Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А., Буров Д.В., Голик С.С., Хованец В.А., Майор А.Ю. Особенности формирования спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в период цветения водорослей в различных районах Мирового океана // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 742–749.
5. Демидов А.А., Баулин Е.В., Фадеев В.В., Шур Л.А. Применение лазерной спектрофлуориметрии для

измерения концентрации пигментов морского фитопланктона // Океанология. 1981. Т. 21. № 1. С. 174–179.

6. Hedges J.I. Global biogeochemical cycles: progress and problems // Mar. Chem. 1992. V. 29. P. 67–93.
7. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
8. Тихий океан / Под ред. О.К. Леонтьева. М.: Мысль, 1982. 316 с.
9. Атлантический океан / Под ред. О.К. Леонтьева. М.: Мысль, 1977. 296 с.
10. Hopkinson Jr. C.S., Joseph J.V., Amy N. Decomposition of dissolved organic matter from the continental margin // Deep-Sea Res. Pt. 2. 2002. V. 49. P. 4461–4478.
11. Munster. Concentrations and fluxes of organic carbon substances in the aquatic environment // Antonie van Leeuwenhoek: Intern. J. of General and Molec. Microbiol. (NLD). 1993. V. 63. N 3. P. 243–274.
12. Букин О.А., Пермяков М.С., Майор А.Ю., Сагалев С.Г., Липилина Е.А., Хованец В.А. О калибровке метода лазерной флуориметрии при измерении концентрации хлорофилла «А» // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 3. С. 28–32.
13. Майор А.Ю., Букин О.А., Павлов А.Н., Киселев В.Д. Судовой лазерный флуориметр для исследования спектров флуоресценции морской воды // Приборы и техн. эксперим. 2001. № 4. С. 151–154.
14. Биологическая продуктивность океана. Биология океана. Т. 2 / Под ред. М.Е. Виноградова. М.: Наука, 1977. 399 с.
15. Карабаев Г.С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 200 с.
16. Coble P.G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy // Mar. Chem. 1996. V. 51. N 4. P. 325–346.
17. Parlanti E., Worz K., Geoffroy L., Lamotte M. Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs // Org. Geochem. 2000. V. 31. P. 1756–1781.
18. Hoge F.E., Swift R.N. Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter and fluorescence from chlorophyll a and other naturally occurring pigments // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 18. P. 3197–3205.
19. Callahan J., Dai M., Chen R.F., Li X., Lu Z., Huang W. Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, China // Mar. Chem. 2004. V. 89. P. 211–224.
20. Klinkhammer G.P., Chin C.S., Wilson C., Rudnicki M.D., German C.R. Distribution of dissolved manganese and fluorescent dissolved organic matter in the Columbia River estuary and plume determined by in situ measurements // Mar. Chem. 1997. V. 56. P. 1–14.
21. Букин О.А., Алексеев А.В., Ильин А.А., Голик С.С., Царев В.И., Бодин Н.С. Использование лазерной искровой спектроскопии с многоимпульсным возбуждением плазмы для мониторинга качества морской воды и состояния фитопланктона // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 26–32.

O.A. Bukin, P.A. Saluk, A.Yu. Major, A.N. Pavlov. Investigation of processes of organic matter reproducing by phytoplankton cells by the induced laser fluorescence method.

The functional relationships of the biooptical components of the sea water laser induced fluorescence spectra inside the various regions of the Ocean are described. Phytoplankton communities (clusters) with the linear relations are selected and the regression parameters are calculated. These parameters characterize the reproduction rates of the dissolved organic matter by phytoplankton cells and may be used to classify the phytoplankton communities (in sense of the DOM reproduction) and to investigate this process.