

2. *Kieffer S.W.* Sound speed in liquid-gas mixtures: water-air and water-steam // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. №20. P. 2895- 2904.
3. *Бабий В.И.* Исследование влияния сероводорода на скорость распространения звука в Черном море // Матер. конф. «Совершенствование управления развитием рекреационных систем. Севастополь. 23 – 25 окт. 1986 г. Ч.2». МГИ АН УССР. Севастополь. 1987. С. 251– 258. (Рук. депонир. в ВИНТИ 11.08.87. № 5804-B87).
4. *Владимиров Ю.Н., Городецкий А.Е., Кузьмин П.П., Карменов В.Г.* Контроль загрязнений с использованием акустических резонаторов. Сб. трудов «Предотвращение загрязнений внутренних водоемов и охрана труда на речном транспорте». Л. 1987. С. 89-102.
5. *Азаренко Е.В.* Акустическое обнаружение эмульгированных нефтепродуктов в восточной части Черного моря // *Акустичний вісник.* 2006. Том 9. № 1. С. 39.

Серавин Георгий Николаевич

Научно-исследовательский центр Радиоэлектронного вооружения

E-mail: mikyshin-igor@mail.ru

140180, Россия, Санкт-Петербургская обл., Жуковский, ул. Дворцовая, 2, тел.:

8(495) 3789673

Микушин Игорь ИвановичE-mail: mikyshin-igor@mail.ru**Seravin Georgy Nikolaevich**

The Naval Research Center of Electronics

E-mail: mikyshin-igor@mail.ru

2, Dvortsovay str., St. Petersburg region, Pushkin, 140180, Russia, Ph.:+7 (495)

3789673

Mikyshin Igor IvanovichE-mail: mikyshin-igor@mail.ru

УДК 551.501.816

В. М. Сидоренко**ЭКСПРЕССНЫЕ ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА
ВОДНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Предложены методы экспрессного количественного определения концентрации хлорофилла и первичной продукции в водных районах на основе экспериментальных флуориметрических данных, полученных "in situ". Проведен сравнительный анализ результатов использования предложенных экспрессных методов и традиционных методов, основанных на экстракции хлорофилла из проб воды.

Вода; флуоресценция; фитопланктон; первичная продукция; хлорофилл; концентрация; фотоадаптация.

В.М. Sidorenko**EXPRESS FLUOROMETRIC METHODS OF WATER ECOLOGICAL
SYSTEMS MONITORING**

The methods of express quantitative determination of chlorophyll concentration and primary production in water regions are offered on the basis of experimental fluorimetric data obtained "in situ". The comparative analysis of results received with usage of offered express methods and traditional methods, founded on extraction of chlorophyll from assays of water is conducted.

Water; fluorescence; phytoplankton; prime production; chlorophyll; particle; concentration; photoadaptation.

Существуют различные методы, позволяющие оценить биомассу и первичную продукцию фитопланктона того или иного водоёма. Однако все они требуют длительного времени анализа проб воды в лабораторных условиях. Это приводит к низкой производительности времени проведения измерений без отбора проб и пробоподготовки. Поэтому актуальным является разработка экспрессных, в том числе дистанционных, методов получения информации о значениях биомассы и первичной продукции фитопланктона (ФП) в той или иной акватории. Наиболее перспективным в этих целях представляется использовать явление флуоресценции хлорофилла в ФП. Интенсивность флуоресценции хлорофилла, в принципе, позволяет определить его концентрацию, на основании которой возможно рассчитать биомассу ФП и первичную продукцию. Основная трудность, не позволявшая до настоящего времени реализовать флуориметрический экспрессный метод определения первичной продукции водных экосистем, заключалась в отсутствии работоспособных моделей описания взаимодействия света с клетками ФП в процессе флуоресценции содержащегося в них хлорофилла.

В последние годы был разработан общий подход к спектральному оптическому исследованию гетерогенных конденсированных систем, а также конкретные способы экспрессного определения характеристик поглощения и флуоресценции молекул веществ, входящих в их состав [1]. В связи с этим важной и актуальной задачей является создание на основе указанного подхода конкретных методов экспрессного определения экологических характеристик природных вод таких, как концентрация содержащегося в ней хлорофилла и величины первичной продукции.

В целом современные представления об устройстве фотосинтетического аппарата, разнообразие пигментных систем и изменение спектральных характеристик водорослей под влиянием внешних условий свидетельствует о том, что ИФХ ФП может зависеть от многих факторов столь же сильно, как и от концентрации пигментов. Это, в принципе, должно приводить к нарушению линейной связи между концентрацией хлорофилла и ИФХ ФП в акватории. Согласно результатам анализа различных факторов, влияющих на точность определения концентраций хлорофилла C_{chl} по измеренным погружаемым флуориметром ИФХ, основной вклад в погрешность вносит уровень подводной освещенности, который может привести к погрешности в сотни и даже тысячи процентов [2]. Вклад этого фактора в результаты измерения ИФХ ФП требует специального рассмотрения. Исследования в этой области важны для развития методов флуориметрии фитопланктона «in situ», позволяющих оценить концентрацию его биомассы в морской воде. Действительно, влияние уровня солнечной радиации сказывается не только на изменении биомассы ФП, но и на изменении концентрации хлорофилла в его клетках и квантовом выходе флуоресценции ФП. Зависимость ИФХ ФП от светового режима находит наиболее яркое проявление в ее суточной изменчивости.

Известны три основных механизма суточной изменчивости ИФХ ФП. Первый из них действует через 10 мин после начала облучения и особенно проявляется непосредственно под поверхностью воды, где уровень солнечного потока велик. Его объясняют нефотохимическим тушением, вызванным фотозащитными νb каротиноидами, защищающими фотосинтетическую часть клетки от интенсивного облучения. При интенсивной внешней засветке может значительную роль играть и другой, фотохимический механизм тушения флуоресценции. Последний вызван его фотоадаптацией, суть которой заключается в выработывании хлорофилла «а» в помещенных на свет клетках хлорофилла. При этом меняется удельная ИФХ, приведенная к единице концентрации хлорофилла. Период фотоадаптации более длителен, но происходит в суточном интервале времени. Наконец, изменение концентрации хлорофилла в морской воде происходит коррелированно с изменением биомассы фитопланктона в связи с ростом его численности. Важно, что в океане при рассмотрении динамики изменения популяции фитопланктона необходимо учитывать его потребление зоопланктоном, делающим эту часть вариации хлорофилла в морской воде связанной с величиной сеточного вылова. Относительный вклад перечисленных факторов в суточный ход ИФХ оценивался на основании исследований, проведенных в северо-восточной Атлантике. Было установлено, что фотоингибция, или нефотохимическое тушение, доминирует на глубинах 10 и 20 м, фотоадаптация – глубинах 20 и 60 м, а изменение биомассы фитопланктона определяет суточные вариации ИФХ на глубине 60 м. В настоящее время отсутствуют достаточно работоспособные флуориметрические методы определения концентрации хлорофилла в фитопланктоне «in situ», что во многом обусловлено недостаточно корректным подходом к учету влияния уровня освещенности на точность флуориметрических измерений $C_{\text{хл}}$. Отсутствие в настоящее время таких методов приводит к ошибкам при флуориметрическом определении $C_{\text{хл}}$, превышающим в десятки раз их истинные значения [2]. Поэтому актуальным является выяснение механизма влияния E на флуоресцентные характеристики живых клеток ФП и разработка методов учета этого влияния.

Ранее предпринимались попытки описать экспериментальные зависимости $I_{\text{хл}}(E)$ и оптической плотностью слоя клеток ФП $D(E)$ только изменением концентрации хлорофилла в клетках ФП. Однако экспериментально отмечена относительно малая изменчивость $I_{\text{хл}}(E)$ по сравнению с $D(E)$, тогда как теория предсказывала противоположное соотношение между этими зависимостями. В связи с этим высказывались предположения о возможном влиянии на спектры дополнительных факторов. Поэтому были предложены новые модельные представления о спектральных проявлениях фотоадаптации клетки ФП [1-3]. В них учтено изменение концентрации клеточных фотозащитных пигментов и использован новый метод учета реабсорбции излучения хлоропластом. При этом клетка ФП представлена в виде сферы, внутри которой находится хлоропласт, а внешний слой образуют фотозащитные пигменты (рис. 1). Такая модель позволяет рассмотреть основные факторы спектральных проявлений фотоадаптации – изменения внутриклеточной концентрации молекул хлорофилла и их квантового выхода флуоресценции, а также изменение оптической плотности фотозащитных пигментов. Причем последние ослабляют падающее на хлоропласт излучение в $\exp D$ раз, где D – оптическая плотность слоя фотозащитных пигментов, а ослабление света клеткой в спектре поглощения определяется величиной $\exp 2D$. С учетом этого оптическое пропускание T взвеси клеток (рис. 1) в прозрачном

растворителе при концентрациях, когда их самозатенением можно пренебречь, определяется формулой

$$T = 1 - [1 - e^{-2D}(1 - Q_a)]Ns/S, \quad (1)$$

где Q_a – фактор эффективности поглощения света частицей, N – число частиц взвеси; S – площадь сечения клетки; S – площадь сечения кюветы, перпендикулярного падающему излучению.

Причем величина Q_a для однородной сферической частицы определяется параметром $\rho' = 2Rk$, где R – радиус частицы, а k – ее показатель поглощения. На основании (1) имеем:

$$D = 1 - [1 - e^{-2D}(1 - Q_a)]Ns/S. \quad (2)$$

Тогда из выражения (2) для показателя поглощения кюветы со взвесью, нормированного на концентрацию хлорофилла в кювете $C_{хл} = vC_{хл}N/V$ (где v – объем хлоропласта, V – объем кюветы, $C_{хл}$ – концентрация хлорофилла в клетке), получим:

$$\kappa_{ph} = [1 - e^{-2D}(1 - Q_a)]3/(4Rc_{хл}). \quad (3)$$

Запишем выражение для интенсивности флуоресценции хлорофилла в клетках с учетом оптической плотности фотозащитных пигментов $D(\lambda_1)$ на длине волны возбуждения λ_1 , имея в виду, что для оптической плотности на длине волны флуоресценции λ_2 выполняется условие $D(\lambda_2) \ll D(\lambda_1)$:

$$I_{ph} \approx \eta_v \exp[-D(\lambda_1)]QNs/S, \quad (4)$$

где Q – фактор эффективности флуоресценции частицы. Для однородной сферической частицы он зависит от параметров $\rho'_1 = 2Rk_1$ и $\rho'_2 = 2Rk_2$, где k_1 и k_2 – показатели поглощения частицы на частотах возбуждения и флуоресценции соответственно [1,3]. Из (4) следует выражение для нормированной на величину $C_{хл}$ интенсивности флуоресценции сферических клеток радиусом R :

$$I_{ph} \approx \eta_v \exp[-D(\lambda_1)]Q/(Rc_{хл}). \quad (5)$$

На основании формул (3), (5) были получены зависимости величин Q , D и η_v от внешней освещенности E , к которой адаптирован фитопланктон (с использованием экспериментальных данных о показателях поглощения κ_{ph} на длинах волн возбуждения и регистрации интенсивности флуоресценции I_{ph} ФП, полученных для различных видов морского ФП [1]).

На основании полученных данных были рассчитаны зависимости от освещенности удельного фактора $Q^* = 3Q/(2\rho_1)$. Последний определяет соотношение между интенсивностями флуоресценции частицы взвеси I_v и разбавленного раствора I_p , содержащих одинаковое количество флуоресцирующих молекул при неизменном квантовом выходе флуоресценции молекул: $I_v = Q^*I_p$. Его знание необходимо для флуориметрического определения количества хлорофилла, содержащегося в

хлоропластах клеток ФП. Установлен рост величины Q^* с увеличением E , который можно объяснить уменьшением концентрации хлорофилла в клетке фитопланктона в процессе ее фотоадаптации.

При этом уменьшается реабсорбция излучения частицей, следовательно, увеличивается эффективность наблюдаемой флуоресценции содержащегося в ней хлорофилла и интенсивность флуоресценции взвеси приближается к интенсивности флуоресценции разбавленного раствора. Получена линейная зависимость роста оптической плотности фотозащитных пигментов при увеличении E в исследованном диапазоне освещенностей.

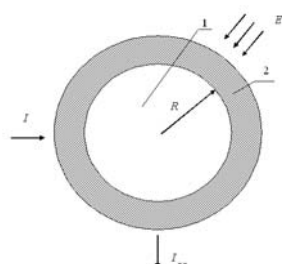


Рис.1. Оптическая модель клетки фитопланктона: 1 – внутриклеточная среда; 2 – слой фотозащитных пигментов с оптической плотностью D ; R – радиус клетки

получен, по-видимому, впервые.

Полученная зависимость $\eta(E)$ имеет максимум в области средних значений освещенности. Такая зависимость может быть объяснена двумя процессами. Один из них с ростом E приводит к уменьшению η_v за счет увеличения содержания хлорофилла «а» в нефлуоресцирующей (PS1) подсистеме хлоропласта по сравнению с флуоресцирующей подсистемой (PS2). С этим процессом конкурирует процесс увеличения η_v с ростом E за счет уменьшения квантового выхода фотосинтеза η_c ввиду соотношения: $\eta_v = 1 - \eta_c$.

Проведенные исследования показывают, что в процессе фотоадаптации клетки ФП на ее спектральные характеристики влияют все рассмотренные параметры: реабсорбция света хлоропластом, изменение квантового выхода молекул хлорофилла и изменение оптической плотности фотозащитных пигментов. При этом относительно малая зависимость I_{ph} по сравнению с k_{ph} от E , отмечавшаяся ранее, объясняется тем, что интенсивность флуоресценции клетки зависит от оптической плотности $D(\lambda_1)$, а показатель ее поглощения – от $2D(\lambda_1)$. Следует особо отметить, что Q^* , D и η_v имеют различные постоянные времени изменения при варьировании E . Возможность раздельной оценки влияния этих параметров на интенсивность спектров позволяет учитывать эти различия в зависимости от динамики изменений E (сезонные, суточные и более короткопериодные изменения).

Рассмотрим результаты применения предложенной флуориметрической модели клетки ФП к конкретным задачам мониторинга водных районов.

Экспрессное безэкстракционное определение концентрации хлорофилла $C_{хл}$ в акватории

При определении значения $C_{хл}$ на основании интенсивности флуоресценции ФП обычно пользуются градировочными зависимостями $C_{хл} = K_{вр} I_{рхл}$, экспе-

риментально полученными в результате измерения интенсивности флуоресценции $I_{рхл}$ экстрактов хлорофилла в органических растворителях, как правило, в ацетоне. Поэтому для получения адекватных данных о концентрации хлорофилла в ФП морской воды необходимо установить связь между $I_{рхл}$ экстракта и интенсивностью флуоресценции $I_{вхл}$ клеток ФП при одинаковых значениях концентрации хлорофилла $C_{хл}$. Общее соотношение между величинами $I_{рхл}$ и $I_{вхл}$ при одинаковой концентрации хлорофилла $C_{хл}$ в соответствии с формулой (5) имеет вид

$$I_{вхл}/I_{рхл} = \eta_{в}/\eta_{р} Q^* \exp[-D] \Theta_{отн}, \quad (6)$$

где $\eta_{р}$ и $\eta_{в}$ – соответственно квантовые выходы флуоресценции хлорофилла в растворе и в хлоропласте клетки фитопланктона; D – оптическая плотность фотозащитных пигментов; $\Theta_{отн} = (n_{хл}^2 + 2)^4 / (n_a^2 + 2)^4$ – фактор, учитывающий зависимость ИФ молекулы хлорофилла от показателя преломления конденсированной среды, в которой она находится [1,3] (для ацетона $n_a = 1,359$, для хлоропласта $n_{хл} = 1,41$).

Параметры, входящие в (6), могут меняться в широких пределах. Так, например, если значение $\eta_{р}$ для данного растворителя постоянно, то $\eta_{в}$ живого фитопланктона меняется в зависимости от уровня освещенности до двух раз. Значение Q^* при изменении радиуса клеток в диапазоне $R = 5-50$ мкм и концентрации содержащегося в них хлорофилла меняется в 10 раз, а влияние фотозащитных пигментов – в 1,5 раза. Таким образом, при постоянном значении $C_{хл}$ соотношение $I_{вхл}/I_{рхл}$ может варьировать в десятки раз, что соответствует указанным выше возможным ошибкам при флуориметрическом определении концентрации клеточного хлорофилла в акватории. Из (6) для концентрации хлорофилла с учетом зависимости входящих в него параметров от E имеем:

$$C_{хл} = \frac{\eta_{р} K_{вр} I_{вхл}(E)}{\eta_{в}(E) Q^*(E) \exp[-(D(E))] \Theta_{отн}}. \quad (7)$$

Исследование изложенного экспрессного безэкстракционного метода определения концентрации хлорофилла проводилось на основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в восточной части Черного моря в районе мыса Пицунда. Экспериментальная зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла в составе взвеси фитопланктона от глубины $I_{вхл}(H)$, полученная в результате усреднения 5-ти вертикальных разрезов, измеренных с помощью погружаемого флуориметра, показана на рис. 2. Такая зависимость была характерна для периода времени с максимальной солнечной освещенностью ($12^{00} \dots 16^{00}$). Для такого распределения $I_{вхл}(H)$ на основании предложенного экспресс-метода с использованием выражения (7) была получена теоретическая зависимость изменения концентрации содержащегося в фитопланктоне хлорофилла с глубиной (см. рис.2). При этом величина Q^* находилась с использованием усредненного за 2 часа значения E . Причем значение фактора Q^* определя-

лось при $R = 10$ мкм, который отвечает диатомовым, характерным для летне-осеннего сезона, когда проводился эксперимент. Постоянные времени реакции на изменение E концентрации фотозащитных пигментов и квантового выхода флуоресценции составляют менее нескольких десятков минут, и они определялись с использованием текущего значения E . Полученная на основании использования формулы (7) расчетная зависимость $C_{\text{хл}}(H)$ заметно отличается от $I_{\text{вкл}}(H)$.

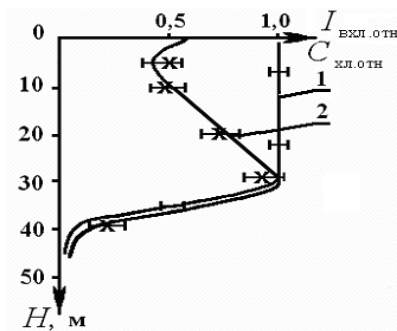


Рис. 2 Распределение по глубине концентрации хлорофилла $C_{\text{хл}}$, и интенсивности флуоресценции $I_{\text{в}}(H)$ в Черном море в 12⁰⁰...16⁰⁰:

1 – $I_{\text{вкл}}(H)$; 2 – теоретическое распределение $C_{\text{хл}}(H)$; х – экспериментальные значения $C_{\text{хл}}(H)$, определенные экстракционным методом

В отличие от $I_{\text{вкл}}(H)$ величина $C_{\text{хл.отн}}(H)$ имеет максимум на глубине в районе $H = 30$ м. Параллельно определялись значения $C_{\text{хл}}$ в пробах с глубин 0, 10, 20, 30 и 40 м с помощью известного экстракционного метода Джеффри – Хамфри. Из приведенных данных видно, что результаты определения концентрации хлорофилла с использованием предложенной методики «in situ» и экстракционным методом совпадают в пределах погрешности 30 – 40 %. Эту точность можно считать вполне удовлетворительной, так как она находится в пределах разброса результатов, даваемых разными экстракционными методами. Следует отметить, что одномодальное распределение зависимости $C_{\text{хл}}(H)$ отвечает часто встречающейся в Черном море ситуации, когда в оптимальной для обитания фитопланктона зоне, с одной стороны, имеется достаточно высокая солнечная освещенность, а с другой – достаточно высокая концентрация биогенных элементов, диффундирующих через слой скачка плотности из глубинных слоев [2].

Существенно, что на основании предложенного метода удастся также описать резкую суточную зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла в приповерхностной зоне Черного моря, которую трудно объяснить столь быстрым ростом продукции фитопланктона. Согласно полученным результатам, основной причиной этого явления является изменение под действием солнечной освещенности концентрации хлорофилла в хлоропластах клеток фитопланктона, приводящее к изменению величины фактора $Q_{\text{отн}}^*$. Что касается фотозащитных пигментов и квантового выхода интенсивности флуоресценции, то при существовавших освещенностях их влияние на $I_{\text{вкл}}(H)$ имеет противоположный характер и взаимоскомпенсированно.

Экспрессное определение первичной продукции

Оценим величину сезонного изменения скорости фотосинтеза первичной продукции dQ_c/dt , учитывая, что она пропорциональна количеству поглощенной в единицу времени фотосинтетической световой энергии и квантовому выходу фотосинтеза η_c :

$$\frac{dQ_c}{dt} \sim \eta_c Q_a N S \exp(-D_{\lambda_1}) E, \quad (8)$$

где E – поток солнечного излучения; $I_{\text{хл}}$ – интенсивность флуоресценции хлорофилла; D_{λ_1} – оптическая плотность фотозащитных пигментов в клетке на длине волны λ_1 ; Q_a – фактор эффективности поглощения частицы; N – число клеток; S – площадь сечения клетки.

Тогда на основании (4) и (8) получим соотношение величин dQ_c/dt в различные месяцы «1» и «2»:

$$\frac{[dQ_c/dt]_1}{[dQ_c/dt]_2} = \frac{I_{\text{хл}1} Q_{a1} Q^{(2)}}{I_{\text{хл}2} Q_{a2} Q^{(1)}} \cdot \frac{\eta_{в2} \eta_{с1} E_1}{\eta_{в1} \eta_{с2} E_2}. \quad (9)$$

Учтем в (9) изменение квантового выхода флуоресценции хлорофилла $\eta_{в}$ и квантового выхода фотосинтеза при изменении освещенности. Связь между $\eta_{с}$ и $\eta_{в}$ имеет вид $\eta_{с} = 1 - \eta_{п} - \eta_{в}$, где $\eta_{п}$ вызвано температурными и другими потерями. Оценим сезонное изменение скорости фотосинтеза в условиях нитратного стресса, характерного для стационарного состояния численности клеток ФП. Имеем в виду, что основной вклад в неё вносит приповерхностный слой морской воды при высокой освещенности. В этих условиях концентрация хлорофилла в клетках низка и Q примерно равно $Q^{(1)}$, а зависимость $\eta_{в}(E)$ в пределах погрешности 30% можно не рассматривать. Кроме того, учтём, что относительное изменение $\eta_{с}$ за счёт нитратного стресса примерно в 3 раза больше, чем измерение $\eta_{в}$. Имеем в виду, что при концентрации нитратов $C_N = 0$ квантовый выход фотосинтеза $\eta_{с} = 0$. Тогда, полагая зависимость $\eta_{с}(C_N)$ в области малых C_N линейной, на основании формулы (9) получим соотношение между интегральными по глубине H величинами $[dQ_c/dt]_{\text{инт}}$:

$$\frac{[dQ_c/dt]_{\text{инт}1}}{[dQ_c/dt]_{\text{инт}2}} = \frac{\int_0^{H_0} I_{\text{хл}}(H) E_1(H) C_{N1}(H) dH}{\int_0^{H_0} I_{\text{хл}}(H) E_2(H) C_{N2}(H) dH}, \quad (10)$$

где интегрирование проводится в пределах фотической зоны, нижняя граница которой H_0 .

Соотношение (10), в принципе, позволяет на основании данных о флуоресценции хлорофилла и концентрации питательных веществ в водоеме определить величину первичной продукции. При этом необходимо иметь в виду что интенсивность флуоресценции хлорофилла может быть определена дистанционно с помощью флуориметрических лидаров. Что касается концентрации растворенных питательных веществ, то возможны варианты применения безэкстракционных, в том числе дистанционных методов их определения. Один из способов дистанционного определения соотношения концентраций биогенных элементов $C_{N1}(H)/C_{N2}(H)$, входящего в (10), заключается в непосредственном измерении интенсивности флуоресценции растворенного органического вещества (РОВ)

$I(H)$ ввиду выполнения соотношения $C_{N1}(H)/C_{N2}(H) \approx I_1(H)/I_2(H)$, обусловленного корреляцией между $C_N(H)$ и $I(H)$ [2]. На рис.3 приведены усредненные экспериментальные данные о сезонной зависимости первичной продукции dQ_c/dt [4]. Там же представлена сезонная зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла $I_{\text{вкл}}$.

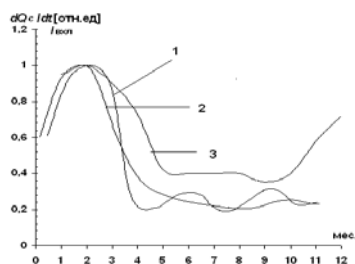


Рис 3. Сезонная зависимость первичной продукции и интенсивность флуоресценции хлорофилла в восточной части Черного моря: 1 – усредненные экспериментальные данные [4]; 2 – теоретические данные полученные, на основании (10); 3 – интенсивность флуоресценции хлорофилла $I_{\text{вкл}}$ в фитопланктоне

Из сравнения приведенных данных видно, что наблюдается значительное расхождение зависимостей dQ_c/dt и $I_{\text{вкл}}$. Особенно оно заметно в осенне-зимний период. Эти зависимости согласуются (при нормировании их по максимуму) при уровне значимости всего 35%. Кривая 2 на рис.3 представляет сезонный ход первичной продукции, полученный на основании (10). Видно, что эта зависимость близка к экспериментальным данным и они согласуются при уровне значимости не выше 10%.

В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод о плодотворности использования предложенной оптической модели клетки фитопланктона при решении задач разработки экспрессных безэкстракционных флуориметрических методов количественного определения экологических характеристик акваторий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренко В.М. Молекулярная спектроскопия биологических сред. – М.: Высшая школа, 2004. – 190 с.
2. Карабаев Г.С. Флуоресценция в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 200 с.
3. Сидоренко В.М. Применение оптических спектральных методов исследования в медицине, биологии и экологии. – СПб.: СПбГЭТУ, 2001. – 80 с.
4. Ведерников В. И., Демидов А. Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах черного моря. Океанология. – 1993. – №2. – С. 229–235.

Сидоренко Владимир Михайлович

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

E-mail: vmsidorenko@mail.ru

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5

Телефон:(812) 234-90-71

Sidorenko Vladimir Mihailovich

St.-Petersburg University of Electrical Engineering "LETI"

E-mail: vmsidorenko@mail.ru

5, Professor Popov st., 197376, St.-Petersburg, Russian

Ph.: (812)272-25-22