

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ОЦЕНКИ ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АЛЬГОЦЕНОЗА*

Н.А. Гаевский, Т.Б. Горбанева, В.И. Колмаков**

Предложено преобразование системы трех линейных алгебраических уравнений и уравнения прямых, ограничивающих треугольник, внутри которого расположена область положительных решений. Это позволяет корректировать коэффициенты системы уравнений с целью устранения отрицательных решений; уменьшить количество уравнений в системе до двух, установить достоверность определяемой таксономической структуры альгоценоза.

Возможность дифференциальной оценки концентрации хлорофилла *a* у фитопланктона основана на генетически закрепленных различиях в составе светособирающих фотосинтетических пигментов [1,2]. По крайней мере три таксономические группы могут диагностироваться при регистрации параметров флуоресценции, связанных со спектром ее действия: 1 - Chlorophyta, Prochlorophyta и Euglenaphyta, содержащие хлорофилл *a* и хлорофилл *b*; 2 - Bacillariophyta, Dinophyta и Chrysophyta, содержащие хлорофилл *c* и фукоксантин; 3 - Cyanophyta, содержащие фикобилин.

В области линейной зависимости интенсивности флуоресценции от концентрации хлорофилла *a* и сопутствующих ему пигментов справедливы линейные алгебраические уравнения (1), в которых регистрируемый сигнал флуоресценции фитопланктона представлен как сумма сигналов от клеток водорослей каждой таксономической группы [3,4].

$$\begin{aligned}\Phi_{410} &= \Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Cyan} + \Phi_{410}^{Bac} \\ \Phi_{510} &= \Phi_{510}^{Chl} + \Phi_{510}^{Cyan} + \Phi_{510}^{Bac} \\ \Phi_{540} &= \Phi_{540}^{Chl} + \Phi_{540}^{Cyan} + \Phi_{540}^{Bac}\end{aligned}\quad (1)$$

где верхние индексы характеризуют таксономическую принадлежность флуоресценции, а нижние - максимальную длину волны участка возбуждающего света.

Когда коэффициенты связи флуоресценции с концентрацией хлорофилла *a* (C_a) у каждой таксономической группы ($k = \Phi/C_a$) известны, систему уравнений можно записать как:

$$\begin{aligned}\Phi_{410} &= k_{410}^{Chl} C_a^{Chl} + k_{410}^{Cyan} C_a^{Cyan} + k_{410}^{Bac} C_a^{Bac} \\ \Phi_{510} &= k_{510}^{Chl} C_a^{Chl} + k_{510}^{Cyan} C_a^{Cyan} + k_{510}^{Bac} C_a^{Bac} \\ \Phi_{540} &= k_{540}^{Chl} C_a^{Chl} + k_{540}^{Cyan} C_a^{Cyan} + k_{540}^{Bac} C_a^{Bac}\end{aligned}\quad (2)$$

Решениями этой системы будут концентрации хлорофилла *a* для каждой таксономической группы. На их основе можно рассчитать как общую концентрацию хлорофилла *a* в пробе, так и биомассу клеток водорослей [5,6]. Это делает флуоресцентные методы перспективными в изучении альгоценозов.

От того насколько правильно определены коэффициенты систем уравнений 2, зависит оценка суммарной концентрации хлорофилла *a* и таксономической структуры альгоценоза по характеру распределения хлорофилла *a*. Другим следствием неправильно заданных коэффициентов будут решения, при которых концентрация хлорофилла *a*, принадлежащая таксономической группе водорослей, выражается отрицательным числом. В этом случае, а также в случае значительных отклонений результатов флуоресцентного анализа от результатов спектрофотометрического определения общей концентрации хлорофилла *a* или результатов оценки биомассы клеток у видов водорослей трех указанных таксономических групп необходим анализ системы линейных уравнений и последующая коррекция коэффициентов в пределах допустимых дисперсий.

Одним из путей решения этой проблемы может стать графическое представление информации или визуализация возможных вариантов решений.

Методика

В состав изученных альгоценозов входили водоросли девяти отделов: Bacillariophyta, Chlorophyta, Chrysophyta, Cryptophyta, Cyanophyta, Dinophyta, Euglenaphyta, Rhodophyta, Xanthophyta).

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ и фонда CRDF (США) грант REC002иНОЦ «Енисей».

** © Н.А. Гаевский, Т.Б. Горбанева, В.И. Колмаков, Красноярский государственный университет, 2003

Отдельные виды и пробы природного фитопланктона культивировали на минеральных средах либо на природных, естественных для фитопланктона, водах. Отбор проб природного фитопланктона проводили с помощью батометров конструкции Молчанова или Рутнера.

При проведении исследований был использован однолучевой флуориметр ФЛ3003 (КГУ, НПП «Тест») с немодулированным возбуждающим световым потоком. Спектральные области возбуждающего света 1 - $\lambda(\text{макс})$ – 410 нм (синий); 2 - $\lambda(\text{макс})$ – 510 нм (сине-зеленый); 3 - $\lambda(\text{макс})$ - 540 нм (зеленый). Область регистрации флуоресценции >680 нм. Объем кюветы 10 и 30 мл постоянное перемешивание суспензии. Чувствительность по хлорофиллу *a* водорослей - 0.5 мкг/л. Источник возбуждающего света - галогенная лампа КГМ9-70.

Эпифлуоресценцию ($\lambda_{\text{пер}} = 685$ нм) от отдельных клеток регистрировали с помощью фотометрической насадки ФМЕЛ (ЛОМО), установленной на люминесцентный микроскоп ЛЮМАМ-И (ЛОМО). При увеличении микроскопа (40г10) и полевой диафрагме фотометрической насадки – «0.5» диаметр поля регистрации флуоресценции составлял 15 мкм.

Выходы флуоресценции при различных длинах волн возбуждающего света выравнивали по количеству падающих квантов, нормируя их на флуоресценцию красного оптического стекла КС-15.

Для ингибирования фотосинтетического электронного транспорта использовали диурон (N-3,4-дихлорофенил-N,N-диметилмочевина) в концентрации 10^{-5} М. Чистые сигналы флуоресценции клеток фитопланктона определяли как разность нормированных сигналов пробы фитопланктона и фильтра.

Результаты и обсуждение

Коэффициенты линейных уравнений, или удельные выходы флуоресценции, были определены экспериментально при изучении лабораторных культур водорослей, а также природных альгоценозов при массовых вспышках отдельных видов. Результаты работы [4] подтвердили таксономическую специфику удельных выходов и одновременно выявили заметную дисперсию их величин внутри каждой таксономической группы. Таксономические различия особенно заметны при рассмотрении отношений удельных выходов, дисперсия которых оказалась достоверно меньше дисперсии их абсолютных значений.

На основе отношений удельных выходов могут быть составлены три новые система линейных алгебраических уравнений в зависимости от выбора длины волны возбуждающего флуоресценцию света. При выборе рабочей системы можно ориентироваться на величину ее главного определителя, отдавая предпочтение варианту, для которого абсолютное значение этого параметра больше. Часто используют удельный выход флуоресценции в синей области возбуждающего света, так как он преимущественно поглощается хлорофиллом *a*. В результате нормирования система уравнений 2 приобретает вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{410} &= \Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Cyan} + \Phi_{410}^{Bac} \\ \Phi_{510} &= k_{510}^{Chl} / k_{410}^{Chl} \times \Phi_{410}^{Chl} + k_{510}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan} \times \Phi_{410}^{Cyan} + k_{510}^{Bac} / k_{410}^{Bac} \times \Phi_{410}^{Bac} \\ \Phi_{540} &= k_{540}^{Chl} / k_{410}^{Chl} \times \Phi_{410}^{Chl} + k_{540}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan} \times \Phi_{410}^{Cyan} + k_{540}^{Bac} / k_{410}^{Bac} \times \Phi_{410}^{Bac} \end{aligned} \quad (3)$$

Ее решениями являются величины сигналов флуоресценции сине-зеленых Φ_{410}^{Cyan} , зеленых Φ_{410}^{Chl} и диатомовых Φ_{410}^{Bac} водорослей, которые характеризуют таксономическую структуру альгоценоза. При известных удельных выходах также могут быть рассчитаны соответствующие значения концентраций хлорофилла *a*:

$$C_a^{Chl} = \frac{1}{k_{410}^{Chl}} \Phi_{410}^{Chl}; C_a^{Cyan} = \frac{1}{k_{410}^{Cyan}} \Phi_{410}^{Cyan}; C_a^{Bac} = \frac{1}{k_{410}^{Bac}} \Phi_{410}^{Bac}. \quad (4)$$

Для одной культуры или для одной клетки водоросли с одинаковым содержанием хлорофилла *a* отношение удельных выходов равно отношению соответствующих сигналов флуоресценции. Поэтому необходимые для составления системы линейных уравнений 3 коэффициенты с успехом могут быть определены с помощью эпифлуоресцентного анализа при изучении отдельных клеток водорослей, взятых непосредственно из водоема [7]. Преимущества этого подхода очевидны, поскольку исчезает необходимость в чистых культурах водорослей, количество доступных для анализа видов ограничивается только их распространением в альгоценозе, а флуоресцентные показатели отражают состояние пигментного аппарата, сформировавшегося в естественных условиях минерального питания и освещения.

Ниже рассмотрен пример двумерной визуализации системы линейных алгебраических уравнений (3). Для того чтобы сумма решений равнялась единице ($\Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Cyan} + \Phi_{410}^{Bac} = 1$), а слагаемые представляли собой доли от общего сигнала флуоресценции, необходимо абсолютные значения интенсивностей флуоресценции фитопланктона Φ_{410} , Φ_{510} и Φ_{540} , возбуждаемой тремя спектральными участками света, заменить их относительными величинами ($\Phi_{410}^{Chl} / \Phi_{410}$, $\Phi_{510}^{Chl} / \Phi_{410}$, $\Phi_{540}^{Chl} / \Phi_{410}$, $\Phi_{410}^{Cyan} / \Phi_{410}$, $\Phi_{510}^{Cyan} / \Phi_{410}$, $\Phi_{540}^{Cyan} / \Phi_{410}$, $\Phi_{410}^{Bac} / \Phi_{410}$, $\Phi_{510}^{Bac} / \Phi_{410}$, $\Phi_{540}^{Bac} / \Phi_{410}$):

$$\begin{aligned}
 1 &= \Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Cyan} + \Phi_{410}^{Bac} \\
 \Phi_{510} / \Phi_{410} &= k_{510}^{Chl} / k_{410}^{Chl} \times \Phi_{410}^{Chl} + k_{510}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan} \times \Phi_{410}^{Cyan} + k_{510}^{Bac} / k_{410}^{Bac} \times \Phi_{410}^{Bac} \\
 \Phi_{540} / \Phi_{410} &= k_{540}^{Chl} / k_{410}^{Chl} \times \Phi_{410}^{Chl} + k_{540}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan} \times \Phi_{410}^{Cyan} + k_{540}^{Bac} / k_{410}^{Bac} \times \Phi_{410}^{Bac}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Все решения этой системы линейных алгебраических уравнений положительны, когда величины отношений сигналов флуоресценции Φ_{510} / Φ_{410} и Φ_{540} / Φ_{410} у изучаемой пробы фитопланктона лежат на сторонах или внутри треугольника "Chl-Суан-Вас" (рис. 1). Следует отметить, что площадь самого треугольника равна половине величины главного определителя системы 5. Координаты вершин треугольника соответствуют значениям коэффициентов системы уравнений 5, относящихся к одной таксономической группе водорослей:

вершина "Chl" - $X^{Chl} = k_{510}^{Chl} / k_{410}^{Chl}; Y^{Chl} = k_{540}^{Chl} / k_{410}^{Chl}$;
 вершина "Суан" - $X^{Cyan} = k_{510}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan}; Y^{Cyan} = k_{540}^{Cyan} / k_{410}^{Cyan}$;
 вершина "Вас" - $[X^{Bac} = k_{510}^{Bac} / k_{410}^{Bac}; Y^{Bac} = k_{540}^{Bac} / k_{410}^{Bac}]$.

В случае, когда отношения сигналов флуоресценции фитопланктона равны коэффициентам системы по одному из трех столбцов, весь зарегистрированный сигнал флуоресценции принадлежит соответствующему отделу водорослей. Например, при $\Phi_{510} / \Phi_{410} = k_{510}^{Chl} / k_{410}^{Chl}$ и $\Phi_{540} / \Phi_{410} = k_{540}^{Chl} / k_{410}^{Chl}$ в результате решения системы уравнений получим - $\Phi_{410}^{Chl} = 1; \Phi_{410}^{Cyan} = 0; \Phi_{410}^{Bac} = 0$.

На прямой, соединяющей точки "Chl" и "Суан", располагаются значения Φ_{510} / Φ_{410} и Φ_{540} / Φ_{410} , при которых решениями системы будут $\Phi_{410}^{Bac} = 0, \Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Cyan} = 1$. Уравнение прямой, проходящей через вершины треугольника "Chl" и "Суан", выглядит как

$$Y_{Bac}^{(0)} = \frac{(y_{Cyan} - y_{Ch})}{(x_{Cyan} - x_{Ch})} \times X_{Bac}^{(0)} + [y_{Ch} - x_{Ch} \times \frac{(y_{Cyan} - y_{Ch})}{(x_{Cyan} - x_{Ch})}]$$

На двух других прямых, соединяющей точки "Chl"-“Вас” и “Суан”-“Вас”:

$$Y_{Cyan}^{(0)} = \frac{(y_{Bac} - y_{Ch})}{(x_{Bac} - x_{Ch})} \times X_{Cyan}^{(0)} + y_{Ch} - x_{Ch} \times \frac{(y_{Bac} - y_{Ch})}{(x_{Bac} - x_{Ch})}$$

$$Y_{Bac}^{(0)} = \frac{(y_{Cyan} - y_{Ch})}{(x_{Cyan} - x_{Ch})} \times X_{Bac}^{(0)} + y_{Ch} - x_{Ch} \times \frac{(y_{Cyan} - y_{Ch})}{(x_{Cyan} - x_{Ch})}$$

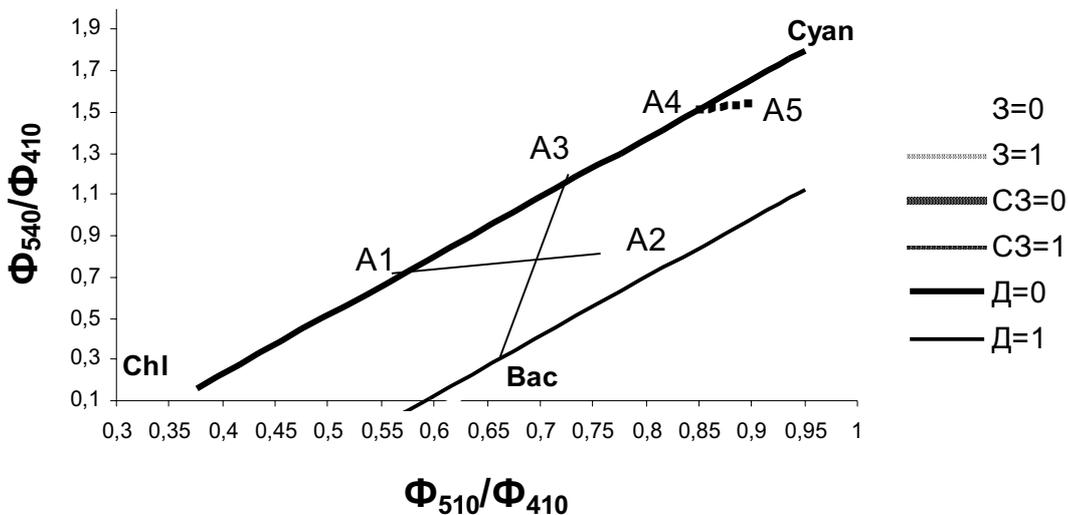


Рис. 1. Взаимодействие коэффициентов системы линейных уравнений (5) для таксономической дифференциации флуоресценции альгоценоза, представленного водорослями трех отделов Chlorophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta

располагаются значения отношения сигналов флуоресценции, при которых решения имеют вид: $\Phi_{410}^{Cyan} = 0$, $\Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Bac} = 1$ и $\Phi_{410}^{Chl} = 0$, $\Phi_{410}^{Cyan} + \Phi_{410}^{Bac} = 1$.

Отрезок прямой внутри рассматриваемого треугольника параллельный стороне "Chl - Bac", (например, A_1A_2 рис.1) задает значения отношений Φ_{510}/Φ_{410} и Φ_{540}/Φ_{410} , при которых решение для Φ_{410}^{Cyan} постоянно, а решения Φ_{410}^{Bac} и Φ_{410}^{Chl} изменяются в противофазе в интервале значений $[0, 1 - \Phi_{410}^{Cyan}]$. Соответственно, неизменные решения Φ_{410}^{Bac} и Φ_{410}^{Chl} задаются отношениями Φ_{510}/Φ_{410} и Φ_{540}/Φ_{410} , лежащими на отрезках прямых параллельных сторонам "Chl-Cyan" и "Bac-Cyan".

На отрезке прямой, соединяющем вершину треугольника и точку на противоположной стороне треугольника (например, "Bac"- A_3), решение для сигнала флуоресценции (в нашем случае Φ_{410}^{Bac}) изменяется от 1 до 0, а величины двух остальных сигналов (Φ_{410}^{Cyan} и Φ_{410}^{Chl}) делят оставшуюся часть флуоресценции $(1 - \Phi_{410}^{Bac})$ между собой в пропорции, равной отношению длин отрезков ("Cyan"- A_3):("Chl"- A_3).

Наконец, в точке пересечения биссектрис треугольника находятся значения Φ_{510}/Φ_{410} и Φ_{540}/Φ_{410} , для которых $\Phi_{410}^{Cyan} = \Phi_{410}^{Chl} = \Phi_{410}^{Bac} = 0.333$.

Координаты точек на прямых, проходящих через вершину треугольника параллельно противоположной стороне, при подстановке в систему уравнений (3) дают решения, одно из которых равно единице, а два других противоположны по знаку и равны по модулю.

Визуализация решения относительно треугольных координат и вершин треугольника позволяет оценить достоверность разделения сигнала флуоресценции на таксономические составляющие. Когда сигнал, принадлежащий одной таксономической группе, доминирует и анализируемая точка находится вблизи вершины треугольника, распределение сигнала между двумя остальными группами становится недостоверным. Для иллюстрации этого на рис.1 показан отрезок A_4A_5 , задающий значения коэффициентов системы уравнений (3), при которых $\Phi_{410}^{Cyan} = 0.9$, а $\Phi_{410}^{Chl} + \Phi_{410}^{Bac} = 0.1$. В точке A_4 $\Phi_{410}^{Chl} = 0.1, \Phi_{410}^{Bac} = 0$. В точке A_5 , наоборот, $\Phi_{410}^{Chl} = 0, \Phi_{410}^{Bac} = 0.1$. При этом различия координат точек $A_4=0.85$ и $A_5=0.90$ по шкале абсцисс не превышают 5.6% и вполне могут возникнуть за счет погрешности измерений. По-видимому, именно относительная погрешность измерений позволяет внутри треугольника «Chl-Cyan-Bac» определить координаты вершин другого треугольника, задающего область достоверной оценки таксономической структуры сигнала флуоресценции.

Возможные различия координат вершин треугольника, задающего область положительных решений системы линейных алгебраических уравнений, и влияющих на окончательную оценку таксономической структуры альгоценоза, показаны на рис. 2. Каждый из представленных вариантов треугольников, соответствует выбранной спектральной области возбуждающего света для сигнала флуоресценции, по которому осуществлялось нормирование. Координаты вершин во всех случаях заданы средними значениями отношений сигналов эпифлуоресценции у клеток водорослей одного из отделов.

Определение площадей треугольников, построенных на основе средних величин отношений координаты показало, что главный определитель имел наименьшее значение (0.16) при нормировании на значения Φ_{410} , наибольшее (1.42) - при нормировании на значения Φ_{540} , промежуточное (1.11) - при нормировании на Φ_{510} . Несмотря на то, что в последнем варианте величина главного определителя системы не была самой большой, мы отдали ему предпочтение, так как по форме треугольник (рис. 2-Б) был ближе к равностороннему.

Визуально коррекция коэффициентов системы линейных уравнений (3) или (5), выражается в изменении положения вершин треугольника, что сопровождается изменением положения каждой точки относительно вершин и сторон треугольника и равносильно изменению распределения сигнала флуоресценции между тремя таксономическими группами водорослей. Нанесение на график новой точки, координаты которой были получены при изучении удельных выходов флуоресценции у отдельных клеток или у клеток в составе альгоценоза, позволяет визуально оценить таксономическую принадлежность клетки или таксономическую структуру альгоценоза.

На рис. 3 показаны отношения сигналов флуоресценции, зарегистрированные в 39 пробах фитопланктона озера Ши́ра с различных горизонтов (июнь - июль 1999 г.). Видно, что все точки расположены вдоль линии, на которую также попадают значения отношений удельных выходов сине-зеленых ($\Phi_{410}/\Phi_{510} = 0,575$, $\Phi_{540}/\Phi_{510} = 2,221$) и зеленых ($\Phi_{410}/\Phi_{510} = 1,87$, $\Phi_{540}/\Phi_{510} = 0,500$) водорослей, установленные при регистрации эпифлуоресценции у отдельных клеток фитопланктона. Из рассмотренных выше свойств используемого для визуализации треугольника следует, что точки, расположенные на его стороне, соответствуют состоянию системы, в котором доля одного из трех компонентов равнялась нулю. В случае с фитопланктоном озера Ши́ра близким к нулю был сигнал флуоресценции диатомовых водорослей.

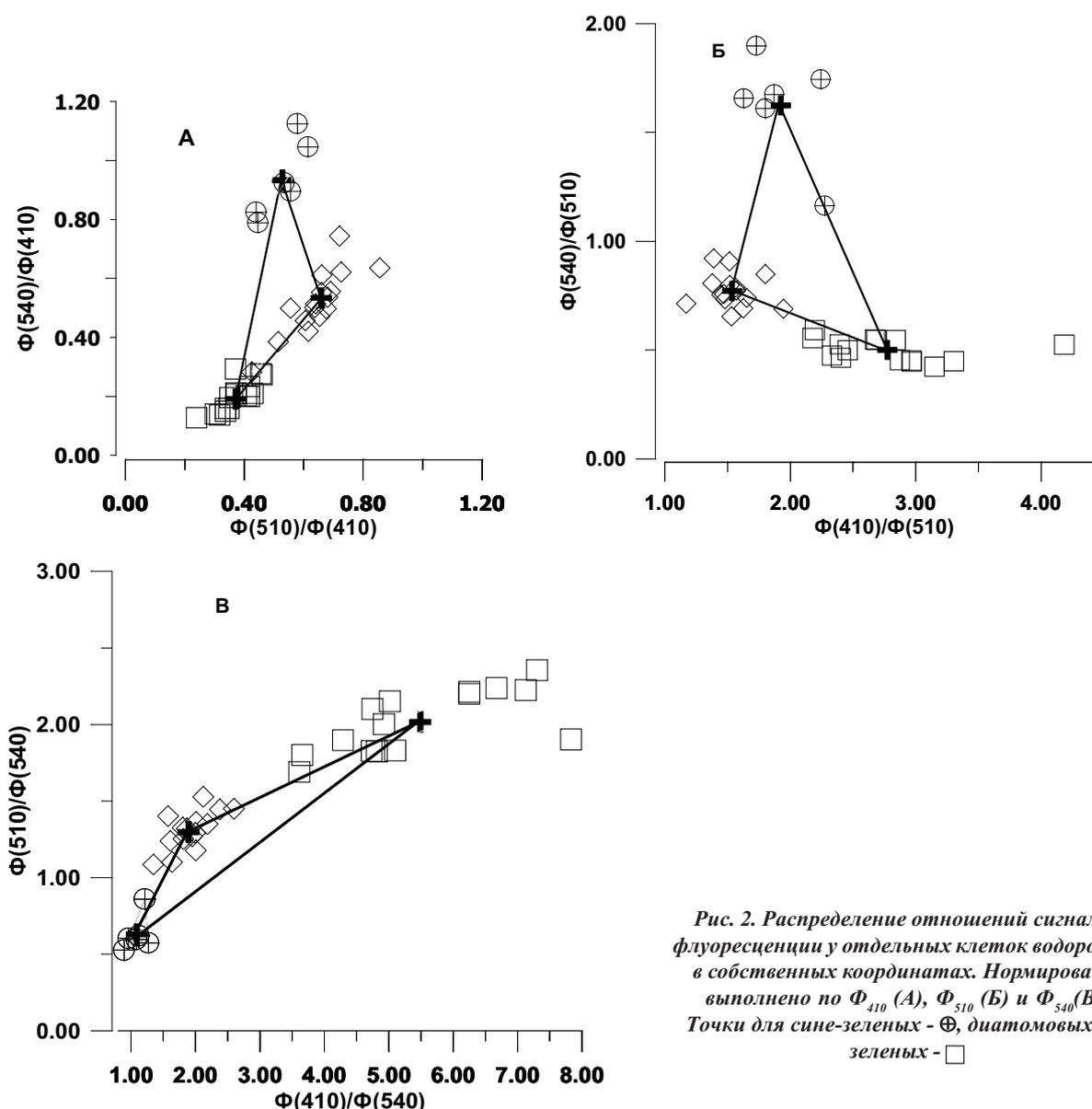


Рис. 2. Распределение отношений сигналов флуоресценции у отдельных клеток водорослей в собственных координатах. Нормирование выполнено по Φ_{410} (А), Φ_{510} (Б) и Φ_{540} (В). Точки для сине-зеленых - \oplus , диатомовых - \diamond , зеленых - \square

Это позволило сократить количество линейных алгебраических уравнений в системе до двух и исключить отрицательные решения, корректно определив координаты точек «сз» и «з» (рис.3).

С точки зрения мониторинга наиболее важно изучение временных структур сообщества водорослей. Временные структуры сообщества существуют и проявляются наиболее ярко во временном масштабе сезонной сукцессии [8]. Для альгоценоза, структуру которого определяют три отдела водорослей, графическое представление сукцессии возможно основе изменения дифференцированных по отделам долей флуоресценции или биомассы водорослей.

В системе треугольных координат долевой состав биомассы или флуоресценции может быть определен положением точки относительно вершин равностороннего треугольника. На рис. 4 показан треугольник NPO, стороны которого равны единице. Координаты его вершин $x_1=0, y_1=0; x_2=1, y_2=0; x_3=0.5, y_3 = \sqrt{0.75}$. Координаты точки, характеризующей долевой вклад трех компонент N, P и O, задаются выражениями:

$$X = o + \frac{p}{2}; Y = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot p,$$

где o – вклад компоненты O, p – вклад компоненты P. Вклад компоненты N равен $n=1-o-p$. Нетрудно показать, что координаты вершин треугольника соответствуют наличию только одного компонента, доля которого равна единице.

Сопоставление графических картин, полученных на основе долей биомассы и долей флуоресценции, у одного альгоценоза позволяет контролировать адекватность флуоресцентной оценки таксономической структуры,

дополняя результаты статистического анализа при оценке связи между биомассой и флуоресценцией в каждом отделе водорослей, а также характер сукцессии альгоценоза.

В качестве примера на рис. 5 приведена динамика структуры альгоценоза пруда Бугач (г. Красноярск) в слое «поверхность – 3 м» в период с мая по сентябрь 1999 г. При еженедельных наблюдениях структура альгоценоза изменилась от доминирования диатомовых к доминированию сине-зеленых водорослей. Траектория сукцессии прошла через середину треугольника, когда в альгоценозе в равной пропорции были представлены все три отдела водорослей. В отличие от биомассы, флуоресценция показала присутствие в альгоценозе определенной доли зеленых и диатомовых водорослей даже в период цветения сине-зеленых водорослей. Одна из причин расхождения траекторий - это различия отношения флуоресценция /биомасса у водорослей разных отделов. Другая причина – в определении биомассы клеток водорослей, которые не являются доминантами в условиях интенсивного цветения сине-зеленых водорослей. Третья – в изменении средних флуоресцентных характеристик у водорослей определенного отдела при смене видового состава или в ответ на изменение внешних условий.

Визуализация или размещение величин отношений сигналов флуоресценции в координатах самих отношений позволяет:

- установить необходимость коррекции системы линейных уравнений с целью устранения отрицательных решений;
- определить возможность обнуления отрицательных решений в случаях, когда точка находится вблизи стороны треугольника;

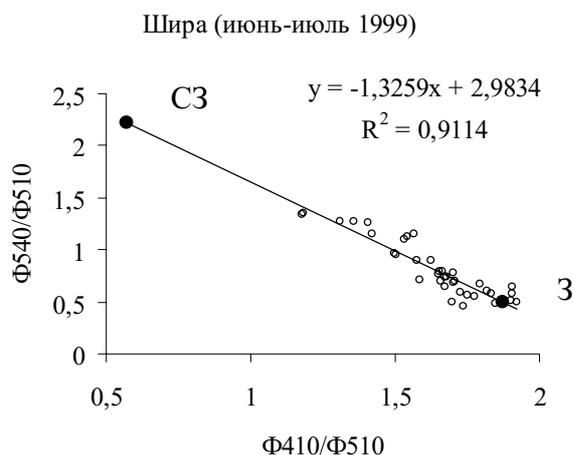


Рис. 3. Распределение отношений удельных выходов флуоресценции фитопланктона озера Ширы. Темные кружки – отношения удельных выходов сине-зеленых (СЗ) и зеленых (З) водорослей

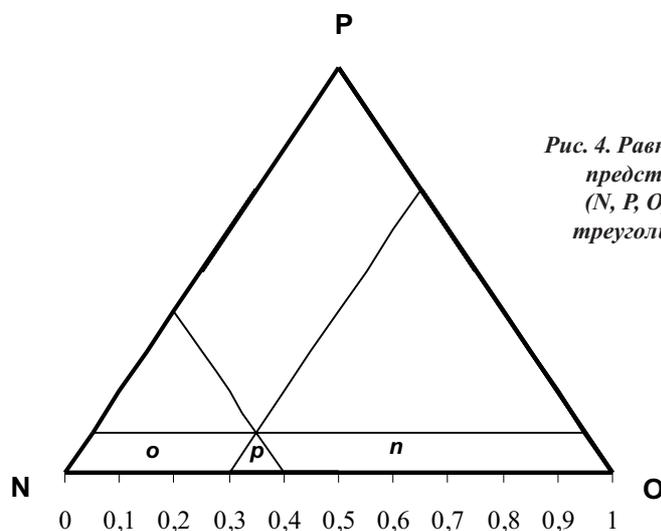


Рис. 4. Равносторонний треугольник как элемент графического представления долевого состава смеси трех компонент (N, P, O). Точка, лежащая на пересечении линий внутри треугольника, соответствует смеси, в которой доля N (n) равна 0.6, доля P (p) – 0.1, доля O (o) – 0.3

- уменьшить количество линейных алгебраических уравнений до двух в случае, когда точки располагаются вдоль одной из сторон треугольника или до одного уравнения, когда точки собраны у вершины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Durnford D.G., Deane J.A., Tan S., McFadden G.I., Gantt E., Green B.R. A phylogenetic assessment of the eukaryotic light-harvesting antenna proteins, with implications for plastid evolution. // J Mol Evol.- 1999. - V.48. No. 1. - P.59-68.
2. Green B.R. Was "molecular opportunism" a factor in the evolution of different photosynthetic light-harvesting pigment system? // Proc. Nat. Acad. Sci.- 2001. V.98.- N.5.- P.2119-2121.
3. Гаевский Н.А., Шатров И.Ю., Гольд В.М., Попельницкий В.А. Изучение флуоресцентных характеристик у некоторых представителей Chlorophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta // Экологические исследования водоемов Красноярского края. – Красноярск.- 1983. С.84-95.
4. Гольд В.М., Гаевский Н.А., Шатров И.Ю., Попельницкий В.А., Рыбцов С.А. Опыт использования флуоресценции для дифференциальной оценки содержания хлорофилла *a* у планктонных водорослей // Гидробиол. журн. – 1986.- Т. 22. - N.3.- С. 80 –85.

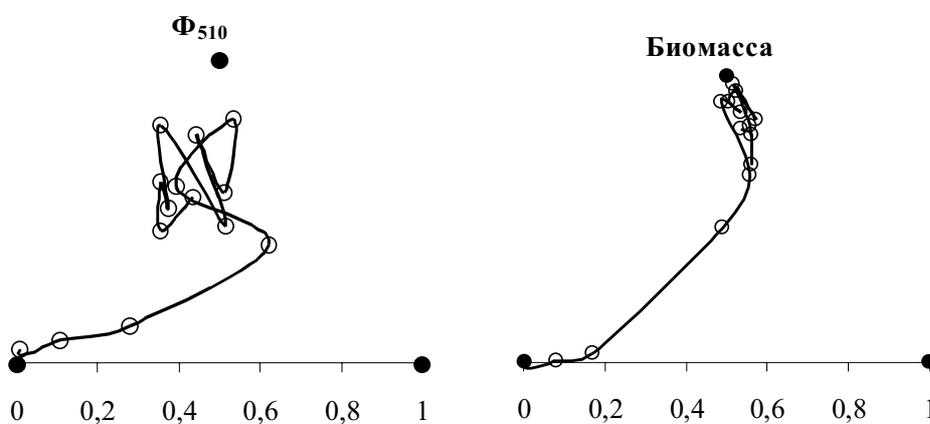


Рис. 5. Временная структура альгоценоза пруда Бугач (слой 0 – 3 м, май – сентябрь 1999 г).
 Слева - в долях сигнала флуоресценции зеленых, диатомовых и сине-зеленых водорослей, возбуждаемой светом с максимумом при 510 нм; справа – в соответствующих долях биомассы. Координаты вершин, соответствующих отделов: *Bacillariophyta* (0,0), *Chlorophyta* (1,0), *Cyanophyta* (0.5, $\sqrt{0.75}$)

5. Бульон В.В., Никулина В.Н. Роль фитопланктона в процессах самоочищения в водотоках // Гидробиологические основы самоочищения вод.- Л., - 1976. - С.15-24.
6. Медведь В.О. Взаимосвязь между хлорофиллом и биомассой водорослей // Укр. ботанич. журн. - 1985.- Т.42.- №2.- С.113 – 115.
7. Горбанева Т.Б., Гаевский Н.А. Оценка состояния микроводорослей - естественной кормовой базы водоемов // Проблемы и перспективы рационального использования рыбных ресурсов Сибири / Отв. ред. проф. В.Н.Лопатин. - Красноярск, 1999.- С.290-295.
8. Михайловский Г.Е., Ловягин С.Н. Временная структура планктонного сообщества, ее графовое представление и мониторинг // Научные основы биомониторинга пресноводных экосистем. Тр. сов. франц. симпоз. Астрахань, СССР, 9-12 сентября 1985 г. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. - С.51- 62.

VISUALIZATION OF ALGORITHM OF A FLUORESCENT ESTIMATION TAXONOMIC STRUCTURE OF ALGACENOSIS

N.A. Gaevsky, T.B.Gorbaneva, V.I. Kolmakov

The transformation of system of three linear algebraic equations and equations of straight lines limiting a triangle is offered inside which the area of the positive decisions is located. It allows to correct factors of this equations system with the purpose of elimination of the negative decisions; to reduce amount of the equations in system up to two, to establish reliability determined taxonomic structure of algacenosiss.