

## Подбор оптимальных характеристик спектра интенсивности барабанного альгофильтра на основе итерационных методов обработки

*Д.В. Дементьев<sup>1</sup>, П.А. Семёнов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева

<sup>2</sup> Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»

**Аннотация:** В работе рассматривается модель барабанного альгофильтра на основе макроводоросли *Caulerpa prolifera*. Получены оптимальные характеристики освещения, наиболее подходящие данной водоросли в системе очистки морской воды. Установлены параметры освещения, минимизирующие рост нежелательных цианобактерий, а также предложено использование алгоритмов обработки оптических изображений для получения освещения с заданным распределением интенсивности.

**Ключевые слова:** заданные распределения интенсивности, алгоритм Гершберга-Сэкстона, альгофильтр, спектр поглощения, Каулерпа, аквакультура, aquaculture, *Caulerpa*, algofiltre.

За последние годы, многочисленные исследования влияния излучения на растительные организмы [1-4] показали перспективность использования таких методов для задач очистки воды морских замкнутых систем. В настоящее время, разрабатываются перспективные конфигурации фильтров, на основе различных видов водорослей [5, 6]. При этом подавляющее большинство систем растительных фильтров освещаются искусственно, а проблема выбора оптимального источника изучения до конца не решена. Именно поэтому вопросу освещения, его интенсивности и спектральному составу необходимо уделить особое внимание.

Основным структурным элементом фотосинтеза являются пигменты: хлорофилл, каротиноиды и фикоблисомы. Пик поглощения волн длиной 650-700нм (красный спектр), является пиком поглощения хлорофилла. Каротиноиды, также называемые вспомогательными пигментами, используют волны длиной 400-500 нм (синий спектр) и переносят энергию возбуждения к хлорофиллу, делая фотосинтез эффективным на более широком интервале длин волн [7].

В условиях выращивания растений в водной среде становится актуальным вопрос оптимизации параметров источника излучения альгофилтра, так как нежелательные в водных системах сине-зелёные водоросли, или цианобактерии (*Cyanobacteria*), в отличие от культивируемых зеленых растений имеют особый вид пигментов – фикоблисомы, воспринимающие желто-оранжевый свет (длина волны 600-650нм), и свет дневного спектра даст им преимущество перед зелёными водорослями.

В настоящей работе получены оптимальные характеристики освещения, наиболее подходящие водоросли *Caulerpa prolifera* в системе очистки морской воды, установлены характеристики освещения, удовлетворяющие потребностям культивируемой водоросли, минимизирующие при этом рост нежелательных цианобактерий, а также предложено использование алгоритмов адаптивного изменения параметров излучения в целях создания освещения с определённым распределением интенсивности.

### **Определение оптимального спектра излучения**

Для определения оптимального спектра излучения, из выращенных в условиях фитофилтра образцов водоросли была получена спиртовая вытяжка пигментов [8], которая, затем была исследована на спектрофотометре ПЭ-5400. Аналогичным образом была подготовлена вытяжка пигментов цианобактерий. На рис.1 представлены полученные в ходе эксперимента зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  (выраженного в процентах от максимального значения на спектрофотометре) от длины волны излучения.

Как видно из графика, оба фотосинтетика имеют два пика поглощения: У каулерпы это 340 и 660нм, а у цианобактерий - 430 и те же 660нм. При этом в обоих случаях эффективность поглощения света синего спектра выше почти в 2 раза, по сравнению с красным.

---

Интересно отметить, что при некоторой вариабельности значения поглощения по пяти пробам (коэффициент вариации не превышал 25%), пики поглощения каждого вида приходили строго на одно значение длины волны (+/- 10нм).

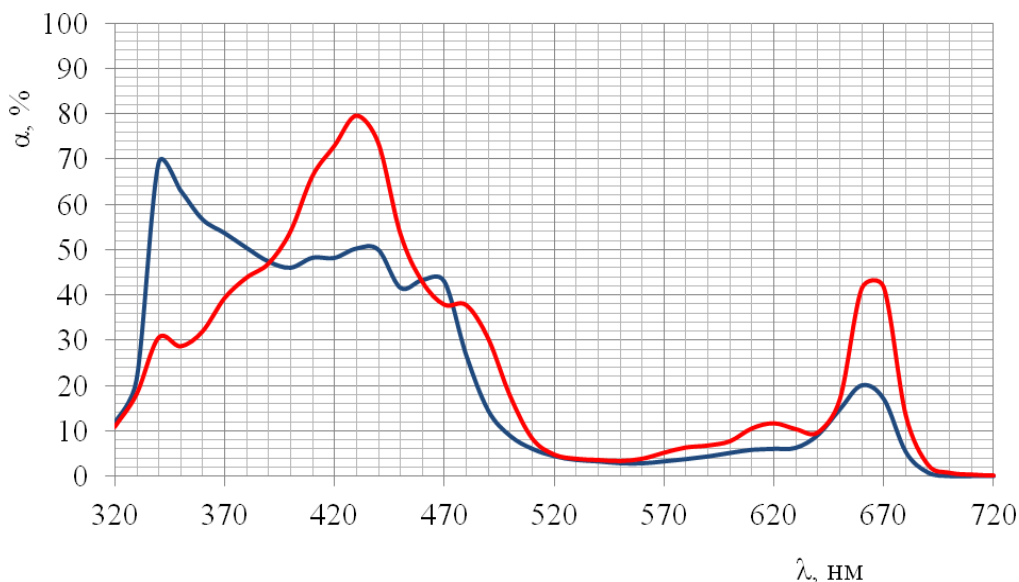


Рис. 1. – Спектры поглощения исследуемых материалов (синяя кривая - *Caulerpa prolifera*; красная кривая - *Cyanobacteria sp.*)

Приведенный спектр поглощения, обозначенный синим цветом, отражает идеальный спектр источника излучения для роста водоросли *Caulerpa prolifera*. Причем пик поглощения приходится на 340нм, который находится в ультрафиолетовой части спектра. Имея данные по нежелательным цианобактериям, мы можем выделить ту часть спектра, которая благоприятна для культивируемой водоросли, и в то же время не способствовала росту цианобактерий. Для этого была использована следующая формула:

$$H = (1 - A_{bact}) \cdot A_{alg} , \quad (1)$$

где  $A_{alg}$  – коэффициент поглощения водоросли;  $A_{bact}$  – коэффициент поглощения цианобактерии;  $H$  – коэффициент эффективности поглощения водоросли *Caulerpa prolifera* с учетом спектра поглощения цианобактерий.

Применив эту формулу к данным первого графика, мы можем определить наиболее подходящие длины волн для проектирования источника освещения альгофильтра (рис. 2.)

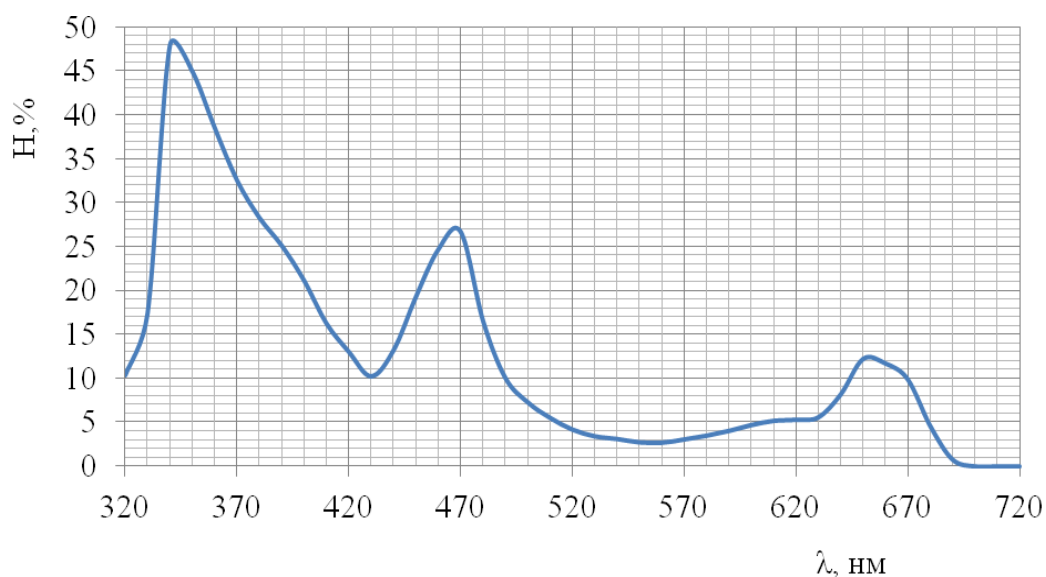


Рис. 2. – Спектр поглощения *Caulerpa prolifera* с учетом спектра поглощения *Cyanobacteria* sp.

Данный график показывает, что для освещения водоросли вида *Caulerpa prolifera*, необходим свет с длинами волн 340, 470 и 660 нм. Одновременно с хорошим ростом культивируемой водоросли имеет место снижение интенсивности обрастаний цианобактериями.

Приведенные данные указывают, что для освещения водорослевого фильтра с макроводорослью *Caulerpa prolifera* необходим источник освещения с двумя пиками: 340нм, 470нм и 660 нм, в соотношении 4:1:1. Источник освещения с указанным спектром позволит эффективно культивировать макроводоросль *Caulerpa prolifera* в условиях морских

водорослевых фильтров. В то же время, указанный спектр освещения позволит минимизировать нежелательное обрастание системы цианобактериями.

### **Оптимизация излучения с заданным распределением**

При создании систем такого типа также возникает проблема оптимизации излучения, путём создания распределения интенсивности заданной определенной формы. Это позволит направить максимум излучения именно на водоросль, избежав попадания света на участки роста цианобактерии, либо на места, не участвующие в процессе фотосинтеза, что позволит существенно повысить эффективность альгофильтра.

В настоящее время, для создания излучения с заданным распределением интенсивности, в большинстве практических случаев используют адаптивные оптические системы на основе итерационных алгоритмов обработки изображений, в частности – алгоритма Гершберга-Сэкстона [9]. Данный алгоритм успешно применяется в задачах фазовой синхронизации многоканальных систем [10, 11] для создания излучения с заданным распределением. Алгоритм позволяет восстанавливать комплексные поля на апертуре линзы и в её фокальной плоскости по распределениям их интенсивностей, далее восстановленные поля поступают на адаптивный элемент (жидкокристаллический фазомодулятор), который создаёт на выходе распределение интенсивности заданной формы. В дальнейшем предлагается ввести данную систему в устройство альгофильтра, что значительно увеличит его эффективность.

### **Заключение**

Полученные данные указывают о перспективности использования в качестве источника освещения морских альгофильтров на основе

---

макроводоросли *Caulerpa prolifera* светодиодного освещения с использованием светодиодов трёх типов – с длиной волны 340, 470 и 660 нм. Количественное соотношение диодов соответственно 4:1,3:1. Указанные длины волн обеспечивают оптимальный рост культивируемой водоросли при минимальном росте нежелательных цианобактерий. Практическое испытание опытного светильника с двумя видами диодов из трёх предложенных (470 и 660 нм, в соотношении 1:1) показало на 37% более высокую эффективность фотосинтеза, по сравнению с контролем. Полученные нами данные указывают на то, что включение в систему освещения диодов ультрафиолетового спектра (340нм) позволит сделать производительность альгофилтра ещё выше.

### Литература

1. Kube N., Boschoff A.A., Wecker B. et all. The feasibility of a photobioreactor (microalgae) for removal of dissolved nutrients in a closed recirculating system / International Conference: Lessons from the Past to Optimise the Future, Trondheim, 5-9 Aug. 2005 // Eur. Aquacult. Soc. Spec. Publ, 2005, № 35, pp. 289-290.
2. Долговых О.Г., Красильников В.В., Газтдинов Р.Р. Влияние лазерной обработки на семена яровой пшеницы Ирень // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2) URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1422](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1422).
3. Martello A., Buono S., Calazzo M. et all. Preliminary tests on microalgae growth and their use as food supply in *Mytilus galloprovincialis* in a recirculating aquaculture system / International Conference: Lessons from the Past to Optimise the Future, Trondheim, 5-9 Aug., 2005 // Eur. Aquacult. Sec. Spec. Publ, 2005, № 35, pp. 315-316.
4. Schuenhoff A., Shpigel M., Lupatsch I, Ashkenazi A., Msuyab F.E., Neorib A. A semirecirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed // Aquaculture,

- 2003, 221 (1-4), pp. 167-181.
5. Жигин А.В., Дементьев Д.В. Использование водорослей для очистки оборотной морской воды в океанариуме // Рыбное хозяйство. 2015. №2, с. 94-99.
  6. Жигин А.В., Дементьев Д.В. Искусственная морская рыбоводная экосистема с очисткой воды водорослями // Аграрная наука. 2015. №5, с. 28-29.
  7. Сеницына Ю.В., Олюнина Л.Н., Половинкина Е.О. Фотосинтез и дыхание растений: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2008. – 28с.
  8. Польских С.Д., Семёнов П.А. Адаптивная оптическая система на основе алгоритма Гершберга-Сэкстона для фазовой синхронизации одномодовых лазерных излучателей // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. № 2. С. 100-104.
  9. Фиговский О.Л. В интервале пяти лет появятся инновации, которые сегодня кажутся фантастикой // Инженерный вестник Дона, 2011, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643.
  10. Семёнов П.А., Польских С.Д. Моделирование системы фазовой синхронизации лазерных излучателей на основе итерационных методов обработки изображений // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. № 3. С. 370-375.

### References

1. Kube N., Boschoff A.A., Wecker B. et all. The feasibility of a photobioreactor (microalgae) for removal of dissolved nutrients in a closed recirculating system. International Conference: Lessons from the Past to Optimise the Future, Trondheim, 5-9 Aug. 2005. Eur. Aquacult. Soc. Spec. Publ. 2005. № 35. pp. 289-290.
2. Dolgovyh O.G., Krasilnikov V.V., Gaztdinov R.R. Inženernyj vestnik Dona



- (Rus), 2013, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1422](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1422).
3. Martello A., Buono S., Calazzo M. et all. Preliminary tests on microalgae growth and their use as food supply in *Mytilus galloprovincialis* in a recirculating aquaculture system. International Conference: Lessons from the Past to Optimise the Future, Trondheim, 5-9 Aug., 2005. Eur. Aquacult. Sec. Spec. Publ. 2005. № 35. pp. 315-316.644.
  4. Schuenhoff A., Shpigel M., Lupatsch I. et all. A semirecirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. Aquaculture. 2003. 221, № 1-4. pp. 167-181.
  5. Zhigin A.V., Dement'ev D.V. Rybnoe hozjajstvo (Rus). 2015. №2, pp. 94-99
  6. Zhigin A.V., Dementyev D.V. Agrarnaja nauka (Rus). 2015. №5, pp. 28-29.
  7. Sinicyna Ju.V., Oljunina L.N., Polovinkina E.O. Fotosintez i dyhanie rastenij: uchebno-metodicheskoe posobie [Photosynthesis and respiration of plants: a teaching aid], Nizhny Novgorod State University, 2008. 28p.
  8. Pol'skikh S. D., Semenov P.A. Optika atmosfery i okeana (Rus). V.27. № 02. pp. 100-104.
  9. Figovsky O. L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/643).
  10. Semenov P.A., Pol'skikh S.D. Komp'juternaja optika (Rus), 2015, 39(3), pp. 370-375.