

## О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации Попова Александра Юрьевича **«ДИНАМИКА СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-*a* ФИТОПЛАНКТОНА В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертация А.Ю. Попова выполнена как междисциплинарное исследование на стыке оптики, лазерной физики, фотоники фотосинтезирующих организмов и океанологии.

В работе поставлена актуальная задача - разработать новую методику лазерно-индуцированной флуориметрии для определения концентрации хлорофилла-*a* фитопланктона, учитывающую изменение параметров внешней среды. В качестве таких параметров среды выбраны освещённость и температура. Решение этой задачи представляет интерес для фундаментальной биофизики фотосинтеза, биоокеанологии, экологического мониторинга водоёмов. Стимулированное этой проблемой развитие экспериментальной техники важно и для других разделов океанологии, где уже применяются оптические методы натуральных исследований, в частности, для химии океана (один из наиболее актуальных компонентов природных вод – гуминовые вещества обладают способностью к флуоресценции, равно как и некоторые антропогенные химические примеси, в первую очередь, нефтяные углеводороды).

Первое, что бросается в глаза при изучении диссертации, это то, что автор в совершенстве владеет принципами и методами автоматизации и оптимизации измерительных систем, но чувствует себя менее уверенно в вопросах фотоники фотосинтезирующих организмов. Глава 3, посвящённая исследованию элементов измерительного комплекса, написана блестяще: по-видимому, впервые, с исчерпывающей полнотой (до мельчайших деталей), на высоком профессиональном уровне исследованы все научно-технические вопросы, связанные с созданием системы для измерения флуоресценции фитопланктона (и не только его) *in situ* с использованием погружаемого приёмо-передающего оптоволоконного зонда. Большую практическую ценность имеет построенная автором математическая модель оптоволоконного датчика для лазерно-индуцированной флуориметрии (ЛИФ) водной среды - конкретно в этой работе для флуориметрии фитопланктона, но реально для более широкого класса флуоресцирующих примесей в воде, а также для регистрации сигнала комбинационного рассеяния воды, который, как известно, может использоваться в качестве внутреннего репера во флуориметрии и для определения температуры и солёности среды. Модель позволяет, в принципе, адаптировать датчик к конкретным гидрооптическим характеристикам и достигать, путём



соответствующей настройки схемы, наибольшей чувствительности при определении флуоресцирующих примесей в воде. Глава 3 практически свободна от недостатков.

Глав 2, посвящённая исследованию «влияния параметров среды на спектры ЛИФ хлорофилла-*a*», а также разделы главы 1, в которых излагается необходимая (по мнению автора, на самом деле избыточная) информация о строении фотосинтетического аппарата и первичных стадиях фотосинтеза, выглядят заметно слабее по содержанию (строгости, наличию неточностей), чем глава 3. Хотя, отметим сразу же, что экспериментальные результаты, приведенные в главе 2, несмотря на их эмпирический характер, представляют практический интерес и были просто необходимы для решения основной задачи, поставленной в диссертации.

Первый, как минимум, спорный момент состоит в правомерности использования термина «лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ)» по всему тексту главы 2, да и по большей части текста диссертации в целом. Значительная часть приведенной в диссертации информации о флуоресценции фитопланктона не содержит специфических для лазерного возбуждения признаков. Примеры: на рис 1.5, в подписи к которому указано, что это ЛИФ, приведен типичный для возбуждения от классических источников спектр флуоресценции хлорофилла (кстати, для этого рисунка, как и для некоторых других, не указана длина волны возбуждающего излучения, не расшифрованы полосы); в начале раздела 2.1 описывается стандартная для классической биофизики фотосинтеза процедура определения параметров  $F_0$  и  $F_m$ , в которой возбуждения лазерным излучением не требуется (хотя и может быть использовано). Это не значит, что ЛИФ надо было бы исключить из текста диссертации: лазерное возбуждение принципиальным образом используется в работе при определении концентрации флуорофоров, путем реализации режима насыщения флуоресценции. Но только в этих разделах диссертации ЛИФ и должна была указываться, причём в более акцентированном виде, а не так вскользь, как это сделано на стр. 89 с иллюстрацией не самым удачным рисунком (рис. 3.5), показывающим эффект насыщения флуоресценции. Указывая на ключевую роль реализации режима насыщения флуоресценции при измерении концентрации флуорофоров (хлорофилла-*a*), автор просто обязан был хотя бы кратко остановиться на физических механизмах нелинейности (обеднение основного состояния, заселение первого возбуждённого синглетного состояния с вытекающим из этого механизмом синглет-синглетной аннигиляции, который доминирует в ЛИФ фотосинтезирующих организмов из-за чрезвычайно высокой локальной концентрации молекул хлорофилла-*a* в пигмент-белковом комплексе светособирающей антенны (до 1 моль/литр).

Второй момент, связанный с изложением материала главы 2, касается зависимости интенсивности флуоресценции фотосинтезирующих организмов от освещённости. По-видимому, надо было бы более чётко указать на эффект нефотохимического тушения как механизм фотопротекции

