

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

фотосинтетического аппарата при избыточном освещении (о нефотохимическом тушении флуоресценции автор упоминает, но только в разделе, посвящённом зависимости флуоресценции от температуры). В микроводорослях и цианобактериях, составляющих фитопланктонное сообщество, процесс нефотохимического тушения имеет разные механизмы. В настоящее время они активно изучаются.

Сформулированные замечания указывают на отсутствие достаточно убедительной интерпретации полученных автором и описанных в главе 2 экспериментальных результатов. В то же время сами результаты заслуживают высокой оценки. Особенно впечатляют результаты, приведенные на рис. 2.18, который иллюстрирует постоянство значения концентрации хлорофилла-а, определённого по развитой автором методике, с использованием экспериментально измеренных зависимостей интенсивности флуоресценции фитопланктона от освещённости и температуры, в течение суток, в то время как сама интенсивность флуоресценции претерпевает известный по многим работам (в том числе, работам автора) суточный ход.

Представленную диссертацию можно квалифицировать как прикладное исследование. Этот жанр научного творчества сейчас особенно востребован, поскольку призван заполнить пробел между фундаментальными исследованиями и практикой. В этом отношении весьма уместной представляется глава 4, посвящённая апробации разработанных подходов, методов, алгоритмов и, главное, технических решений, в реальных условиях морских экспедиций на научно-исследовательских судах. Таких экспедиций в диссертации представлено четыре (2010 – 2013 г.г.). Всё сделано в лучших традициях океанологии. Единственное замечание: автор излишне увлёкся океанологией, забыв, по-видимому, что диссертация носит, прежде всего, методический характер, посвящена совершенствованию флуоресцентного метода определения концентрации хлорофилла-а *in situ*, представлена по специальности 01.04.21.

Резюмируя приведенный выше анализ диссертации, укажем, что:

- тема диссертации актуальна, а полученные в процессе её выполнения результаты имеют значительную научно-практическую ценность;
- научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы;
- достоверность полученных результатов не вызывает сомнений: автор подробно описывает использованные методы и аппаратуру, даёт ссылки на аналогичные работы;
- поставленные цели достигнуты, а необходимые для этого задачи решены; диссертация нацелена на решение актуальной прикладной задачи развития новых оптических методов мониторинга фитопланктона в условиях изменчивости внешних факторов, влияющих на фотофизические характеристики фитопланктона;
- основные результаты диссертации опубликованы в журналах из списка ВАК, содержание диссертации адекватно отражено в автореферате;

- критические замечания сформулированы при анализе содержания и приведены выше; текст диссертации оформлен хорошо, хотя и имеется ряд огрехов (не достаточно полны подписи под некоторыми рисунками; не отформатирован список литературы).

Оценивая диссертацию в целом, следует признать её удовлетворяющей критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а автора диссертации Попова Александра Юрьевича заслуживающим присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры квантовой электроники
физического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова,
профессор

В.В. Фадеев

119991 Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2
victor_fadeev@mail.ru, 8(495)939-1653

Подпись д.ф.-м.н., профессора В.В. Фадеева
удостоверяю.

И.о. декана физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор

А.В. Козарь

