

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.228.03
(Д 003.075.04), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН),
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.10.2023 № 8

О присуждении Лелекову Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора биологических наук.

Диссертация «Количественные закономерности роста микроводорослей в культуре и параметры управления процессом фотобиосинтеза» по специальности 1.5.2. Биофизика, принята к защите 30.05.2023 (протокол заседания № 3) диссертационным советом 24.1.228.03 (Д 003.075.04), созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН), Министерство науки и высшего образования РФ, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, создан приказом Минобрнауки № 21/нк от 24.01.2017.

Соискатель Лелеков Александр Сергеевич 06.04.1983 года рождения, в 2005 году окончил специалитет Севастопольского национального технического университета (СевНТУ), Министерство образования и науки Украины, по специальности «Физика» с присвоением квалификации физика, биофизика; в 2008 году окончил аспирантуру Института биологии южных

морей имени А.О. Ковалевского НАН Украины (ИнБЮМ), Национальная академия наук Украины, по специальности 03.07.17 – Гидробиология.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук «Моделирование роста и биосинтеза морских микроводорослей в квазинепрерывной культуре» по специальности 03.00.17 – Гидробиология защитил в 2009 году в диссертационном совете, созданном на базе Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского НАН Украины, работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского Российской академии наук» (ФИЦ ИнБЮМ), Министерство науки и высшего образования РФ.

Диссертация выполнена в Отделе биотехнологии и фиторесурсов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Российской академии наук» (ФИЦ ИнБЮМ), Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный консультант – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, Егоров Виктор Николаевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Российской академии наук» (ФИЦ ИнБЮМ), научный руководитель, отдел радиационной и химической биологии, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Ризниченко Галина Юрьевна, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ имени М. В. Ломоносова), кафедра биофизики биологического факультета, профессор;

Антал Тарас Корнелиевич, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Псковский государственный университет» (ПсковГУ), проректор по научной работе, лаборатория комплексных экологических исследований, главный научный сотрудник;

Брильков Анатолий Васильевич, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), кафедра ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии», профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук» (ФИЦ ПНЦБИ РАН), г. Пушкино Московской области, в своем положительном отзыве, подписанном Цыганковым Анатолием Анатольевичем, доктором биологических наук, директором Института фундаментальных проблем биологии Российской академии наук (ИФПБ РАН) – обособленного подразделения ФИЦ ПНЦБИ РАН, заведующим лабораторией биотехнологии и физиологии фототрофных организмов, указала, что решаемая соискателем научная задача является своевременной и актуальной научной проблемой, связанной с разработкой простых и эффективных моделей роста микроводорослевых популяций в лабораторных и промышленных культиваторах – фотобиореакторах, а представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, освещающей вопросы роста микроводорослей и основные параметры управления процессом фотосинтеза, и соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Соискатель имеет 74 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 25 статей в рецензируемых научных изданиях,

входящих в базы цитирований РИНЦ, Scopus, Web of Science. Также соискателем по теме диссертации опубликована 1 монография и 2 патента. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, объем научных изданий (статей) составляет 232 стр., авторский вклад – 75 %.

Наиболее значимые публикации:

1. Borovkov A.B., Gudvilovich I.N., Lelekov A.S., Avsiyan A.L. Effect of specific irradiance on productivity and pigment and protein production of *Porphyridium purpureum* (Rhodophyta) semi-continuous culture // Bioresource Technology, 2023. Vol. 374.
2. Лелеков А.С., Чернышев Д.Н., Ключкова В.С. Количественные закономерности роста накопительной культуры *Arthrospira platensis* // Математическая биология и биоинформатика, 2022. Т. 17, № 1. С. 156–170.
3. Лелеков А.С., Тренкеншу Р.П. Двухкомпонентная модель роста микроводорослей в плотностате // Математическая биология и биоинформатика, 2021. Т. 16, № 1. С. 101–114.
4. Lelekov A.S., Borovkov A.B., Gudvilovich I.N., Memetshaeva O.A., Trenkenshu R.P. Estimation of *Dunaliella salina* Teod. maximum productivity under natural illumination // Theoretical and Applied Ecology, 2021. Vol. 2021, no 2. P. 202–207.
5. Gudvilovich I.N., Lelekov A.S., Maltsev E.I., Kulikovskii M.S., Borovkov A.B. Growth of *Porphyridium purpureum* (Porphyridiales, Rhodophyta) and production of b-phycoerythrin under varying illumination // Russian Journal of Plant Physiology, 2021. Vol. 68, I. 1. P. 188–196.
6. Лелеков А.С., Тренкеншу Р.П. Моделирование содержания хлорофилла а в культурах микроводорослей // Математическая биология и биоинформатика, 2020. Т. 15, № 2. С. 158–171.
7. Лелеков А.С., Боровков А.Б., Новикова Т.М., Гудвилевич И.Н., Авсиян А.Л., Меметшаева О.А. Моделирование динамики содержания пигментов в клетках одноклеточной водоросли *Dunaliella salina* Teod. на стадии каротиногенеза // Математическая биология и биоинформатика, 2019. Т. 14, № 1. С. 279–289.

8. Borovkov A.B., Gudvilovich I.N., Avsiyan A.L., Memetshaeva O.A., Lelekov A.S., Novikova T.M. Production characteristics of *Dunaliella salina* at two-phase pilot cultivation (Crimea) // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2020. Vol. 20, no. 5. P. 401–408.
9. Лелеков А.С., Тренкеншу Р.П. Моделирование динамики азотистых соединений в клетках микроводорослей. 2. Хемостат // Математическая биология и биоинформатика, 2019. Т. 14, № 2. С. 450–463.
10. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С. Моделирование динамики азотистых соединений в клетках микроводорослей. 1. Накопительная культура // Математическая биология и биоинформатика, 2018. Т. 13, № 2. С. 348–359.

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва. Все отзывы положительные. Отзывы: Соловченко А.Е., доктора биологических наук, профессора кафедры биоинженерии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М. В. Ломоносова); Неверовой Г.П., доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории математического моделирования биофизических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН); Габриеляна Д.А., кандидата технических наук, старшего научного сотрудника лаборатории экофизиологии микроводорослей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук (ИФР РАН) замечаний не содержат. В отзыве доктора физико-математических наук, профессора Масловской А.Г., профессора кафедры математического анализа и моделирования, главного научного сотрудника лаборатории математического моделирования сложных физических и биологических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет»

(АмГУ) были отмечены следующие замечания: соискатель допускает некоторые неточности в употреблении математической терминологии и в формализованных представлениях математических моделей, для написания греческих букв и экспоненциальной функции использованы различные стили; а также заданы следующие вопросы: «Почему автор ограничился использованием обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка? Пространственная структура сообществ микроводорослей является сложной и неоднородной – почему пространственным распределением микроводорослей можно пренебречь?».

Лелеков А.С. согласился с замечаниями и ответил на вопросы Масловской А.Г.: При моделировании сложных биологических систем мы вынуждены искать пути упрощения моделей. Невозможно описать математически метаболизм даже одной клетки ввиду огромного количества протекающих в ней процессов. Поэтому, в соответствии с поставленными задачами, использование обыкновенных дифференциальных уравнений представляется нам как наиболее адекватный математический инструмент, позволяющий получить простые выражения, описывающие кинетику и динамику плотности культуры микроводорослей, её макромолекулярных составляющих, а главное – оценить ключевые видоспецифические параметры различных культур. В данной работе рассматривается интенсивная культура микроводорослей, которая характеризуется достаточно сильным перемешиванием, поэтому мы принимаем, что клетки равномерно распределены по всему объёму фотобиореактора, что позволяет нам не использовать сложные распределённые модели в частных производных. Хотя в дальнейшем это упрощение скорее всего придётся опустить из рассмотрения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью и высокой квалификацией специалистов в области популяционного моделирования, биотехнологии низших фототрофов, а также соответствием основных направлений исследований задачам диссертационной работы Лелекова А.С. Оппонент Ризниченко Г.Ю.

(г. Москва) является профессором кафедры биофизики биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, публикации которой охватывают тематику, связанные с исследованиями фотосинтеза микроводорослей, моделированием структуры фотосинтетической мембраны и функционирования цепи переноса электрона при фотосинтезе, а также с разработкой математических моделей биологических процессов на различных уровнях организации материи, что существенно перекликается с диссертационной работой Лелекова А.С., в том числе с главами 3-7. Оппонент Антал Т.К. (г. Псков) является проректором по научной работе, главным научным сотрудником лаборатории комплексных экологических исследований ПсковГУ, специалистом в области биотехнологии микроводорослей, функционального состояния фотосинтетического аппарата микроводорослей в условиях лимитирования роста культуры биогенными элементами, а также моделирования фотосинтеза и флуоресценции у микроводорослей, что соответствует главам 4-6 диссертационной работы Лелекова А.С. Оппонент Брильков А.В. (г. Красноярск), профессор кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» СФУ, является специалистом в области экологии и моделирования кинетики субстрат-зависимого роста микроорганизмов, что соответствует главам 3-4 диссертации Лелекова А.С. Научный коллектив ФГБУН ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» проводит исследования в области молекулярных механизмов биологических процессов трансформации энергии, преобразования и запасания энергии света при фотосинтезе, регуляции фотобиологических процессов, структуры и функций мембран и надмолекулярных комплексов, участвующих в биологическом превращении энергии и метаболитов. Объектами исследований являются микроорганизмы, относящиеся к различным систематическим группам: одноклеточные водоросли, пурпурные серные и несерные бактерии, цианобактерии. В ФИЦ ПНЦБИ РАН проводятся исследования по получению из биомассы микроорганизмов ценных соединений, что соответствует главам 3-7 диссертации Лелекова А.С.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый научный подход, основанный на представлении о двухстадийности фотоавтотрофного роста микроводорослей, существовании ключевого мультиферментного комплекса, на котором осуществляется сопряжение энергообменных реакций в клетке, представлении биомассы микроводорослей в виде двух макромолекулярных компонентов, скорости синтеза которых заданы линейными сплайнами;

предложена оригинальная научная гипотеза о пропорциональности структурных компонентов биомассы, что позволило выразить скорость синтеза резервной составляющей через приведённую плотность потока внешнего лимитирующего субстрата, скорость синтеза структуры – через экспериментально измеряемое соотношение резервных и структурных компонентов;

доказана перспективность использования нового подхода, позволяющего на основе линейных сплайнов получить количественные закономерности роста культуры микроводорослей в условиях смены лимитирующего фактора и изменения биохимического состава биомассы, выявить ключевые параметры, определяющие направленность фотобиосинтеза;

введены новые параметры, позволяющие разрабатывать алгоритмы получения биомассы микроводорослей требуемого биохимического состава, предложены прогностические модели динамики резервных и структурных компонентов биомассы микроводорослей в условиях естественного освещения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений о теоретических основах роста микроводорослей в условиях интенсивной культуры, взаимосвязи продукционных характеристик культуры с приведёнными потоками энергетического или пластического субстрата в виде линейных сплайнов;

применительно к проблематике диссертации эффективно использован комплекс новых и существующих подходов, лежащих в основе моделирования процессов фотобиосинтеза микроводорослей, результативно использованы существующие методы выращивания микроводорослей, что позволило верифицировать модели, рассчитать ключевые параметры управления ростом культуры;

изложены принципы двухкомпонентного подхода к моделированию роста и биосинтеза культуры микроводорослей, гипотеза о пропорциональности структурных компонентов биомассы, доказательства того, что внутриклеточные потоки резервных компонентов могут быть выражены через экспериментально определяемое соотношение резервной и структурной частей;

раскрыты ранее неизвестные особенности роста культуры микроводорослей в условиях азотного голодания, уточнена концепция Друпа: удельная скорость роста определяется не квотой азота, а долей структурных форм азота в общеклеточном содержании;

изучены взаимосвязи удельной скорости роста и продукции основных макромолекулярных компонентов биомассы накопительной и непрерывной культуры микроводорослей различных систематических групп с интенсивностью света;

проведена модернизация существующих математических подходов, что позволило объяснить динамику роста и биосинтеза культуры микроводорослей в условиях смены лимитирующего фактора.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны принципы моделирования фотобиосинтеза, которые позволили получить прогностические модели роста культуры микроводорослей в условиях искусственного и естественного освещения;

определены параметры, позволяющие управлять биохимическим составом получаемой биомассы микроводорослей в широком диапазоне плотностей культуры;

создана система оценки предельной продуктивности культуры микроводорослей при промышленном выращивании в условиях естественного освещения;

представлены рекомендации по получению биомассы микроводорослей требуемого биохимического состава путём варьирования времени сбора урожая.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использованы современные методы интенсивного культивирования микроводорослей в лабораторных условиях и в альгобиотехнологическом модуле при естественном освещении. Достоверность полученных данных подтверждается их воспроизводимостью в серии экспериментов и статистической обработкой;

теория моделирования фотобиосинтеза построена на известных, проверяемых данных и согласуется с опубликованными результатами по теме диссертации и в смежных областях;

идея базируется на анализе практики применения биотехнологических подходов для получения высокой продуктивности культуры микроводорослей и получения биомассы заданного биохимического состава;

использованы сравнения авторских данных и литературных данных о росте микроводорослей различных систематических групп с применением статистических методов анализа;

установлено качественное и количественное совпадение результатов автора с результатами, представленными в независимых источниках научной информации в отношении свойств культуры микроводорослей, выращиваемой в условиях лимитирования;

использованы: современные методики сбора и обработки исходной информации с помощью аналитических (лабораторное и полупромышленное культивирование, количественный учёт микроводорослей в культуре, спектрофотометрия) и статистических методов (дисперсионного и регрессионного анализа, метода наименьших квадратов).

Личный вклад соискателя состоит в: постановке цели и задач исследования, предложении универсальных принципов моделирования роста культуры микроводорослей, получении экспериментальных данных о росте и биохимическом составе биомассы, верификации моделей, интерпретации и обобщении полученных результатов, апробации результатов исследования на научных семинарах и конференциях и подготовке публикаций.

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний, относящихся к сути диссертации, однако был задан ряд вопросов. Соискатель Лелеков А.С. согласился с замечаниями и ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы:

Вопрос: Объясните на примере таблицы на 35 слайде как отделить структурную биомассу от резервной? Ответ: В темное время суток содержание углеводов уменьшается – резервы сгорают, структурные углеводы остаются. Разница биомассы между восходом и закатом – это резервные углеводы.

Вопрос: Вы приписываете всё увеличение биомассы в приросте к резервам? Ответ: Нет, белок мы считаем структурой. Он прирастает и днём, и ночью. Ночью идут синтез структуры за счёт резервов, деление клеток; резервная биомасса не растёт, сгорает, потому что нет солнца.

Вопрос: Углеводы и липиды Вы считаете резервной биомассой? Ответ: Нет, мы разделяем и липиды, и углеводы на резервные и структурные; но при моделировании мы отказались от такого подхода из-за сложности математических уравнений и перешли к двухкомпонентной модели, в которой все резервы мы объединяем в одно целое.

Вопрос: Что Вы понимаете под нормировкой, как Вы её производили, почему не все данные с левого рисунка вошли на правый? Почему график не достигает единицы? Ответ: Нормированная скорость – это скорость, делённая на её максимальное значение. Не все данные вошли, потому что область фотоингибирования не рассматривалась. В области насыщения проводилось фитирование данных, значения близки к единице. Интенсивность света мы нормировали на насыщающее значение освещённости и хлорофилл а.

Вопрос: Что в Вашем понимании означает универсальность модели, каков её масштаб? Универсальность модели продемонстрирована на всех объектах, которые Вы показали в работе? Ответ: Модель верифицировали на двух случаях лимитирования – по свету и по биогенным элементам (азот). Показана зависимость коэффициентов модели от температуры, зависимость эффективности фотосинтеза от освещённости. Универсальность модели подтверждает верификация на пяти своих объектах и пяти – из литературы.

Вопрос: Возможно ли применить Ваш подход для высших растений? Ответ: В перспективе возможно, потому что использование линейных сплайнов позволяет описать сложные процессы, протекающие в клетке, простыми уравнениями.

Вопрос: Вы использовали в своей работе светящиеся организмы, например, ноктилюку? Ответ: нет, поскольку они не являются классическими фотоавтотрофами.

Вопрос: Как работала Ваша модель в условиях естественного освещения и на производствах микроводорослей; какие трудности возникали при смене условий? Ответ: Я впервые предложил подход, который позволяет объяснить изменение биохимического состава в течение светового дня; параметры модели можно задавать. Модель не была верифицирована в условиях производства, определение параметров проводилось на литературных данных.

Вопрос: Делали ли Вы прогноз с помощью Вашей модели, который потом подтверждался на практике? Ответ: Да, в основном это касается лабораторных условий, в которых легче получать данные о биохимическом составе. Нами был выбран хлорофилл а: он биохимически легко определяем, коррелирует с белком и структурной биомассой.

Вопрос: Линейная корреляция хлорофилла с белком означает, что у них одинаковая чувствительность? Почему на отдельных участках возможна такая линейная зависимость? Как объяснить падение хлорофилла от освещённости? Ответ: Мы считаем, что корреляция хлорофилла и белка возможна для интенсивно растущей культуры. Существует масса литературных данных,

в которых показано, что хлорофилл а и белок – это единый комплекс в фотосинтетических антеннах, они неразрывно связаны и поэтому коррелируют. Доля хлорофилла а снижается потому что растёт количество углеводных резервов в биомассе.

Вопрос: С ростом плотности накопительной культуры происходит уменьшение количества световой энергии на клетку – разве это не стандартный и известный эффект? Ответ: Нами установлена количественная взаимосвязь удельной скорости роста и количества световой энергии, что помогло впервые объяснить постоянство продуктивности культуры.

Вопрос: Как Вы оцениваете концентрацию ключевого мультиферментного комплекса F_0 ? Ответ: Это некоторый феноменологический параметр, который мы не можем измерить, а только модельно предположить: мы выражаем концентрацию F_0 исходя из пропорциональности структуры через концентрацию белка.

Вопрос: Слайд 32, почему Вы провели одну линию, а не две? Ответ: Здесь рассмотрена простейшая однокомпонентная модель, – вероятно, снижение в конце кривой связано со сменой лимитирующего фактора. Полученное выражение удобно для применения с достаточной степенью точности.

Вопрос: Какие экспериментальные данные использовались для проверки модели? Каким образом оценивалась чистота культуры? Ответ: В лабораторных экспериментах использовали паспортизированные культуры из нашей коллекции, они не аксеничные, т.е. содержат гетеротрофную составляющую. В активно растущей культуре водорослей бактериальная составляющая минимизируется путём использования технологических режимов выращивания (рН среды, высокая солёность).

Вопрос: Вы связываете изменение биомассы с изменением оптической плотности? Ответ: Нет, с изменением мутности. Мы использовали экспресс-метод, измеряя оптическую плотность на 750 нм, где сами клетки не поглощают.

Вопрос: Оптическая плотность – это просто сигнал, а физика процесса в распределении клеток по размерам. Те эмпирические коэффициенты, которые Вы привели нельзя считать постоянными. Ответ: Да, на светорассеяние влияет на очень много факторов. Но при использовании оптического метода пробу можно вернуть обратно в культиватор; все другие способы – это вмешательство в процессы роста. Даже в современных спектрофотометрах с интегрирующей сферой кювета располагается перед сферой, что приводит к светорассеянию и искажению результатов. Эмпирические коэффициенты, полученные нами, остаются постоянными при работе на одних и тех же приборах в широком диапазоне плотностей.

Вопрос: Насколько может сказаться видовая специфика объектов исследования на результате? Что может измениться: характер кривых, коэффициенты? Ответ: Тенденция будет одна, но возможно изменится скорость выхода на плато; так, видоспецифический параметр β_{str} определяет скорость падения кривой.

Вопрос: Насколько спектральный состав света повлияет на Ваши зависимости? Ответ: Спектральный состав не учитывался; максимальная продуктивность – обобщенный параметр, спектр не окажет на него влияния.

Вопрос: Какие нетривиальные предсказания может сделать Ваша модель? На основе каких параметров Вы можете управлять культивированием водорослей? Вы можете выйти за рамки аппроксимации? Ответ: Модель имеет прогностические свойства в рамках границ применимости, мы разбиваем весь диапазон на участки, получая для каждого свою функциональную зависимость. Если мы вернемся от математики к биологии, то у нас есть какие-то пределы, от которых мы отталкиваемся.

Вопрос: Как можно использовать модель для управления промышленной культурой? Какой параметр это демонстрирует? Ответ: Если мы возьмём азот, то параметр – это доля структурных форм азота, необходимых чтобы скорость была максимальна (т.е. при 11 градусах – 0,5 тетта, а при 16 – 0,55).

Вопрос: Вы управляете только биомассой? Вы же игнорируете биохимический состав? Ответ: У нас двухкомпонентная модель – структурная и резервная часть биомассы. Нет, работа посвящена моделированию динамики роста культуры с учётом изменения биохимического состава, который мы объединили в 2 макромолекулярных компонента. Для спирулины ценность представляет белок, для биодизеля – липиды: меняя условия, можно задать какие компоненты будут накапливаться в биомассе.

На заседании **17 октября 2023 года** диссертационный совет принял решение: за разработку теоретических положений в области фундаментальных принципов моделирования фотобиосинтеза микроводорослей, исследований роста культуры в условиях смены лимитирующего фактора и изменения биохимического состава биомассы, а также разработку новых подходов к получению востребованных продуктов альготехнологии, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее важное научное и практическое значение, присудить **Лелекову А.С.** учёную степень доктора биологических наук.

При проведении тайного голосования с использованием информационно-коммуникационных технологий диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 1.5.2. Биофизика отрасли биологические науки, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д.Ф.М.И.

 Барцев Сергей Игоревич

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.б.н.

 Дементьев Дмитрий Владимирович

19.10.2023