

Отзыв научного консультанта
на диссертационную работу Плюсониной Татьяны Юрьевны
«Динамическая организация переходных процессов в клетках фотосинтезирующих
организмов в норме и под действием стресса»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.5.8. Математическая биология, биоинформатика

Диссертационная работа Т.Ю. Плюсониной посвящена фундаментальной проблеме системной биологии – пониманию роли переходных процессов как регуляторных фаз адаптации фотосинтезирующих клеток к изменяющимся внешним условиям. Тема работы является актуальной и своевременной: в современных исследованиях все большее внимание уделяется не только стационарным состояниям биологических систем, но и динамике их перестроек, особенно в контексте устойчивости к стрессу, биотехнологии и экомониторинга. Актуальность темы подтверждается как ростом числа публикаций в области нелинейной динамики клеточных процессов, так и практической необходимостью создания инструментов ранней диагностики стресса и управления метаболическими путями у фотосинтезирующих организмов. Работа полностью соответствует приоритетным направлениям развития математической биологии и биофизики.

Автором предложена и последовательно реализована концепция переходных процессов как иерархически организованных, многоуровневых явлений, которые связывают быстрые фотохимические события (мкс-мс) с медленными метаболическими и популяционными перестройками (часы-дни). Такой подход выходит за рамки традиционных феноменологических описаний и позволяет рассматривать клетку как динамическую систему, способную к бистабильным переключениям, гистерезису и автоколебаниям – режимам, обусловленным наличием положительных обратных связей и пороговых механизмов регуляции. Эта концепция представляет собой новую теоретическую основу для анализа адаптации, основанную на синтезе экспериментальных данных, математического моделирования и методов теории динамических систем.

В работе последовательно разработан и обоснован ряд ключевых научных результатов, которые составляют ядро диссертации:

1. Иерархический подход к редукции кинетических моделей ФСП, позволяющий количественно описывать переходные процессы по экспериментальным кривым индукции флуоресценции хлорофилла *a*. Автор показала, что существующие детальные модели ФСП могут быть сведены к системам малой размерности (2-3 ОДУ) без потери физической интерпретируемости, поскольку эффективные параметры редуцированных моделей связаны с элементарными константами через аналитические соотношения. Это обеспечивает возможность «разворачивания» эффективных параметров и восстановления недоступных *in vivo* кинетических констант, например, световых стадий или констант обмена с КВК. Такой подход существенно снижает неоднозначность решения обратной задачи и позволяет интерпретировать наблюдаемые фазы ИК (O, J, I, P) не как эмпирические точки, а как проявление конкретных групп реакций (донорная/акцепторная сторона, антенна, КВК).
2. Метод спектральной мультиэкспоненциальной аппроксимации (СМЭА), разработанный и реализованный в программном комплексе *pyPhotoSyn*, позволяет выявлять скрытые

временные компоненты в кривых индукции, не обнаруживаемые при визуальном анализе. Метод демонстрирует высокую чувствительность к ранним стадиям стресса (например, появление *K*-фазы при азотном голодании за 10-12 ч до видимых повреждений) и позволяет количественно оценивать амплитуды и характерные времена фаз, что делает его операционным инструментом для биомониторинга. Важно, что СМЭА дополняет традиционные методы (JIP-тест, РСА), формируя единый аналитический инструментарий.

3. Интегративные модели переходных процессов, объединяющие кинетику ФСЦ, мембранные процессы и центральный метаболизм, позволили впервые количественно описать триггерный характер перехода *Chlamydomonas reinhardtii* в режим выделения водорода при серном голодании. Показано, что переключение происходит за 10-20 мин при достижении критического уровня восстановленного пластохинона (PQH_2), что обусловлено нелинейностью, возникающей из двойного протонирования хинонов. Совместный анализ с потоковой моделью (FBA, 35 уравнений) выявил последовательность перераспределения метаболических потоков: от анаболических (цикл Кальвина) к катаболическим (гликолиз, хлородыхание), с максимумом выделения водорода на 72 ч. Это подтверждает, что переходный процесс является не пассивной реакцией, а активной программой адаптации.

4. Популяционная модель роста *Chlorella vulgaris* при фосфорном голодании, включающая регулятор *R*, зависимый от внутриклеточного фосфата, позволила обосновать наличие гистерезиса в накоплении полифосфатов и установить критическое условие: пик накопления достигается только при добавлении фосфата после ≥ 30 ч голодания. Это свидетельствует о функциональной памяти системы и позволяет предложить двухэтапную стратегию культивирования для биологической очистки сточных вод с последующим сбором фосфорсодержащих удобрений.

5. Модель трансмембранных процессов в *Chara corallina*, построенная как система «реакция-диффузия», объясняет возникновение автоколебаний потенциала и pH, а также диссипативных структур (чередующихся кислых и щелочных зон) как следствие взаимодействия фотосинтеза, протонной АТФазы и латеральной диффузии. Анализ показал субкритическую бифуркацию Андронова-Хопфа и бифуркацию Тьюринга, что подтверждает нелинейную природу этих явлений и их связь с пороговыми механизмами регуляции.

Положения, выносимые на защиту, обоснованы и достоверны. Они подтверждаются многократной верификацией моделей на независимых экспериментальных выборках (в том числе данные из литературы и собственные измерения); согласованностью выводов с результатами других методов (JIP-тест, РСА, разностные кривые); воспроизводимостью ключевых эффектов (гистерезис, бистабильность, автоколебания) в повторных сериях экспериментов; строгим математическим анализом (теорема Тихонова, бифуркационный анализ, FBA-оптимизация).

Научная новизна работы заключается в целостной концепции: переходные процессы рассматриваются как регуляторные этапы, определяющие стратегию адаптации. Автор впервые продемонстрировала, что управляющий параметр (например, PQH_2 , ΔpH) может инициировать пороговые переключения на разных уровнях, от фотохимии до популяции. Это позволяет использовать быстрые индикаторы (фазы индукционной кривой) для прогнозирования медленных изменений, что имеет прямое прикладное значение.

Работа выполнена в рамках системного подхода, сочетающего эксперимент, моделирование и анализ динамических систем. Методология строго обоснована, используемые методы

(разделение временных масштабов, спектральная аппроксимация, FBA, реакция-диффузия) являются оцепринятыми в современной математической биологии, но применены оригинально и последовательно. Рекомендации, сформулированные в работе (например, двухэтапная стратегия культивирования, использование СМЭА для ранней диагностики), носят обоснованный и практичный характер.

Заключение: диссертация соответствует всем критериям, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам (специальность 1.5.8. Математическая биология, биоинформатика). Она носит фундаментальный характер; содержит самостоятельные научные результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость; положения, выносимые на защиту, обоснованы и подтверждены данными; работа выполнена на высоком методологическом уровне и оформлена в соответствии с требованиями. Работа может быть рекомендована к защите в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова.

проф. кафедры биофизики

биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

д.ф-м.н., проф.

Ризниченко Г.Ю.

20.04.2026

2