

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Беловой Юлии Валериевны «Математическое моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы и соответствие специальности

Диссертационная работа Беловой Ю.В. посвящена математическому моделированию биогеохимических процессов, протекающих в Азовском море. Обладая крупнейшей прибрежной системой на Юге России, и являясь уникальным водоёмом, Азовское море характеризуется рядом специфических черт: (1) небольшая глубина и континентальный климат обеспечивают почти равномерный прогрев по всей толще воды и небольшие перепады температуры по всей акватории в летний период; (2) это солоноватый, т.е. переходный водоём между пресными речными и солеными водами Черного моря, что обеспечивает резкий перепад солёности; (3) большой относительно объёма моря речной сток обеспечивает значительное поступление биогенных веществ. Эти и другие факторы определяют биологическое разнообразие и продуктивность Азовского моря.

Экосистема Азовского моря демонстрирует высокую скорость реакции на колебания речного стока и значительную пространственно-временную изменчивость гидрофизических и биологических характеристик. Это существенно осложняет задачу анализа реакции экосистемы на внешние воздействия как природной, так и антропогенной природы. Натурные полевые исследования, экспедиционные работы и анализ данных космического зондирования необходимо дополнять математическим моделированием биогеохимических и гидродинамических процессов. Поэтому решаемые диссертантом задачи построения надёжных модельных инструментов, при помощи которых можно объяснить особенности биогеохимических процессов в море и спрогнозировать их динамику, актуальны и востребованы. В диссертации Юлии Валериевны Беловой решаются следующие задачи: (1) построение пространственных трёхмерных математических моделей биогеохимических циклов, которые определяют биологическую продуктивность прибрежных систем и состояние водной экосистемы в целом; (2) дискретизация исходных непрерывных моделей с использованием схем повышенной точности; (3) исследование, верификация и валидация построенных моделей и численных алгоритмов.

Оценивая актуальность работы, следует заметить, что особенностью начавшегося с 2007 г. современного периода осолонения Азовского моря является также аномальный рост температуры моря, что в совокупности вызывает довольно серьёзные изменения биоты. Данное обстоятельство обуславливает необходимость построения математических моделей, учитывающих влияние на развитие фитопланктонных популяций и солёности, и температуры — именно такая модель и рассматривается в диссертации.

Таким образом, актуальность темы исследования, а также соответствие диссертации требованиям к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в рамках специальности 05.13.18 не вызывают сомнений.

2. Обоснованность, достоверность и новизна научных положений и выводов

В данной работе применялись математически обоснованные методы. Методами математической физики выполнено исследование единственности решения линеаризованной на временной сетке начально–краевой задачи биогеохимических циклов, включающей систему из 10 уравнений параболического типа с нелинейными функциями источников, и проведена её дискретизация. Выполнено исследование точности и устойчивости построенной разностной схемы. Устойчивость разностной схемы исследована методом гармоник, получено ограничение на шаги по времени и пространству. Точность разностной схемы исследована с использованием разложения в ряд Фурье. Показано, что предложенная в диссертации разностная схема аппроксимирует модель со вторым порядком по времени и третьим по пространству.

Научная новизна диссертационной работы заключается в построении и исследовании оригинальной трёхмерной модели роста фитопланктонных популяций. Проведено аналитическое исследование построенной модели, выполнена линеаризация, определены неравенства, гарантирующие существование и единственность поставленной задачи, сформулирована теорема. В работе предложена новая разностная схема для решения задач конвекции-диффузии-реакции при больших значениях сеточного числа Пекле ($2 < Pe < 20$), которая представляет собой линейную комбинацию центральной разностной схемы и схемы «кабаре». Показано, что при решении задач, в которых конвекция преобладает над диффузией, эта трёхслойная разностная схема обладает большей точностью, чем традиционная схема «кабаре». Восстановлены поля солёности и температуры Азовского моря по картографической информации с использованием схем повышенного порядка аппроксимации. Построен программный комплекс с удобным пользовательским интерфейсом, позволяющий моделировать биогеохимические процессы в Азовском море и рассчитывать краткосрочный прогноз динамики развития экосистемы моря в условиях повышения уровня солёности вод и вариации температурных условий.

Работа прошла надлежащую апробацию на представительных научных конференциях, а основные результаты, полученные Юлией Валериевной, своевременно и полно опубликованы в 18 научных работах, включая 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а также 5 работ в изданиях, которые индексируются Scopus. Диссертантом также получено 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

3. Содержание и структура диссертации

Структура диссертационной работы Ю.В. Беловой традиционна. Она включает введение, 4 главы, заключение и список литературы. Работа изложена на 165 страницах и

содержит 9 таблиц и 54 иллюстрации. Библиографический список состоит из 134 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, характеризуется степень разработанности темы исследования, формулируются цель и задачи диссертационного исследования, описываются использованные материалы и методы, обосновывается научная новизна работы, раскрывается практическая и научная значимость.

Первая глава посвящена обзору и сравнению существующих моделей биогеохимических циклов, описанию биогеохимических процессов в Азовском море, описанию и аналитическому исследованию построенной непрерывной математической модели. Поскольку прикладная часть диссертации касается моделирования роста сообщества доминирующих групп водорослей в зависимости от поглощения питательных веществ, солёности и температуры, в обзоре приведены сведения о трансформации основных биогенных веществ — фосфора, азота и кремния, особенностях развития зелёных, сине-зелёных и диатомовых водорослей, а также о методах их моделирования. Сформулирована модель биогеохимических циклов, представляющая собой систему нестационарных уравнений конвекция–диффузия–реакция, описаны начальные и краевые условия. Рост фитопланктона моделируется на основе зависимости Моно, с использованием концепций лимитирующего фактора Либиха и толерантности Шелфорда. Проведена линеаризация исходной модели, определены достаточные условия существования и единственности решений, взаимосвязанных по начальным и конечным условиям цепочек начально-краевых задач, сформулированные в виде теоремы. В этой же главе построена трёхмерная модель гидродинамики мелководного водоёма.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию устойчивости дискретной разностной схемы, представляющей собой линейную комбинацию центральной разностной схемы и схемы «кабаре». Преимуществом предложенной разностной схемы, которое демонстрируется диссертантом на тестовых задачах расчёта перемещения возмущения типа «прямоугольная ступенька», является большая точность получаемого с её помощью решения при больших значениях сеточного числа Пекле. Далее описана трёхмерная дискретная математическая модель биохимической трансформации форм фосфора, азота и кремния. Дискретная модель построена на основе предложенной разностной схемы и метода заполнения ячеек, обеспечивающего более высокую точность аппроксимации в граничных узлах сетки.

Третья глава посвящена выбору итерационного метода для решения системы сеточных уравнений, а также подбору значений параметров системы и начальных условий. Автором диссертации проведена большая работа по созданию библиотеки итерационных методов, включающей в себя шесть численно-реализованных алгоритмов, которые сравниваются на примере решения системы сеточных уравнений для задач моделирования биогеохимических циклов в мелководных водоёмах. Показано, что трёхслойные итерационные методы сопряжённых направлений дают значительное ускорение счёта по сравнению с двухслойным методом скорейшего спуска, а также с

методами, использующими более трёх временных слоёв. В главе приведены результаты статистической обработки рядов наблюдений за характеристиками стока Дона, а также результаты восстановления (гладкой аппроксимации) полей солёности и температуры Азовского моря по данным гидрологических наблюдений. Полученные поля затем использовались в качестве начальных распределений при проведении модельных расчётов.

Четвертая глава посвящена разработке программного комплекса и проведению вычислительного эксперимента по моделированию биогеохимических циклов в Азовском море и визуализации полученных результатов. Наиболее интересной частью данной главы является обсуждение результатов работы модели, рассчитывающей пространственное распределение трёх групп фитопланктона и биогенных элементов в Азовском море в зависимости от внешних факторов. Согласно представленным данным, модель позволяет качественно верно воспроизвести пространственное распределение различных групп доминирующих водорослей. В частности, в эксперименте с гипотетическим сценарием повышения солёности прогнозируется доминирование диатомовых водорослей в центральной части моря и проникновение их в Таганрогский залив.

В заключении изложены основные результаты и выводы.

4. Научная и практическая значимость результатов

Результаты проведённого в рамках работы над диссертацией исследования позволяют глубже понять биогеохимические процессы, происходящие в мелководных замкнутых морях и прибрежных системах. Использование актуальных натуральных данных, полученных в экспедициях, спутниковых снимков, баз данных морских информационных систем в комплексе с разработанной математической моделью биогеохимических циклов и программным комплексом позволит оценивать текущее состояние экосистемы Азовского моря и делать прогнозы развития экологической обстановки под влиянием природных и антропогенных факторов. Усовершенствование математических моделей биогеохимических циклов является важной практической задачей, решение которой позволит повысить эффективность использования морских ресурсов, строить прогнозы, просчитывать экологические риски, связанные с природным и антропогенным влиянием на морские экосистемы. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет», а также научными организациями, изучающими процессы гидродинамики и биологической кинетики.

5. Недостатки и замечания

Считаю необходимым сделать следующие замечания и комментарии:

1) Не вполне ясно изложена цель проведения описанных в разделе 3.3 вычислительных экспериментов с системой ОДУ (3.33), описывающей случай пространственно-однородной динамики модели. Правильно ли будет сказать, что данные

расчёты демонстрируют, что при выбранных значениях параметров в системе (3.33) устанавливается стационарный режим? Ещё одно замечание к этому же разделу: поскольку значения параметров приведены в Таблице 3.3, их не нужно было дублировать в тексте на стр. 117.

2) В диссертации явно не указаны источники значений параметров, которые использовались в вычислительных экспериментах с программным комплексом. Неясно, какие именно параметры взяты из цитируемых диссертантом работ других авторов, а какие являются результатом идентификации или калибровки модели.

3) Описание снимка Азовского моря на стр. 138–139, сделанного спутником “Aqua” во время летней вспышки цветения фитопланктона (рис. 4.4): *«На снимке отчетливо видно распространение зелёных и сине-зелёных водорослей в области Таганрогского залива и диатомовых водорослей в центральной части моря»*. — Поскольку сам по себе снимок не позволяет различить распределение конкретных групп фитопланктона, данное утверждение скорее должно базироваться на мнении экспертов–гидробиологов, а также на результатах работы созданного диссертантом программного комплекса.

4) К сожалению, представленные на рисунках 4.5–4.24 карты пространственного распределения водорослей и биогенных элементов не дают представление о полной картине динамики по времени, к тому же, на них отсутствуют даты. Это затрудняет восприятие и интерпретацию результатов моделирования. Кроме того, в описании разработанной модели следовало бы уточнить, что она предназначена, прежде всего, для краткосрочного, а не многолетнего прогноза.

5) В диссертации встречаются опечатки, грамматические и синтаксические ошибки.

Считаю, что отмеченные замечания не являются критическими и не ставят под сомнение общую положительную оценку диссертации Ю.В. Беловой.

6. Оценка диссертации в целом

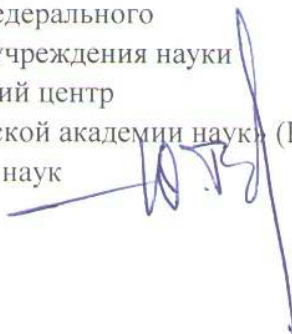
Диссертация Беловой Ю.В. «Математическое моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России» является законченной научно-квалификационной работой, представляющей решение актуальных задач динамики биогеохимических процессов в мелководных водоёмах средствами математического моделирования. Основные результаты диссертации в достаточной степени полно и своевременно отражены в научных публикациях. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Тема диссертационной работы соответствует специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Область исследования соответствует паспорту специальности 05.13.18 в пп. 1, 2 и 5. Автором проделана большая самостоятельная работа на должном квалификационном уровне, получены новые результаты, имеющие важное научное и практическое значение.

Полагаю, что диссертация «Математическое моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней (постановление Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Белова Юлия Валериевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент –

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), доктор физико-математических наук



(ЮНЦ РАН),

Юрий Викторович ТЮТЮНОВ

Юрий Викт. Тютюнов
д.ф.м.н. Ю.В. Тютюнов
Член секретари ЮНЦ РАН
Тютюнова Ю.В.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН)
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41
Тел.: (863) 250-98-07 (доб. 314)
E-mail: tyutyunov@sfedu.ru; yuri.tyutyunov@yandex.ru