

На правах рукописи

КАТРАСОВ Сергей Валериевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЙОНОВ РАЗМЕЩЕНИЯ И ОЦЕНКА
ПРОДУКТИВНОСТИ ПЛАНТАЦИЙ МАРИКУЛЬТУРЫ НА ОСНОВЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 1.6.21 Геоэкология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Владивосток – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Тихоокеанский институт географии» Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Бугаец Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования динамики геосистем Тихоокеанского института географии ДВО РАН

Официальные оппоненты: **Четырбоцкий Александр Наумович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии гипергенных процессов Дальневосточного геологического института ДВО РАН

Дубина Вячеслав Анатольевич, кандидат географических наук, заведующий лабораторией гидрологических процессов и климата Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Ведущая организация: «Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского» ДВО РАН

Защита диссертации состоится 26 апреля 2024 года в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.500.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио 7, зал заседаний, 2-ой этаж;
email: geogr@tigdvo.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе Центральной научной библиотеки при Тихоокеанском институте географии ДВО РАН и на сайте <http://www.tigdvo.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Родникова Илона Мироновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования связана с задачами планирования новых и оптимизации существующих марикультурных хозяйств, разработки информационных и моделирующих систем, внедрения в практику продукционной гидробиологии и природопользования методов определения оптимальной продукции культивируемых видов, и объёмов пространства, в которых аквакультуру возможно поддерживать в течение длительного периода без ущерба для окружающей среды. Обоснование наиболее эффективных форм развития аквакультуры является сложной и окончательно нерешенной задачей [McKindsey et al. 2006; Ferreira, et al. 2008; Гаврилова, 2012; Aguilar-Manjarrez, et al. 2017]. Эффективность культивирования является результатом взаимодействия биотических (обеспеченность пищевых потребностей гидробионтов) и абиотических факторов (температура, солёность, скорость течения, содержание растворенного кислорода) в прибрежной экосистеме, учет влияния которых, как и их интегрального воздействия, остается сложной задачей, поскольку об эффекте взаимодействия и характере пространственно-временной изменчивости этих параметров обычно известно намного меньше, чем необходимо для обоснования и планирования марикультурной деятельности. Указанные проблемы в значительной степени могут быть решены путем проведения комплексных исследований с привлечением результатов гидродинамического и биогеохимического моделирования, позволяющих объективно учесть пространственную неоднородность условий культивирования гидробионтов и сделать мотивированный выбор районов выращивания и размещения установок с учетом эффективности производства и рисков, возникающих в результате воздействия неблагоприятных гидрометеорологических факторов, в том числе в условиях недостатка или отсутствия данных наблюдений. Данное исследование посвящено разработке методических и практических подходов к решению обозначенных выше задач.

Целью исследования является разработка методов определения мест оптимального размещения плантаций марикультуры и долгосрочного прогноза продуктивности гидробионтов, в условиях недостатка или отсутствия данных наблюдений за параметрами среды культивирования на основе комплекса численных моделей, описывающих условия формирования стока на прилегающем к акватории водосборе, продуцирования и перераспределения первичной продукции по акватории в результате воздействия гидродинамических факторов.

Основными задачами исследования являются:

- провести анализ проблем и перспектив развития методов определения и оценки продуктивности районов культивирования марикультуры;
- рассчитать гидродинамический режим бухты Воевода (о. Русский) и построить пространственные распределения обеспеченных значений горизонтальных скоростей течений и солёности, с учетом влияния берегового стока;

- на основе данных гидродинамического и биогеохимического моделирования выполнить расчет пространственного распределения обеспеченных значений продуктивности гидробионтов при садковом и донном выращивании;
- выполнить районирование акватории объекта исследования по условиям культивирования гидробионтов и дать общие рекомендации по практическому использованию полученных картосхем;

Объектом исследования является бухта Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море) – один из наиболее перспективных районов для марикультурной деятельности, расположенный на юге Приморского края.

Предметом исследования является пространственная изменчивость доминирующих факторов, определяющих эксплуатационную емкость вмещающих экосистем и устойчивость функционирования плантаций двустворчатых моллюсков.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК, шифр 1.6.21 – Геоэкология (Науки о Земле) по пунктам: 1.6. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности. Геоэкологические последствия природных и техногенных катастроф; 1.14. Моделирование геоэкологических процессов; и 1.16. Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов.

В ходе исследования определены последствия катастрофических паводков для объектов аквакультуры в районе исследования и риски культивирования, выраженные в виде обеспеченных значений продуктивности моллюсков в зависимости от изменчивости условий выращивания. Проведено моделирование гидрологических и биогеохимических характеристик вод, и динамики продуктивности гидробионтов в районе исследования. Построены карты обеспеченных значений продуктивности гидробионтов и распределения гидрологических и биогеохимических характеристик вод в районе исследования. Даны общие рекомендации по использованию представленных картосхем при планировании марикультурной деятельности.

В качестве методической основы использованы четыре модели: формирования стока (SWAT 2012); гидродинамики (Delft3D-Flow); биогеохимии (DELWAQ) и управления системой аквакультурных ресурсов (FARM), региональные рекомендации по выращиванию гидробионтов [Кучерявенко, Жук, 2011, Гаврилова, 2011], методы физического и биогеохимического моделирования, статистического и пространственного анализа.

Научная новизна заключается в применении набора численных моделей для разработки региональной методики районирования прибрежных акваторий и оценки продуктивности марикультурных хозяйств с учетом

факторов риска, связанных с экстремальным воздействием гидрометеорологических условий.

Практическая значимость проведенных исследований. В представленной работе с помощью интеграции широко применяемых в мировой практике численных моделей, продемонстрирован пример технического решения, направленного на обеспечение устойчивого развития и поддержки принятия решений в области управления ресурсами аквакультуры. Представленные картосхемы благоприятных районов разведения и обеспеченных значений модельной продуктивности гидробионтов могут быть использованы при планировании размещения садковых и придонных плантаций с учетом гидродинамического режима, особенностей производства и обеспеченности первичной продукцией, оптимальных с точки зрения допустимых для каждого отдельного производителя рисков. Результат диссертационной работы – «Метод определения районов размещения плантаций марикультуры на основе результатов гидродинамического моделирования» представлен в информационном сборнике «Важнейшие научные результаты, полученные в 2019–2020 годах в ходе выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, готовые к практическому применению» (Российская академия наук, Москва, 2022, <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=276bc40f-6196-4bff-9b2d-605aeca1d783#content>, дата обращения 30.12.2023).

Основные положения и выводы диссертационного исследования могут быть использованы при реализации национальной программы долгосрочного развития Дальнего Востока (до 2030 г.), в которой одним из перспективных направлений для южных районов ДФО определена марикультура, а также региональных программ повышения эффективности, проводимой в стране государственной политики в области устойчивого природопользования.

Защищаемые положения:

1. Типовая структура моделей и методов статистической и пространственной постобработки результатов позволяет разрабатывать вероятностные долгосрочные прогнозы продуктивности водных объектов и пространственно-временную изменчивость основных параметров, которые определяют планирование марикультурной деятельности с учетом рисков воздействия неблагоприятных гидрометеорологических факторов.

2. Метод районирования прибрежных акваторий на основе результатов гидродинамического моделирования с учетом распределенного и руслового притока пресных вод к акватории с выделением линий равной обеспеченности значений скоростей и солености, входящих в диапазон благоприятных условий культивирования, является основой выделения зон культивирования марикультуры.

3. Карты пространственного распределения обеспеченных значений продукционных характеристик и продуктивности плантаций позволяют выполнять долгосрочное планирование марикультурной деятельности на основе вероятностной оценки повторяемости событий, при которых будут превышены допустимые критерии выживаемости для гидробионтов по физико-химическим и биологическим параметрам.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Полученные результаты согласуются с основными достижениями мировой науки и региональными данными в области исследований. Моделирование процессов формирования стока и гидродинамического режима выполнено с помощью широко известных численных моделей с открытым кодом на основе данных сети гидрометеорологического мониторинга Росгидромета и результатов исследований институтов ДВО РАН. При расчете продуктивности плантаций использованы региональные рекомендации по культивированию гидробионтов.

Личный вклад автора. Все результаты работы, включая моделирование процессов формирования стока на водосборе, гидродинамических, биогеохимических и продукционных процессов на акватории района исследования, статистический анализ результатов моделирования и построение карт пространственного распределения обеспеченных значений были выполнены лично автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы и использование результатов.

Исходные материалы получены в рамках работы автора по теме Государственного задания Тихоокеанского института географии ДВО РАН – FWMW-2024-0003. Основные положения диссертации доложены в ходе трех научных конференций: 1) «Геосистемы северо-восточной Азии: природа, население хозяйство территорий», Владивосток, 23-24.04.2021; 2) «XVI научное совещание географов Сибири и Дальнего востока», Владивосток, 28.09–01.10. 2021; 3) «Геосистемы северо-восточной Азии: географические факторы динамики и развития их структур», Владивосток, 21-22.04.2022.

Публикации. По теме исследования опубликовано 7 работ, отражающих основные положения исследования, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и индексируемых международной системой цитирования Web of Science.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 118 страниц основного текста, 2 таблицы, 26 рисунков. Список использованной литературы включает 267 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, всем соавторам, принявшим участие в проведении

исследования и публикациях, сотрудникам лаборатории гидрологии и климатологии ТИГ ДВО РАН за конструктивные советы при подготовке диссертации, а также коллективу Приморского УГМС, предоставившему данные гидрометеорологического мониторинга.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная и практическая значимость темы диссертации, описана структура и методология исследования.

Глава 1. Современное состояние вопросов использования численного моделирования для оценки продуктивности марикультуры и природопользования в прибрежной зоне

Модели водных экосистем имеют относительно долгую историю развития, в течение которой они с различным успехом применялись к пресноводным, эстуарным и морским экосистемам. Ранние модели были довольно простыми, их пространственная структура была основана на однородном вертикальном распределении расчетных элементов и «двухблочном» наложении эпилимниона и гиполимниона. Первая попытка полного математического описания динамики биотико-абиотических процессов в водных экосистемах, была предпринята в рамках Международной биологической программы (МБП) [MacIntosh et al., 1994]. Первые модели МБП были предназначены, главным образом, для количественной оценки эвтрофикации водоемов. На их основе были созданы динамические модели, позволяющие получить пространственно-временную оценку изменения моделируемых параметров, первая подобная модель - DEPOMOD [Cromeu et al., 2002; FAO, 2009].

Следующим этапом развития стали модели пищевых сетей, основанные на оценке баланса масс питательных элементов в экосистеме. Наиболее известными из которых являются AquaFarm, CADS_TOOL, FARM, POND, EcoWin2000 и EwE (Ecopath with Ecosim) [Wolff et al., 2000]. Основное преимущество этих моделей заключается в том, что они позволяют одновременно изучать взаимодействие различных биологических видов и разных трофических уровней, а также определять доминирующие части пищевой сети, характеризующиеся нисходящими или восходящими потоками энергии в общем балансе масс.

Относительно недавний прогресс в моделировании водных экосистем связан с разработкой интегрированных систем моделирования, включающих физико-математические гидроэкологические модели формирования стока, терригенного материала, питательных и загрязняющих веществ на водосборе и гидродинамических и биогеохимических моделей пресноводных и морских акваторий. Обобщённая структурная схема интегрированной системы моделирования водной экосистемы, на примере SMILE (Sustainable Mariculture in northern Irish sea Lough Ecosystems) и IMPAQT (Intelligent management system for the integrated multi-trophic aquaculture) объединяет

системы сбора и обработки информации, гидрологическую информацию о районе размещения фермы марикультуры, реляционные базы данных, модели разномасштабных экосистемных процессов (гидроэкологические, гидродинамические, роста отдельных типов моллюсков и многолетней аквакультурной деятельности), обеспечивающие расчет численных показателей состояния водной экосистемы, необходимых для управления рисками, интегрирует инструменты обобщения, анализа и визуализации этих данных, в том числе с помощью географических информационных систем (ГИС) [Silva et al., 2011].

Российский подход к моделированию продуктивности водных объектов основан на использовании определения первичной продукции [Ризниченко, Рубин, 1993]. В настоящее время разработан ряд разномасштабных имитационных моделей первичной продукции: Белого моря [Бульон, Бергер, 2020], Тихого океана [Меншуткин, 1993], Японского моря [Меншуткин, 1974], залива Петра Великого [Тихомирова, 2019], Амурского и Уссурийского заливов Японского моря [Тихомирова, 2008]. На Дальнем Востоке Российской Федерации до настоящего времени при планировании марикультурной деятельности преобладают экспертные оценки потенциала районов, основанные на анализе физико-географических условий выращивания, общих продукционных характеристиках вод и представлениях о трофических потребностях выращиваемых объектов [Брегман, 1994, Гаврилова, 2012]. Проблемы размещения и функционирования плантаций, как и проблемы, связанные с продуктивностью объектов марикультуры в зависимости от гидрологических факторов среды, остаются недостаточно изученными.

Глава 2. Объекты исследования

Бухта Воевода – полузакрытая бухта Амурского залива, расположена на западном побережье о. Русский (залив Петра Великого, Японское море) (рисунок 1). Площадь бухты около 4 км², включает в себя две бухты – Круглую (1.6 км²) и Мелководную (2.4 км²). Климат в районе исследований умеренный, муссонный. Преимущественным направлением ветров является северное (37 %). По данным метеостанции “Владивосток” (31960) Приморского УГМС за период моделирования (1989–2019 гг.) средняя скорость ветра составляла 5.8 м/с, максимальная – 36.0 м/с. Среднегодовое количество осадков составляет 848 мм; среднемесячная относительная влажность воздуха варьирует от 58 до 91 %; минимальная, максимальная и средняя температура воздуха характеризуются величинами минус 25.2, 32.8 и 9.2 °С соответственно.

В периоды активного циклогенеза и выхода тайфунов существенное влияние на гидрологический режим бухты оказывает приток пресных вод с прилегающего водосбора. Большую часть водосбора бухты занимает река Русская, устье которой расположено в вершине бухты Мелководной, истоки реки располагаются на южных склонах горы Русской (высота - 291 м). Длина реки - 5 км, площадь водосбора - 17.18 км², ширина русла изменяется в пределах от 0.4 до 2-х метров, в районе устья до 6-8 м, уклон реки - 32 ‰.

Наблюдения за стоком р. Русской ранее не велись, в литературных источниках лишь приводятся данные отдельных оценок. Измеренный в октябре 2019 г. специалистами ТИГ ДВО РАН расход воды в районе устья составил $0.035 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный расход, оцененный по меткам высоких вод, может достигать величины $14 \text{ м}^3/\text{с}$, модуль стока $800 \text{ л}/(\text{с км}^2)$.

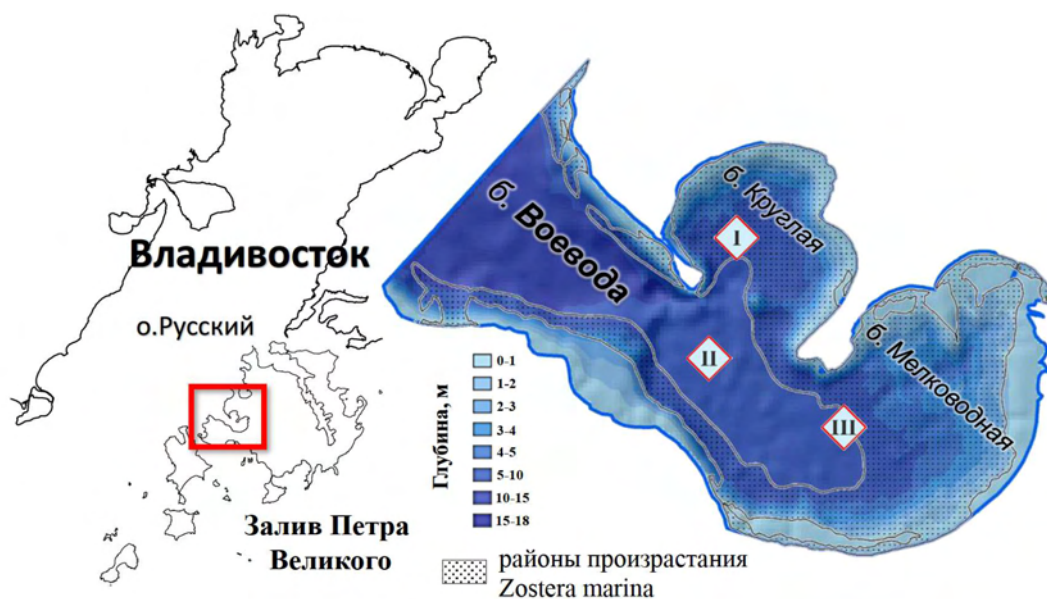


Рисунок 1. Бухта Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море), (I, II, III) - контрольные точки оценки условий культивирования устрицы (*Magallana gigas*), районы произрастания морской травы (*Zostera marina*).

Водообмен в б. Воевода определяется циклонической циркуляцией течений, средняя величина прилива составляет 0.2 м с максимальной амплитудой 0.43 м . Рельеф дна большей части б. Мелководная очень пологий, без резких перепадов. В мористой и средней частях бухты осуществляется свободный обмен с морскими водами. В бухтах Мелководная и Круглая под влиянием прилива и батиметрии формируется циклоническая циркуляция. Во время сильных дождей в период циклонов и выхода тайфунов граница влияния стока р. Русская со значениями солености $20\text{--}24 \text{ PSU}$ в среднем и придонном слоях достигает входа в б. Круглая и распространяется до центральной части б. Воевода (Барабанчиков и др., 2015).

На дне бухты преобладают бурые водоросли саргассум бледный *Sargassum pallidum* и морская трава *Zostera marina*. Морская трава покрывает 87% площади дна бухты, на дне встречаются промысловые виды моллюсков: тихоокеанская мидия *Mytilus trossulus*, устрица гигантская *Magallana gigas* и гребешок приморский *Mizuhopecten yessoensis*. Имеющиеся в литературе данные по распределению гидробионтов и условиям их обитания в бухте Воевода малочисленны [Ляшенко, 2005; Гаврилова, 2011]. В настоящее время в бухте Воевода на марикультурных хозяйствах культивируют приморского гребешка и тихоокеанскую мидию, рассматривается возможность выращивания устрицы гигантской.

Глава 3. Структура моделирующего комплекса

В работе для определения продуктивности акватории водного объекта выполнена интеграция моделей формирования стока на водосборе водного объекта, гидродинамики, качества воды и роста моллюсков. На (рисунок 2) представлена структура использованного в работе моделирующего комплекса, включающего четыре модели: 1) гидрологическая (SWAT), 2) гидродинамическая (Delft3D Flow), 3) биогеохимических процессов (DELWAQ) и 4) управления ресурсами аквакультуры (FARM). Для визуализации и пространственного анализа результатов расчетов используется геоинформационная система (ГИС). В главе приведено краткое описание каждой из используемых моделей, включая основные расчетные блоки, структуру, входные и выходные данные.

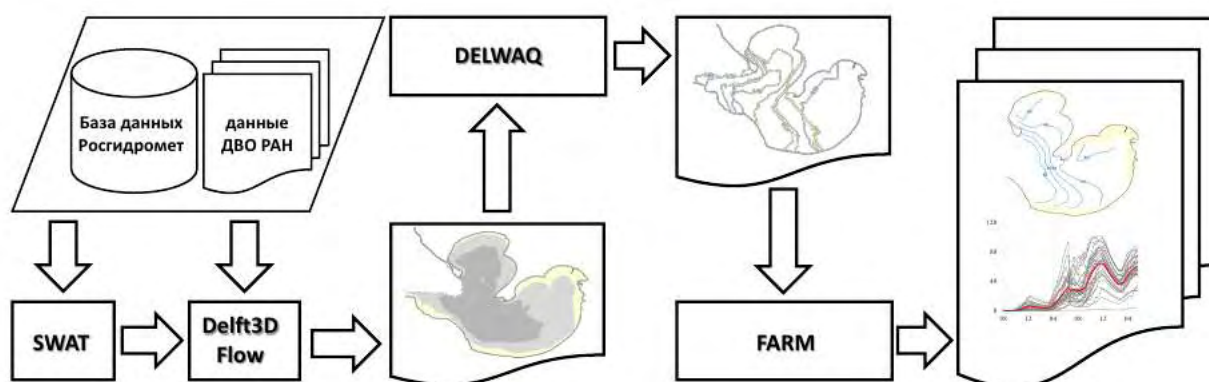


Рисунок 2. Структура моделирующего комплекса.

Глава 4. Оценка продуктивности акватории бухты Воевода при выращивании устрицы гигантской

4.1. Моделирование гидродинамического режима бухты Воевода

Для моделирования гидродинамического режима бухты использовано две модели: 1) гидрологическая - модель формирования стока на водосборе бухты; 2) гидродинамическая - модель динамики гидрологических параметров бухты. Данные о суточном притоке пресной воды, вычисленные с помощью гидрологической модели, использованы в качестве боковых граничных условий в гидродинамической модели. Моделирование выполнено непрерывно за период 01.01.1988-01.01.2019 гг. Для обеспечения согласования численного решения в пределах расчетной области и изменяющихся во времени граничных условий, для выхода модели на устойчивый режим и минимизации влияния задания начальных условий на результаты моделирования, расчеты за первый год были исключены из анализа. Метеорологическое воздействие на поверхность водосбора и бухты задано на основе архивных данных гидрометеорологических наблюдений на метеостанции Владивосток-Гора с учетом требований к входным данным и временного разрешения каждой из моделей.

В работе использован исходный код модели SWAT 2012 v.637. Подготовка моделирования выполнена с помощью ГИС-интерфейса ArcSWAT с использованием цифровой модели рельефа SRTM30, ландшафтной карты о. Русский [Ганзей и др., 2016], базы данных гидрологических свойств почв [Терешкина и др., 2013]. Речной бассейн, согласно представлениям о естественных характеристиках склонов и водотоков (длинах и уклонах), разделен на частные водосборы размером ~1-2 км² [Гарцман и др., 2008]. Параметры модели были заданы по принципу ландшафтного сходства на основе ранее полученных результатов исследований гидрологического цикла малых водосборов на юге Приморья [Бугаец и др., 2018].

Расчеты выполнены с суточным шагом по времени. Рассчитанный гидрограф притока в замыкающем створе р. Русская при прохождении катастрофического паводка 1990 года представлен на (рисунок 3). Модельные значения меженного стока р. Русская составил 0.02-0.03 м³/с. Расчетный максимум суточного расхода воды - 14.4 м³/с, что соответствует модулю стока 838 л/с·км². Полученные значения модуля паводочного стока согласуются с данными специальных воднобалансовых измерений на Приморской воднобалансовой станции (800-1000 л/с·км²). Незначительное весеннее половодье, резкие пики расходов во время прохождения максимальных паводков соответствуют гидрологическим особенностям формирования стока малых рек дальневосточного типа.

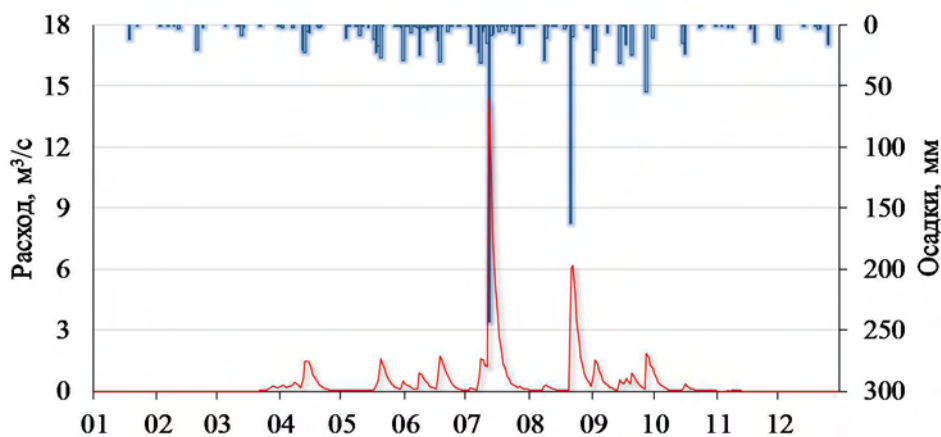


Рисунок 3. Измеренные осадки (метеостанция Владивосток) и расчетный гидрограф стока р. Русская за 1990 г.

Цифровая модель рельефа дна б. Воевода создана средствами Delft3D на основании данных навигационной карты (М 1:500, лист 66068) и эхолокации. Для представления батиметрии использовались прямоугольная расчетная сетка с разрешениями: 20 м по горизонтали и 3 σ-слоя по вертикали. На открытой границе на входе в б. Воевода заданы параметры гармонических постоянных прилива по данным поста Владивосток. Сезонная соленость для открытой границы была установлена на основе данных ДВНИГМИ (декабрь–февраль 34.43 PSU; март–май 33.0 PSU; июнь–август 32.6 PSU; сентябрь–ноябрь 32.82 PSU). Скорость и направление ветра на весь расчетный период заданы с дискретностью 3 часа. Относительная влажность воздуха, балл

облачности, температура воздуха, атмосферные осадки, выпадающие непосредственно на акваторию б. Воевода заданы с суточным разрешением. Данные о боковом притоке пресных вод заданы в виде суточного гидрографа притока ($\text{м}^3/\text{с}$). Для этого сток с каждого расчетного элемента гидрологической модели SWAT, непосредственно примыкающего к акватории бухты, был равномерно распределен между ячейками расчетной сетки модели Delft3D, примыкающих к расчетному элементу SWAT. В местах впадения модельных водотоков SWAT задан суточный гидрограф стока в замыкающих створах этих водотоков.

Расчеты выполнены с шагом по времени 15 сек, результаты моделирования выводились с дискретностью 6 часов. Анализ результатов гидродинамического моделирования позволил определить основные особенности структуры приливо-отливных течений и пространственного распределения солёности в б. Воевода. Приливная циркуляция вод в бухте Воевода и бухтах второго порядка Мелководная и Круглая формируется под влиянием неправильного полусуточного прилива (рисунок 4а). Основными факторами, определяющими структуру течений, являются рельеф дна и фаза прилива. Расчетное значение максимального ветрового нагона, вызванного штормовыми ветрами тайфуна «Робин» (13.08.1990 г.) в районе восточного побережья бухты Мелководная составило 0.19 м (рисунок 4 б).

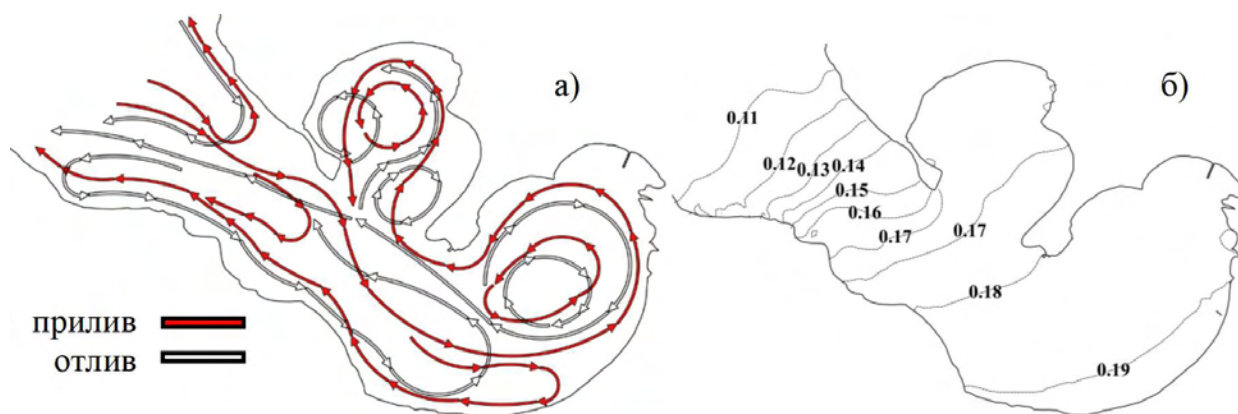


Рисунок 4. Результаты моделирования: а) структура приливо-отливных течений, б) уровень моря (м) в 18.00 13.08.1990 г.

Режим солёности определяется водным балансом, который зависит от притока вод открытого моря, внутреннего водообмена в бухте, притока пресных вод с ее водосбора, а также осадков, выпадающих непосредственно на акваторию бухты. В мористой и средней части бухты осуществляется свободный обмен с водами Амурского залива. Во время сильных дождей, связанных активной циклонической деятельностью и выходом тропических тайфунов, граница влияния стока р. Русская со значениями солёности 20–24 PSU в среднем и придонном слое достигает входа в б. Круглую и распространяется вплоть до центральной части б. Воевода (рисунок 5). Солёность в б. Мелководная в районе впадения р. Русская при прохождении катастрофических паводков может снижаться практически до полного распреснения (рисунок 5).

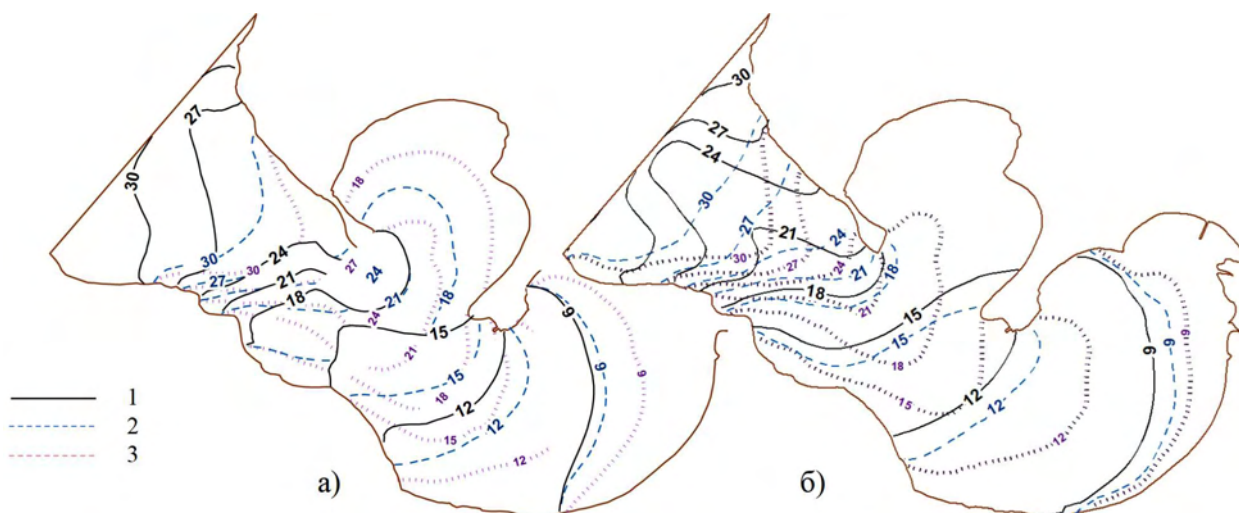


Рисунок 5. Пространственное распределение солености при прохождении катастрофического паводка 1990 г. по данным модельных расчетов: а) 13.07 12:00 и б) 14.07 06:00 в поверхностном (1), среднем (2) и придонном (3) σ -слое модели Delft3D.

4.2. Определение оптимальных участков культивирования устрицы гигантской

M. gigas - эвригалинный вид, хорошо переносящий распреснение и выдерживающий понижение солености до 5 PSU. Минимальная солёность, при которой *M. gigas* может питаться составляет 12 PSU. Верхняя граница оптимального диапазона солености находится в интервале 23-28 PSU. Поскольку основной способ питания двустворчатых моллюсков – фильтрация, среди важных абиотических условий выращивания марикультуры указывается наличие незначительных скоростей течений (0.02-0.05 м/с) [Shatkin et al., 1997; Карпевич, 1998].

Для определения оптимальных районов культивирования устрицы гигантской результаты моделирования для каждой ячейки расчетной сетки и каждого расчетного σ -слоя были представлены в виде временных рядов, солености и горизонтальных компонент скорости течения, и построены соответствующие эмпирические кривые обеспеченности. Данный подход позволил для каждого расчетного слоя модели получить пространственное распределение обеспеченных значений гидрологических характеристик (рисунок 6).

Данные о плотности естественных поселений *M. gigas* в б. Воевода были сопоставлены с пространственным распределением обеспеченности модельных значений скоростей течений и солености, входящих в диапазон благоприятных условий, указанных в литературных источниках и инструкциях по культивированию данного вида [Яковлев и др., 1981; Моисеев и др.; 1985, Супрунович и Макаров; 1990, Карпевич, 1998; Кучерявенко и Жук, 2011]. Для выделения зон выращивания подбирались линии равной обеспеченности, ограничивающие 100 % случаев обнаружения гидробионтов. В качестве минимального и максимального пределов оптимальных условий выращивания по халинным характеристикам приняты границы 80 %

обеспеченности солености 28 PSU и 95% обеспеченности 30 PSU соответственно. Оптимальные условия по скоростям течений ограничены линией 95 % обеспеченности скорости течения в придонном слое 0.02 м/с.

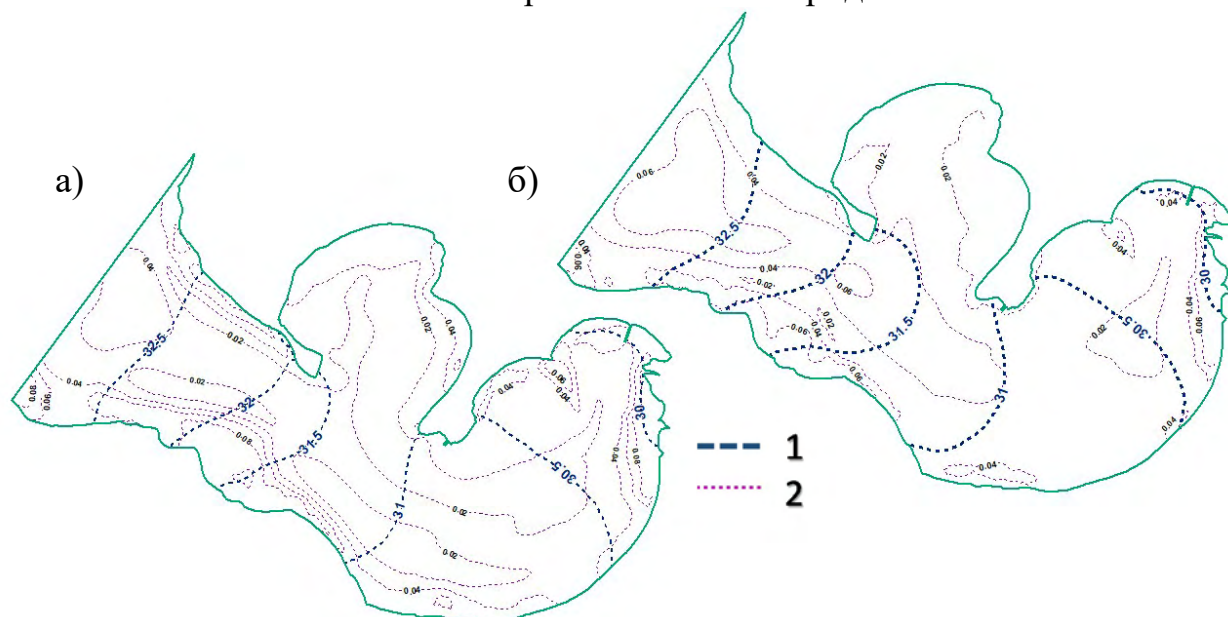


Рисунок 6. Пространственное распределение обеспеченных значений скорости течения и солености в поверхностном (а) и придонном (б) слое. Изолинии 75% обеспеченности (1) солености, PSU и (2) скоростей течения, м/с.

Линии равной обеспеченности указанных выше значений в среднем и придонном модельном слое были использованы для выделения зон садкового выращивания и границ донных плантаций устрицы гигантской (рисунок 7). Зоны донного выращивания ограничены изобатой – 1 м, садкового – 5 м. Площадь участков, оптимальных по параметрам солености и скоростей течений, для устрицы тихоокеанской составляет 1.93 км² (48 %) и 1.04 км² (26 %) для донного и садкового выращивания соответственно (рисунок 7). Наиболее благоприятными местами по гидрологическим условиям для роста и выращивания устрицы являются бухты Мелководная и Круглая. Границы выделенных зон можно интерпретировать как вероятность неперевышения (или незанижения) оптимальных значений. Например, указанная на (рисунок 7) граница зоны оптимального выращивания устрицы в 95 случаях из 100 обеспечивает неперевышение солености выше 30 PSU. Выбранные критерии не исключают кратковременного воздействия неблагоприятных факторов, при которых могут происходить определенные потери качества или объемов продукции.

4.3. Моделирование продукционных характеристик

Основным источником первичной продукции в районе исследования являются поля морских трав (*Zostera marina*) и планктонные диатомовые водоросли. При этом концентрация фитопланктона в зарослях трав значительно выше, чем в толще воды. С учетом этого на модельной расчетной сетке были выделены ячейки, входящие в области произрастания zostеры. На

открытой границе средняя температура и соленость воды заданы по данным сезонных измерений ТОИ ДВО РАН, содержание кислорода – как постоянное значение (9.21 г/м^3). Расчет концентраций *Chl-a* и детрита выполнен с использованием модулей DELWAQ ECO: “Macrophyte submerged 01” и “Marine Diatoms”. Для каждой расчетной ячейки получены суточные значения продуцирования органического вещества zostерой и фитопланктоном в единицах органического углерода (гС), растворенного кислорода (DO, г/м^3) и суммарной концентрации твердого неорганического (TPM, гС) и органического вещества (POM, гС) с учетом их перераспределения по району исследования под воздействием гидродинамических факторов.

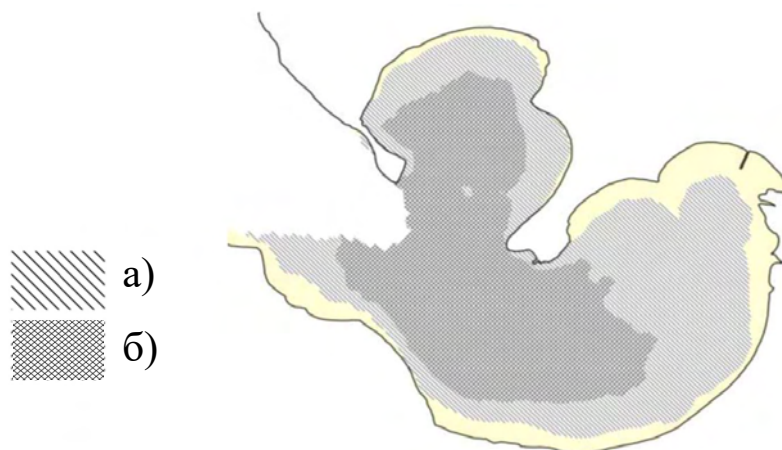


Рисунок 7. Участки оптимальные для донного (а) и садкового (б) выращивания устрицы гигантской в б. Воевода.

Входные параметры модели были заданы по литературным данным как постоянные значения на каждый расчетный шаг (сутки) для всего периода моделирования следующим образом: средний вертикальный водообмен ячеек расчетной сетки, расположенных в районах произрастания морских трав – $0.0017 \text{ м}^3/\text{с}$; продуцируемый zostерой кислород – 6 г/м^3 ; коэффициенты стехиометрии морских диатомовых водорослей заданы для трех, определенных в модуле ECO фенотипов: энергетический (MDIATOMS_E) – 0.24 гС/м^3 , азотный (MDIATOMS_N) – 0.21 гС/м^3 и фосфорный (MDIATOMS_P) – 0.21 гС/м^3 ; концентрации: частиц твердого неорганического вещества в воде IM1 – 7.9 г/м^3 ; твердых частиц органического углерода в воде POC1 – 33 гС/м^3 ; биомасса подводной растительности SM1 – 0.003412 гС . Пространственное распределение значений 75% обеспеченности концентрации модельных значений *Chl-a*, POM и DO представлены на (рисунок 8).

4.4. Моделирование продуктивности устрицы гигантской

Выходные данные DELWAQ ECO были осреднены по площади $100 \times 100 \text{ м}$ (5×5 расчетных ячеек), что соответствует оптимальному пространственному масштабу, моделирования FARM, и подготовлены в виде суточных рядов в формате входных данных модели. Согласно региональным рекомендациям, при расчете потенциальной урожайности плантаций устрицы были заданы

следующие товарные характеристики: вес – 100 г, товарный размер – 12 см; начало и продолжительность периода культивирования – 01 августа и 22 месяца соответственно; плотность посадки спата при донном выращивании – 100 экз/м², при садковом – 200 экз/м².

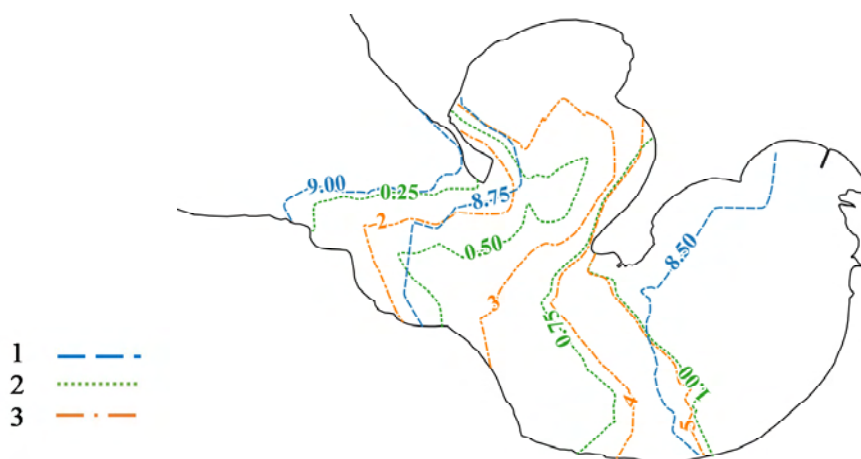


Рисунок 8. Пространственное распределение 75 % обеспеченных значений растворенного кислорода (DO) г/м³ (1), хлорофилла-а (*Chl-a*) мг/м³ (2) и взвешенного органического вещества (POM) (3) г/м³.

Анализ распределения смоделированных продукционных характеристик позволяет сделать заключение, что в районе исследований содержание растворенного кислорода не является лимитирующим фактором для производства первичной продукции и культивирования как для донного, так и для садкового способа выращивания устрицы. Концентрация *Chl-a* и POM в кутовых частях (бухты Мелководная и Круглая) находятся в диапазоне оптимальных значений, ближе к центральной части бухты концентрации уменьшаются и далее, в направлении входа в бухту Воевода, достигают минимальных значений.

Для демонстрации и анализа результатов моделирования выделен расчетный блок 100×100 м, находящийся в центральной части зоны оптимального выращивания гидробионтов в б. Мелководная (участок III, Рисунок 1). Графики моделирования прироста суммарного веса гидробионтов за каждый из 28 периодов и их осредненная кривая представлены на (рисунок 9). При указанных параметрах оптимальный период культивирования устрицы в б. Воевода в среднем составляет 12–13 месяцев. Минимальные значения прироста продукции соответствует началу периодов выращивания в 1994, 2000, 2012 и 2016 годах. Основной причиной слабого роста является пониженные за период культивирования средние значения солености (29.6–30.5 PSU), а также воздействие сильного кратковременного распреснения (18.4–22.9 PSU), вызванное влиянием значительного притока пресных вод в акваторию бухты, вызванных тайфунами (Мелисса - 1994, Боллавен, Проперун, Саомэй - 2000, Санба, Боллавен - 2012, Лайнрок - 2016) и активным циклогенезом (2000 год).

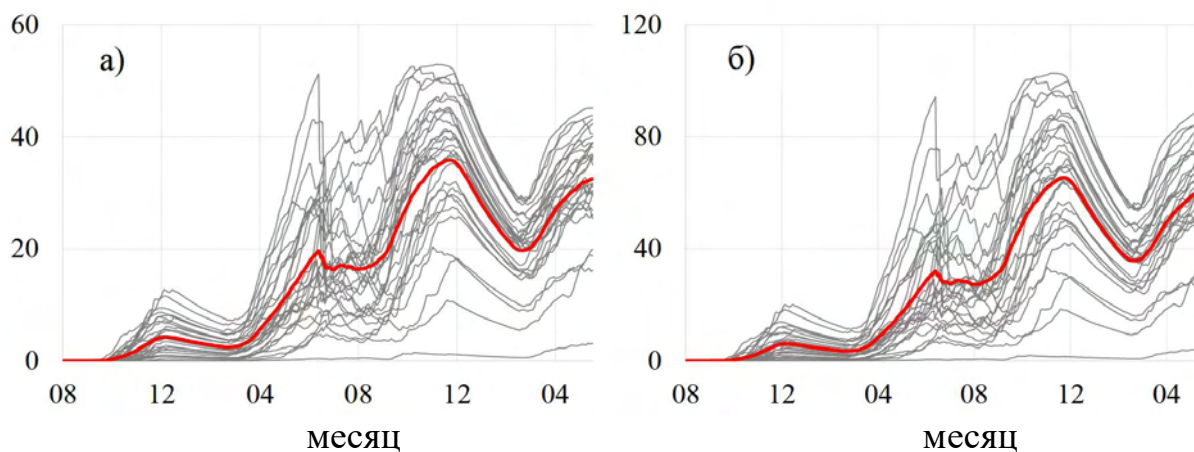


Рисунок 9. Графики прироста суммарного веса гидробионтов за каждый из 28 периодов и их осредненная кривая, донное (а) и садковое (б) культивирование.

Для расчетных элементов FARM за каждый период культивирования были выбраны максимальные значения продуктивности гидробионтов на второй год выращивания. Указанные значения были ранжированы и вычислены их эмпирические обеспеченности. Обеспеченные значения суммарной продуктивности бухты в тоннах общего сырого веса (total fresh weight, TFW) представлены в (таблица 1).

Таблица 1. Обеспеченные значения суммарной модельной продукционной емкости TFW (тыс. т) в б. Воевода.

Тип выращивания	S, км ²	TFW, тыс. т.					
		5%	10%	25%	50%	75%	95%
Садковое	1.04	2.37	2.26	1.88	1.44	1.20	0.75
Донное	1.93	3.35	3.24	2.88	2.48	2.19	1.53

Изолинии обеспеченных значений продуктивности имеют максимальные значения в кутовых частях бухт Мелководная и Круглая, минимальные – в районе центральной части бухты Воевода (рисунок 10). Если значение продуктивности 95% обеспеченности рассматривать в качестве гарантированного объемам продукции, то разница между ним и значениями обеспеченной продуктивности 75 и 50% для устрицы может достигать 10 т/га для придонного и 10–40 т/га для садкового выращивания, соответственно. Таким образом, полученные картосхемы могут быть использованы для вероятностной оценки повторяемости неблагоприятных событий, при которых будут превышены допустимые критерии выживаемости для гидробионтов, и определения оптимальных участков размещения, гарантирующих эффективную эксплуатацию мариферм при допустимых для производителя рисках.

4.5. Оценка пространственной неоднородности продуктивности устрицы гигантской в б. Воевода

Для демонстрации неоднородности условий выращивания в границах физической емкости бухты Воевода были выбраны три участка размером 100x100 м, расположенных в б. Круглая, б. Мелководная и в центральной

части б. Воевода, в районе входа в б. Круглая (рисунок 1). Для каждого из смоделированных периодов выращивания были выбраны максимальные значения урожайности устрицы, выраженной в тоннах общего сырого веса (рисунок 11).

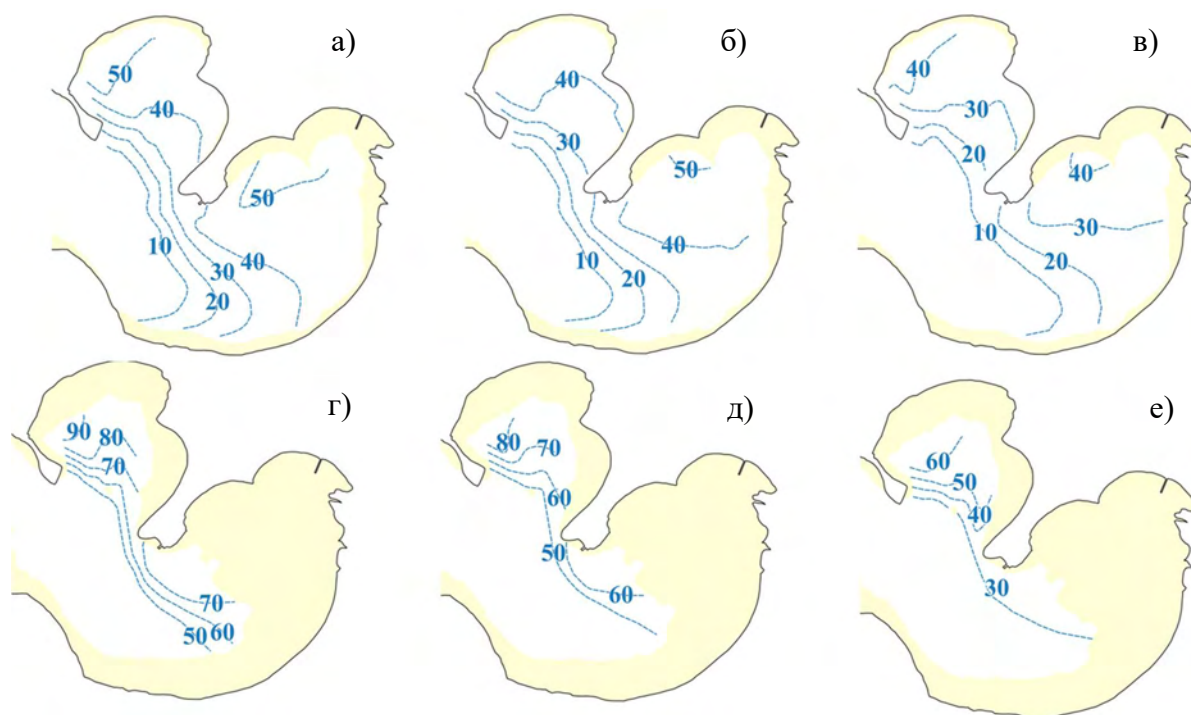


Рисунок 10. Пространственное распределение 50% (а, г), 75% (б, д) и 95% (в, е) обеспеченных значений модельной продуктивности для донного (а, б, в) и садкового (г, д, е) выращивания устрицы (т/га).

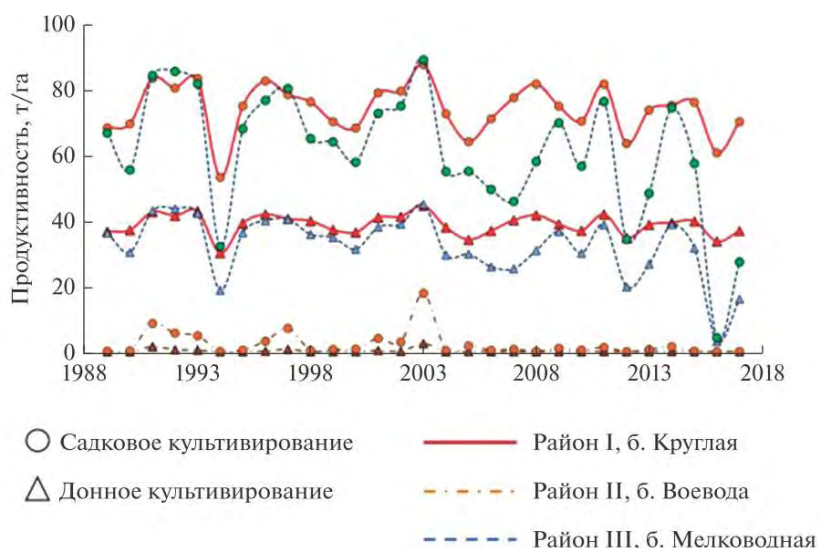


Рисунок 11. График модельной продуктивности (т/га) садкового и донного культивирования для трех выделенных районов в б. Воевода по данным моделирования с помощью FARM.

Из анализа полученных данных можно заключить, что по сравнению с внутренними бухтами, район II, расположенный в центральной части б. Воевода, характеризуется существенно менее благоприятными условиями для выращивания устрицы. Только для отдельных периодов выращивания

(1991-1992, 1997 и 2003 гг.) здесь удалось бы за 22-х месячный период культивирования вырастить урожай больше 5 т/га при садковом культивировании и от 0.5 до 2.5 т/га на пастбищных плантациях. В остальные годы значения модельной продуктивности составляют от 0 (2016 год) до 486 (в среднем 66) кг/га.

Гистограммы распределения продуктивности для каждого из районов (рисунок 12) характеризуют вариабельность значений TFW для всех расчетных периодов моделирования. Для района II в 70% процентах случаев модельная продуктивность не превышала 0.3 и 2 т/га для донного и садкового культивирования соответственно. Для участков, расположенных в б. Круглая и Мелководная около 60% значений модельной продуктивности для донного выращивания находится диапазоне 42-50 т/га. При садковом выращивании в 50% случаев продуктивность района I (б. Круглая) составляла от 78 до 95 т/га. Продуктивность района III (б. Мелководная) в 80% случаев превышала 50 т/га, при этом значения TWF достаточно равномерно распределены в указанном диапазоне. Низкая урожайность *M. gigas* в районе II (рисунок 1) прежде всего связана с менее благоприятными условиями роста гидробионтов. Перераспределение первичной продукции по акватории под воздействием гидродинамических факторов крайне неравномерно, во внутренних бухтах наблюдается ее избыток (в среднем 6-8 г/м³ РОМ и 1.5 мг/м³ *Chl-a*), а в более мористых участках дефицит (в среднем 2-3 г/м³ РОМ и около 0.5 мг/м³ *Chl-a*).

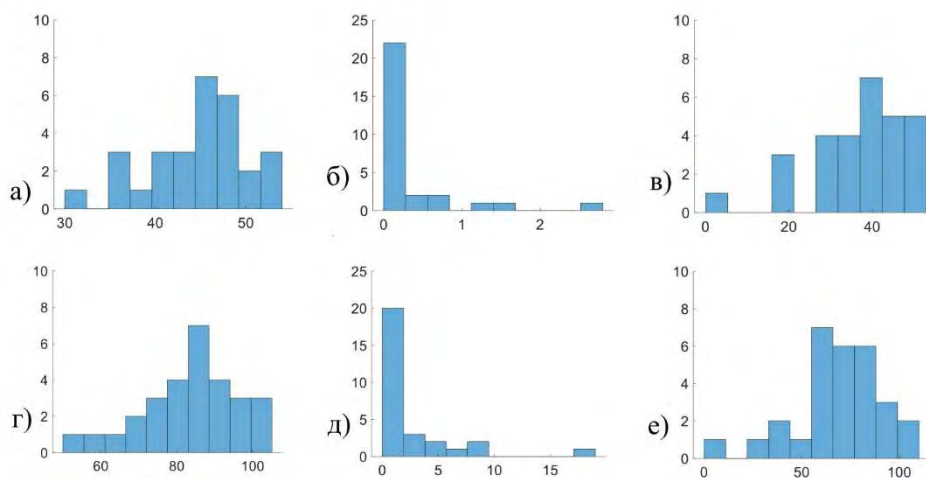


Рисунок 12. Гистограмма распределения продуктивности (т/га) для районов культивирования: №1 б. Круглая (а, г), района №2 центральная часть б. Воевода (б, д), района №3 б. Мелководная (в, е).

Построенные за весь период моделирования гистограммы *Chl-a* и РОМ (рисунок 13) для районов, расположенных во внутренних бухтах, достаточно хорошо описываются нормальным распределением. Параметры нормального распределения для района I (б. Круглая) и III (б. Мелководная) отличаются незначительно: среднее и дисперсия для РОМ по первому району 6.1 и 1.97, для второго района 6.2 и 1.76 соответственно. Для распределения *Chl-a* параметры распределений: для первого района среднее значений 1.18, дисперсия – 0.37, для второго района – 1.2 и 0.33 соответственно. Для района II, расположенного в центральной части б. Воевода, гистограммы *Chl-a* и РОМ

могут быть описаны логнормальным распределением, которое имеет выраженную положительную асимметрию, среднее и дисперсия для РОМ составляет 3.1 и 5.0, для *Chl-a* – 0.61 и 0.2. Количество первичной продукции здесь в основном находится в диапазоне низких значений и потенциальные возможности расположенных в данном районе участков культивирования значительно ниже.

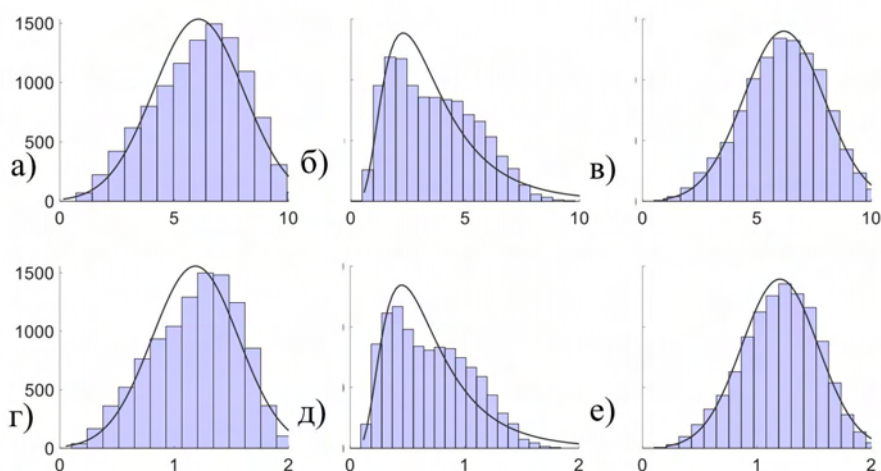


Рисунок 13. Гистограмма распределения РОМ г/м³ (а, б, в) и *Chl-a* мг/м³ (г, д, е) для районов культивирования: №1 б. Круглая (а, г), района №2 центральная часть б. Воевода (б, д), района №3 б. Мелководная (в, е).

Данные представленные на (рисунок 13) демонстрируют, что условия культивирования по критерию обеспеченности пищей для районов I и III, расположенных во внутренних бухтах намного лучше, чем в мористой части б. Воевода. В то же время несмотря на оптимальные концентрации трофических ресурсов в бухте Мелководная значения солености на короткое время (до 5-ти дней) практически достигают условий полного распреснения, что может приводить к значительной гибели урожая. В б. Круглая воздействие пресных вод не так резко выражено, условия культивирования более стабильны, соответственно смертность гидробионтов намного ниже, чем в районе II, расположенном в зоне воздействия паводкового стока р. Русская. В условиях минимального неблагоприятного воздействия пресных вод урожайность в бухтах Круглая и Мелководная практически одинакова – обеспечивают практически одинаковые условия выращивания как для донного, так и для садкового культивирования.

Заключение

Комплексное моделирование продуктивности мариферм, учитывающее влияние притока пресных вод с прилегающего к водному объекту водосбора, производство и перераспределение первичной продукции под влиянием гидродинамических факторов в отечественной практике культивирования марикультуры пока применяется редко. Необходимые компьютерные технологии и информационная поддержка подобных исследований еще недостаточно развиты. В данном исследовании, для определения мест размещения и определения потенциальной продуктивности донных и

садковых плантаций устрицы в бухте Воевода, было проведено численное моделирование динамики гидрологических и продукционных параметров бухты. Получены следующие основные результаты:

- Создана интегрированная система моделирования и предложены методы статистической и пространственной постобработки результатов, позволяющая разрабатывать вероятностные долгосрочные прогнозы продуктивности водных объектов с учетом рисков воздействия неблагоприятных гидрометеорологических факторов.
- С помощью гидрологической и гидродинамической моделей выполнен расчет гидродинамического режима б. Воевода, с учетом притока пресных вод к акватории. На основе пространственного распределения обеспеченных значений горизонтальных скоростей течений и солёности выделены участки с благоприятными условиями для пастбищного и садкового разведения устрицы гигантской (*M. gigas*), расположенные в бухтах Мелководная и Круглая.
- С помощью биогеохимической модели выполнен расчет продукционных характеристик и перераспределения первичной продукции по акватории, в результате воздействия гидродинамических факторов (наиболее высокопродуктивные участки расположены в кутовых частях бухт Круглая и Мелководная).
- Выполнен расчет продукции *M. gigas* с учетом региональных рекомендаций по культивированию, представлены картосхемы обеспеченных значений модельной продуктивности устрицы. Значения 50% обеспеченной модельной урожайности устрицы гигантской в высокопродуктивных районах достигают 80 – 90 т/га для садкового и 40 – 50 т/га для донного культивирования.
- На основе анализа пространственной динамики абиотических факторов показано, что возможности выращивания устрицы на локальных участках бухты главным образом определяются квазипериодическими изменениями солёности. При этом продуктивность культивирования зависит от трофических условий, определяемых производством и транспортом органического вещества под влиянием гидродинамических факторов.
- Показано, что по сравнению с внутренними бухтами, в центральной и мористой частях б. Воевода условия выращивания являются менее благоприятными для культивирования устрицы гигантской по абиотическим (солёность) и биотическим (содержание взвешенного органического вещества и хлорофилла-а) параметрам.
- Картосхемы обеспеченности продуктивности могут применяться как основа для выработки общих рекомендаций при долгосрочном планировании марикультурной деятельности в б. Воевода. Показано, что

если значения продуктивности устрицы 95% обеспеченности рассматривать в качестве гарантированного объема продукции, то разница между ним и значениями обеспеченной продуктивности 75 и 50% может достигать 10 т/га для донного и 10–40 т/га для садкового выращивания.

Представленные результаты моделирования продуктивности устрицы основаны только на учете факторов питания и гидрологического режима, которые наиболее важны на стадии выбора места размещения марифермы, культивируемого вида, а также на начальном этапе выращивания гидробионтов. После сооружения гидробиотехнических установок могут быть выполнены более точные оценки продуктивности, с учетом вторичной эвтрофикации акватории и взаимного ограничения водообмена, обусловленного типом и пространственной конфигурацией самих установок. Расчеты выполнены с учетом региональных рекомендаций по культивированию гидробионтов, использование отличных от указанных региональных параметров товарной продукции может привести к существенно отличающимся от приведенных в работе результатов моделирования.

Список опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. **Катрасов, С.В.** Определение районов размещения плантаций марикультуры на основе результатов гидродинамического моделирования / С.В. Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков, К.С. Ганзей, Л.В. Гончуков, О.В. Соколов, А.М. Лебедев, Н.Ф. Пшеничникова, С.М. Краснопеев // *Океанология*. - 2021. - Т. 61. - № 3. - С. 433-443.
2. **Катрасов, С.В.** Оценка продуктивности плантаций двустворчатых моллюсков на основе результатов моделирования / С.В. Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков, С.И. Масленников, В.Н. Лысенко, Ю.А. Барабанщиков, П.Я. Тищенко // *Океанология*. - 2021. - Т. 61. - № 5. - С. 759-768.
3. Бугаец, А.Н. Вероятностно-статистическая оценка потенциальной продуктивности марикультуры (на примере бухты Воевода, юг Приморского края) / А.Н. Бугаец, **С.В. Катрасов**, В.В. Жариков, С.И. Масленников // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. - 2022. - Т. 503. - № 1. - С. 41-45.
4. **Катрасов, С.В.** Оценка пространственной неоднородности условий культивирования тихоокеанской устрицы *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) с помощью модели управления марифермами FARM в бухте Воевода (Японское море) / С.В. Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков // *Биология моря*. – 2023. - Том 49. - № 1. - С. 37–44.

Прочие публикации:

1. **Катрасов, С.В.** Оценка производственной ёмкости бухты воевода на основе данных моделирования / С.В. Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков // В

- сборнике: Геосистемы Северо-Восточной Азии: географические факторы динамики и развития их структур. Сборник научных статей Десятой научно-практической конференции. - Владивосток, 2022. - С. 36-41.
2. **Катрасов, С.В.** Оценка физической емкости плантаций марикультуры б. Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море) на основе результатов гидродинамического моделирования / С.В Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков, С.М. Краснопеев // В сборнике: Материалы XVI Совещания географов Сибири и Дальнего Востока, 2021. - С. 283-286.
 3. **Катрасов, С.В.** Моделирование гидродинамического режима бухты Воевода / С.В Катрасов, А.Н. Бугаец, В.В. Жариков // В сборнике: Геосистемы Северо-Восточной Азии: природа, население, хозяйство территорий. - Владивосток, 2021. - С. 34-39.

КАТРАСОВ Сергей Валериевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЙОНОВ РАЗМЕЩЕНИЯ И ОЦЕНКА
ПРОДУКТИВНОСТИ ПЛАНТАЦИЙ МАРИКУЛЬТУРЫ НА ОСНОВЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата географических наук

Подписано к печати 21.02.2024 г.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 331.

Отпечатано: ООО «Спектр-А»
692760, г. Артем, ул. Кирова, 68, стр. 3