

УДК 541.183.5

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ МАРИКУЛЬТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ БУХТЫ ВОЕВОДА, ЮГ ПРИМОРСКОГО КРАЯ)

© 2022 г. А. Н. Бугаец<sup>1,\*</sup>, С. В. Катрасов<sup>1</sup>, В. В. Жариков<sup>1</sup>, С. И. Масленников<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН П.Я. Баклановым 12.11.2021 г.

Поступило 12.11.2021 г.

После доработки 14.11.2021 г.

Принято к публикации 15.11.2021 г.

На основе результатов моделирования выполнены расчеты обеспеченных (заданной вероятности превышения) значений продуктивности плантаций гигантской устрицы *Crassostrea gigasi* тихоокеанской мидии *Mytilus trossulus* в бухте Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море). Поля гидродинамики и солёности рассчитаны с помощью модели Delft3D Flow, с учетом притока пресных вод с водосбора бухты. Параметры продуцирования органического вещества и его перераспределения по акватории рассчитаны с помощью модели DELWAQ. Результаты гидродинамического и биогеохимического моделирования использовались в качестве исходных данных в модели управления марифермами FARM для расчета обеспеченных значений продуктивности гидробионтов. Построены карты пространственного распределения обеспеченных значений модельной продуктивности придонных и садковых плантаций. Показаны возможности их использования при планировании марикультурной деятельности.

**Ключевые слова:** марикультура, продуктивность, моделирование, Delft3D Flow, DELWAQ, FARM

**DOI:** 10.31857/S2686739722030069

### ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование природных ресурсов прибрежных территорий и акваторий является актуальной задачей практически во всех приморских регионах Северо-Восточной Азии. В последние десятилетия для дальневосточных районов России все более актуальными становятся разработка и использование теории и практики комплексного управления прибрежно-морскими зонами. Такие инструменты могут способствовать разработке важных рекомендаций и прогнозов, необходимых для планирования и принятия решений в региональном развитии на разных административных уровнях [1]. Актуальной задачей является создание информационной

базы для региональных программ и комплексного управления прибрежной зоной.

Одним из важных объектов экономического развития прибрежных территорий и акваторий являются марифермы, культивирующие двустворчатых моллюсков. Марикультура относится к приоритетным направлениям долгосрочного развития приморских районов Российского Дальнего Востока [1]. Однако на Дальнем Востоке, как и в целом в России, проблемы выбора оптимального размещения объектов марикультуры в зависимости от гидрологических и других природных факторов морской среды остаются недостаточно изученными.

В то же время 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 каждого из этих факторов, как и их интегрального воздействия, остается сложной задачей, поскольку об эффекте взаимодействия и характере пространственно-временной изменчивости этих параметров обычно из-

<sup>1</sup>Тихоокеанский институт географии  
Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Национальный научный центр морской биологии  
им. А.В. Жирмунского Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток, Россия

\*E-mail: andreybugaets@ya.ru

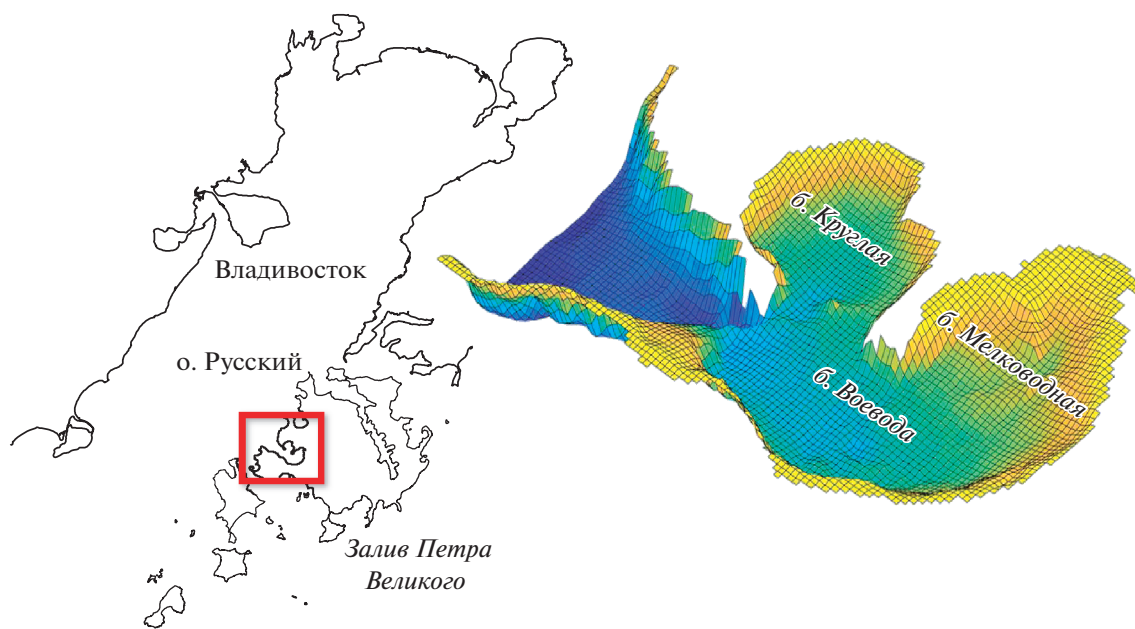


Рис. 1. Карта-схема района исследований, рельеф дна бухты Воевода.

вестно намного меньше, чем необходимо для обоснования и планирования марикультурной деятельности. Именно эти соображения послужили мотивацией применения в данном исследовании математического моделирования и теории вероятностей для разработки метода оценки потенциальной продуктивности гидробионтов, реализованного на примере бухты Воевода (о. Русский, залив Петра Великого).

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

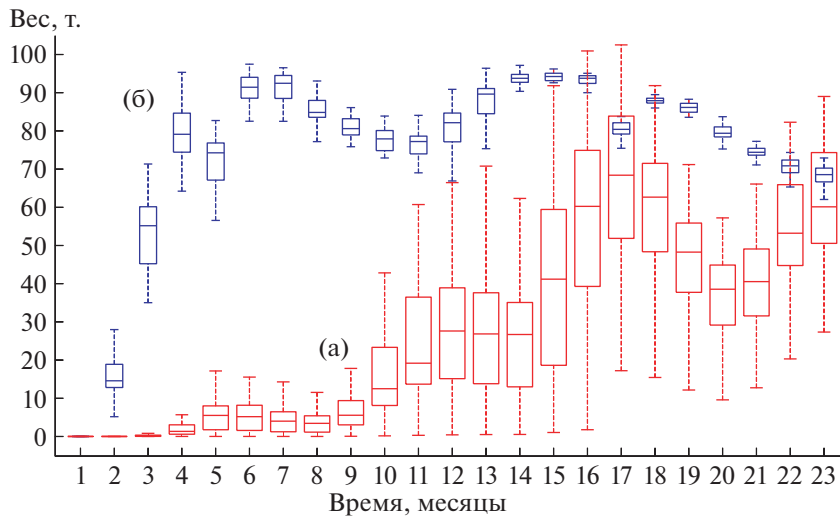
Бухта Воевода расположена на западном побережье о. Русский (рис. 1), имеет площадь около 4 км<sup>2</sup> и включает в себя две бухты второго порядка – Круглую (1.6 км<sup>2</sup>) и Мелководную (2.4 км<sup>2</sup>). Водообмен в бухте Воевода определяется циклонической циркуляцией течений, средняя величина прилива составляет 0.2 м (максимальная 0.43 м) [5]. Стационарные гидрологические наблюдения в бухте не велись. Сезонные гидролого-гидрохимические исследования проводились в 2011–2012 гг. [2].

В заливе Петра Великого гигантская устрица обитает на глубинах 0.5–7 м, местами образуя сплошные поселения (банки, устричники) на илисто-песчаных и скалистых грунтах. Это эвригалинный вид, живущий при солёности не ниже 12‰ [4], но выдерживающий краткосрочное опреснение до 5‰. Оптимальный диапазон солёности для устрицы 23–28‰. Тихоокеанская мидия преимущественно обитает в литорально-сублиторальной зоне на скалистых и каменистых грунтах, до глубины 2.5–3 м. Наиболее благоприятная для этого вида солёность 27–33‰ [5].

В работе использованы поля гидродинамики, рассчитанные с помощью трехмерной модели Delft3D Flow за период 01.01.1988–01.01.2019 гг. Речной сток в бухту и распределенный приток пресных вод с прилегающей к акватории бухты территории заданы на основе результатов гидрологического моделирования, выполненного с помощью модели SWAT [5]. Выделены области произрастания основного источника первичной продукции zostеры (*Zostera marina*) [6]. Ее продукционные характеристики – концентрации хлорофилла-а, органического вещества и взвешенных твердых частиц – рассчитаны с помощью биогеохимической модели DELWAQ (DELft WAter Quality) [7] с учетом неравномерного перераспределения по району исследования под воздействием гидродинамических факторов.

Указанные выше выходные данные модели DELWAQ агрегированы сеткой расчетных элементов площадью 100 × 100 м и использованы в качестве входных данных в модели управления ресурсами аквакультуры на фермах – FARM (Farm Aquaculture Resource Management) [8], предназначенной для предварительной оценки и анализа размещения плантаций и выбора культивируемых видов. Эта модель позволяет рассчитывать урожайность гидробионтов на основе данных о размерах марифермы, плотности посадки моллюсков, локальных трофических условиях и параметрах окружающей среды.

При расчете потенциальной продукции гидробионтов использованы следующие товарные характеристики, для устрицы: вес – 100 г, размер – 12 см; для мидии: вес – 12 г, размер – 6 см. Период



**Рис. 2.** Обобщенные графики прироста суммарного веса устрицы (а) и мидии (б) при садковом культивировании, рассчитанные с помощью модели FARM за 28 расчетных 22-месячных периодов (1989–2019 гг).

начала культивирования мидии – 01.06, устрицы – 01.08. Продолжительность периода культивирования каждого вида – 22 мес. Плотность посадочного материала (спата) при донном выращивании мидии и устрицы – 100 экз/м<sup>2</sup>, при садковом выращивании: для мидии – 420 экз/м<sup>2</sup>, для устрицы – 200 экз/м<sup>2</sup> [3, 4].

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Полученные за 30-летний период моделирования данные о продукционных характеристиках бухты позволили с помощью FARM выполнить расчет для 28-ми рекомендованных по региональной биотехнологии культивирования 22-месячных периодов выращивания рассматриваемых гидробионтов. Обобщенные графики прироста суммарного веса гидробионтов представлены на рис. 2. Полученные значения хорошо согласуются с сезонными особенностями роста моллюсков, обусловленными ходом температуры воды, продукцией фитопланктона, затратами на основной обмен, нерестовой активностью и постепенным усилением конкуренции за место.

Установлено, что урожайность мидии практически не зависит от пространственного распределения абиотических условий выращивания в б. Воевода. Устрица, напротив, демонстрирует значительную реакцию на сильные кратковременные распреснения бухты, связанные с обильными атмосферными осадками, выпадающими на акваторию и водосбор бухты.

При оценке эффективности культивирования моллюсков для каждого расчетного участка модели FARM размером 100 × 100 м были созданы ряды, содержащие по 28 значений максимальной

расчетной продуктивности гидробионтов каждого периода выращивания. Указанные ряды значений были ранжированы и вычислены эмпирические обеспеченности каждого члена ряда. На основе этих данных построены карты пространственного распределения обеспеченных значений модельной продуктивности гидробионтов для донного и садкового выращивания (рис. 3а). Обеспеченные значения суммарной модельной продуктивности для бухты представлены в табл. 1.

Полученные таким образом оценочные карто-схемы могут быть использованы при обосновании и планировании размещения садковых и придонных плантаций, выбора видов культивирования с учетом гидродинамического режима бухты, условий по абиотическим факторам и обеспеченности первичной продукцией – оптимальных с точки зрения принятой конкретным производителем стратегии реагирования на риски. Например, если принять значение 95% обеспеченности продуктивности гидробионтов в ка-

**Таблица 1.** Обеспеченные значения суммарной модельной продуктивности марикультуры бухты (т) по мидии (числитель) и устрице (знаменатель)

Тип выращивания	Обеспеченность, %		
	50	75	95
Придонное	<u>1907</u> 1446	<u>1860</u> 1203	<u>1787</u> 748
Садковое	<u>3822</u> 2484	<u>3724</u> 2187	<u>3523</u> 1531

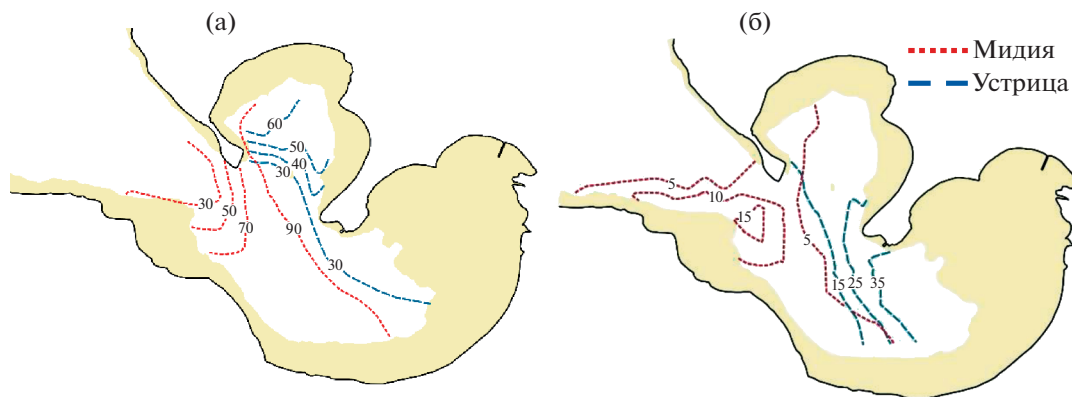


Рис. 3. Пространственное распределение модельной продуктивности мидии и устрицы (т/га) (а) – 95% обеспеченности, (б) поле разности 50 и 95% продуктивности гидробионтов. Тонем выделен район, ограниченный изобатой 5 м.

честве гарантированного объема продукции, то разница между ним и значениями большей продуктивности, но имеющей более низкие значения обеспеченности (повторяемости), могут рассматриваться как количественное выражение дополнительной прибыли (рис. 3б). С другой стороны, если в качестве базового принято 50%-е значение продуктивности, то разность со значениями более высокой обеспеченности, но более низкой продуктивности гидробионтов, может рассматриваться как количественное выражение рисков потери прибыли, связанных с вероятным сочетанием неблагоприятных экологических условий за период выращивания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные на основе моделирования результаты позволяют прийти к заключению, что при использовании вероятностно-статистической оценки продуктивности марикультуры при различных экологических условиях морской среды может быть достигнут значительный экономический и экологический эффект, определяющийся возможностями повышения эффективности и устойчивости марикультур. По сравнению с существующими способами определения марикультурного потенциала акваторий, данная методика, основанная на моделировании, повышает объективность и обоснованность параметров, определяющих планирование этого вида деятельности.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ (грант 21-74-30004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакланов П.Я., Романов М.Т.* Направления долгосрочного развития Дальневосточного региона России // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 4 (206). С. 6–18.
2. *Барбанищikov Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. и др.* Сезонные гидролого-гидрохимические исследования бухты Воевода (Амурский залив, Японское море) // Известия ТИНРО. 2015. С. 180: 161–178. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-180-161-178>
3. Инструкция по технологии культивирования тихоокеанской мидии, сост. А.В. Кучерявенко, А.П. Жук; Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2011. 27 с.
4. Инструкция по технологии культивирования тихоокеанской устрицы, сост. А.В. Кучерявенко, А.П. Жук; Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2011. 27 с.
5. *Катрасов С.В., Бугаец А.Н., Жариков В.В., Ганзей К.С., Гончуков Л.В., Соколов О.В., Лебедев А.М., Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М.* Определение районов размещения плантаций марикультуры на основе результатов гидродинамического моделирования // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 433–443. <https://doi.org/10.31857/S0030157421030060>
6. *Катрасов С.В., Бугаец А.Н., Жариков В.В., Масленников С.И., Лысенко В.Н., Барбанищikov Ю.А., Тищенко П.Я.* Оценка продуктивности плантаций двустворчатых моллюсков на основе результатов моделирования // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 759–768. <https://doi.org/10.31857/S0030157421050063>
7. D-WAQ TRM. 2013. D-Water Quality Technical Reference Manual. Deltares, 4.00 ed.
8. *Ferreira J.G., Hawkin A.J.S., Monteiro P., et al.* Integrated Assessment of Ecosystem-scale Carrying Capacity in Shellfish Growing Areas // Aquaculture. 2008. V. 275. No 1–4. P. 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.12.018>

## PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE MARICULTURE POTENTIAL PRODUCTIVITY (ON THE EXAMPLE OF VOEVODA BAY, SOUTH OF PRIMORSKY KRAI)

**A. N. Bugaets<sup>a,#</sup>, S. V. Katrasov<sup>a</sup>, V. V Zharikov<sup>a</sup>, and S. I. Maslennikov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Pacific Institute of Geography, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

<sup>b</sup>*National Scientific Center for Marine Biology Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: andreymbugaets@ya.ru*

Presented by Academician of the RAS P.Ya. Baklanov November 12, 2021

Based on the simulation results, the productivity exceedance probability of aquafarm cultivation of the giant oyster *Crassostrea gigas* and the Pacific mussel *Mytilus trossulus* were calculated for the Voevoda Bay (Russkiy Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan). The fields of hydrodynamics and salinity are calculated using the Delft3D Flow model, taking into account the inflow of fresh water from the catchment area of the bay. The parameters of the production of organic matter and its redistribution over the water area were calculated using the DELWAQ model. The results of hydrodynamic and biogeochemical modeling were used as input data in the FARM marifer management model to calculate the ensured values of the productivity of aquatic organisms. The maps of the spatial distribution of the provided values of the model productivity of bottom and cage plantations were constructed. The possibilities of their use in planning mariculture activities are discussed.

*Keywords:* mariculture, productivity, modelling, Delft3D Flow, DELWAQ, FARM