

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АКВАКУЛЬТУРЫ – КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Васечкина Е.Ф.

*Морской гидрофизический институт Российской академии наук,
Севастополь, Российская Федерация, vasechkina.elena@gmail.com*

Рассматриваются преимущества развития интегрированной мультитрофической аквакультуры как альтернативы культивированию монокультур для достижения экологической устойчивости и экономической стабильности отрасли. Представлена концептуальная модель информационной технологии, обеспечивающей выполнение диагностических и прогностических расчетов, необходимых для поддержки принятия адекватных решений по управлению устойчивым развитием аквакультуры в регионе. Компонентами такой технологии должна стать трехмерная физико-химико-биологическая имитационная модель, включающая в себя гидродинамическую модель высокого разрешения, химико-биологический блок и объектно-ориентированную модель роста культивируемых видов; система сбора, хранения и обработки информации; блок усвоения данных и варьирования параметров модели; блок задания начальных условий и сценариев развития; блок визуализации полученных результатов. В целях конкретизации предлагаемого подхода приведена схема связей между компонентами химико-биологической модели морской экосистемы с включением блока ИМТА, на основе которой можно развивать комплексную имитационную модель, являющуюся ядром рассматриваемой концепции.

Ключевые слова: интегрированная мультитрофическая аквакультура; объектно-ориентированное моделирование; химико-биологическая модель экосистемы.

IT SUPPORT FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AQUACULTURE - CONCEPTUAL MODEL

Vasechkina E.F.

*Marine Hydrophysical Institute Russian Academy,
Sevastopol, Russian Federation, vasechkina.elena@gmail.com*

The paper discusses the advantages of developing an integrated multi-trophic aquaculture as an alternative to monocultures cultivation to achieve environmental sustainability and economic stability of the industry. We suggest a conceptual model of an information technology, which provides diagnostic and prognostic analyses necessary to support adequate management decisions aimed at sustainable development of aquaculture in the region. The technology will include the following components: a 3D coupled physico-biochemical simulation model, which combines a high-resolution hydrodynamic model, a chemical-biological unit and an object-oriented model of cultivating species growth; information storage and processing system; block of data assimilation and fitting of model parameters; block for development scenarios and initial conditions; block of results visualization. In order to specify the proposed approach, we provide the scheme of interrelations between the components of the chemical-biological model of a marine ecosystem including IMTA. Using this basis, it is possible to develop a complex simulation model, which can be the core of the concept under consideration.

Key words: integrated multi-trophic aquaculture; object-based simulation; chemical-biological marine ecosystem model.

По оценкам ФАО, мировая продукция морской аквакультуры увеличивается почти вдвое каждые 10 лет. Очевидно, что дальнейшее устойчивое развитие марикультуры зависит от эффективности решения задач морского пространственного планирования и рационального природопользования в прибрежных регионах. Минимизация отрицательных воздействий больших аквакультурных хозяйств на окружающую среду возможна путем отказа от эксплуатации монокультур и замены их интегрированной мультитрофической аквакультурой (ИМТА). ИМТА основана на совместном сбалансированном культивировании видов, занимающих разные трофические уровни и связанных потоками вещества, например: рыбы, макрофиты, моллюски-фильтраторы, детритофаги. В такой аквакультуре культивируемые виды

подбираются таким образом, чтобы продукты выделения одного вида усваивались другим видом. Например, интенсивное выращивание рыбы, требующее искусственной подкормки, приводит к загрязнению водоема как органическими, так и неорганическими соединениями. Одновременное культивирование моллюсков-фильтраторов, животных-детритофагов и макроводорослей в правильных пропорциях приведет к очистке водоема, сохранению экологического состояния водного объекта и, как следствие, повышению устойчивости самого морского хозяйства. При правильном подборе компонентов аквакультуры, их расположения и массы выращиваемых видов с учетом экологической емкости района размещения хозяйства система балансируется, в результате чего сводится к минимуму какое-либо влияние на окружающую среду. Фактически создается искусственная экосистема, которая функционирует внутри естественной, не причиняя ей вреда.

Цели развития ИМТА заключаются в достижении экологической устойчивости посредством биомитигации, экономической стабильности за счет диверсификации продукции и снижения рисков, а также социальной приемлемости за счет более эффективных методов управления. В последние годы наблюдается значительный рост публикаций, в которых приводятся результаты теоретических исследований, а также рассматриваются различные аспекты практического воплощения идей ИМТА. Приведем лишь несколько ссылок на работы авторов, внесших большой вклад в продвижение идей интегрированной аквакультуры [1 – 3]. Переход к внедрению интегрированной поликультуры взамен выращивания отдельных видов морских организмов наблюдается во всех странах, традиционно развивающих морскую аквакультуру. Это страны Юго-Восточной Азии, Западной Европы и Северной Америки, Новая Зеландия, Австралия и др. Практический опыт этих стран указывает на перспективность данного направления исследований. Большое внимание уделяется устойчивому развитию аквакультуры в Европе, тому свидетельством реализация международного проекта TAPAS (<http://tapas-h2020.eu>), среди целей которого фигурируют:

- разработка методов регионального планирования для объектов аквакультуры;
- разработка средств анализа, прогнозирования и мониторинга воздействия аквакультуры на окружающую среду;
- повышение экологической устойчивости сектора аквакультуры.

В соответствии с заявленными целями все более повышается роль методов математического моделирования, которые могут быть эффективно применены для проведения предварительных расчетов размещения и конфигурации морского хозяйства, прогноза его влияния на окружающую среду. Не менее важным является применение прогностической модели для выполнения имитационных экспериментов по изучению реакции марикультуры на изменения внешних и внутренних условий. Обзор недавних работ, посвященных численному моделированию функционирования морских хозяйств в прибрежной зоне, приведен в [4]. Рассмотренные работы можно условно разделить на модели экологической емкости водоемов, где располагаются морские фермы, и более обобщенные пространственные модели, включающие в себя прилегающие районы и, как правило, использующие трехмерную гидродинамическую модель с целью воспроизведения водообмена и транспорта взвешенного и растворенного органического и неорганического вещества. Очевидно, что такие модели могут принести значительно больше пользы, поскольку органические загрязнения от крупного марихозяйства могут распространяться на большие расстояния. Однако, разработка таких моделей связана с рядом известных трудностей, поэтому моделей, имеющих практическое применение, в настоящее время совсем немного, например [5].

Существенно более точное описание химико-биологических процессов, сопровождающих выращивание культивируемых видов, и соответствующих потоков

вещества между марикультурой и окружающей средой, дает применение объектно-ориентированной технологии имитационного моделирования к описанию культивируемых объектов [6, 7]. При сочетании этого подхода с гидродинамической моделью высокого разрешения [8] его перспективность в качестве ядра информационной технологии поддержки принятия решений при управлении марикультурой заметно повышается.

Помимо имитационной модели информационная технология должна включать в себя систему сбора, обработки и хранения информации о функционировании марикультуры и изменчивости экологических параметров окружающей акватории (см. рисунок).



Рис. Концептуальная модель информационной технологии управления морским хозяйством

Пунктирной линией слева обозначен блок имитационного моделирования, состоящий из трех основных частей: гидродинамической модели, которая, в свою очередь, может состоять из двух компонент – модели высокого разрешения для района размещения морской фермы и модели на более грубой сетке, воспроизводящей гидродинамический режим в прилегающей акватории и обеспечивающей переменные граничные условия для первого блока. Переменные во времени и пространстве скорости течения, температура и соленость используются в химико-биологической модели, описывающей изменчивость таких важных параметров, как биомасса фито- и зоопланктона, концентрации растворенного кислорода, взвешенного и растворенного органического вещества, неорганических биогенных соединений. На схеме рисунка 1 она обозначена как «модель экосистемы более низких трофических уровней». Объектно-ориентированная модель культивируемых видов сопряжена с химико-биологической моделью, модельные объекты аквакультуры обмениваются веществом с окружающей средой, в результате чего изменяется как биомасса объектов, так и концентрации веществ в морской воде. Для каждого культивируемого вида используется соответствующая модель энергетического баланса. Например, для включения ИМТА моллюсков и макроводорослей можно использовать балансовые модели из работ [9, 10]. Ниже в таблице представлены химико-биологические

компоненты комплексной модели, включающей в себя ИМТА, с указанием процессов, приводящих к обмену веществом между ними.

Перечень компонентов химико-биологической модели с указанием источников и стоков в правой части соответствующих уравнений

Компонент модели	Источники	Стоки
Биомасса фитопланктона	Фотосинтез Изъятие неорганических соединений азота и фосфора	Темновое дыхание Экскреция Выедание, отмирание
Биомасса фитобентоса, биомасса культивируемых макроводорослей	Фотосинтез Изъятие неорганических соединений азота и фосфора	Темновое дыхание Экскреция Выедание, отмирание
Биомасса зообентоса, биомасса культивируемых моллюсков	Потребление фитопланктона и детрита	Дыхание, выделение Отмирание
Растворенное органическое вещество в ед. углерода	Экскреция водорослей Гидролиз Поток на границе вода - дно	Минерализация органического вещества
Взвешенное органическое вещество, лабильная и стабильная фракции	Выделение моллюсками Отмирание водорослей и других организмов Поступление извне	Гидролиз Минерализация органического вещества Потребление моллюсками
Аммонийный азот	Аммонификация Выделение моллюсками Поток на границе вода - дно	Нитрификация Изъятие водорослями
Нитраты	Нитрификация Поток на границе вода - дно	Изъятие водорослями Нитратредукция Тиоденитрификация
Растворенный органический азот	Экскреция водорослей Гидролиз	Аммонификация
Взвешенный органический азот, лабильная и стабильная фракции	Выделение моллюсками Выедание и отмирание водорослей Поступление извне	Гидролиз Аммонификация Потребление моллюсками
Фосфаты	Разложение органики Выделение моллюсками Поток на границе вода - дно	Изъятие водорослями
Растворенный органический фосфор	Экскреция водорослей Гидролиз	Минерализация органического вещества с высвобождением фосфатов (PO ₄)
Взвешенный органический фосфор, стабильная и лабильная фракция	Выделение моллюсками (М) Выедание и отмирание водорослей Поступление извне	Гидролиз Минерализация органического вещества Потребление моллюсками
Растворенный кислород	Выделение при фотосинтезе Поток из атмосферы	Темновое дыхание Дыхание моллюсков Поток в атмосферу Затраты на минерализацию

Поскольку в такой модели неизбежно будет использоваться множество эмпирических коэффициентов, необходима периодическая верификация, основанная на данных контактных химико-биологических наблюдений. Эти же данные нужны для оценки динамики роста культивируемых объектов, экологического состояния района размещения фермы и прилегающих акваторий. Спутниковая информация используется

для корректировки граничных условий гидродинамической и химико-биологической моделей. Современные алгоритмы позволяют проводить усвоение спутниковой и доступной контактной информации в процессе работы гидродинамической модели.

Вся поступающая информация должна сохраняться в специализированной базе данных. Помимо верификации блоков модели она может использоваться для генерации сценариев развития различных ситуаций с целью тестирования цифровой модели марихозяйства для получения ответов на вопросы типа «что будет, если». Очевидно, что сбор и анализ экономических данных о состоянии рынка морепродуктов также необходим для выработки рациональных решений при управлении марихозяйством. Несмотря на то, что все перечисленные блоки концептуальной модели уже разработаны в той или иной степени, сборка и отладка всех элементов системы, представленной на рис. 1, представляет собой нетривиальную задачу. В результате ее решения должен быть создан программный комплекс, обеспечивающий интерактивную работу пользователя с моделью и базой данных.

Библиографические ссылки

1. Barrington, K., Chopin, T. and Robinson, S. 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. In D. Soto (ed.). Integrated mariculture: a global review. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529. Rome, FAO. P. 7 – 46.
2. Buck B. H., Troell M. F., Krause G., Angel D., Grote B. State of the art and challenges for offshore integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Frontiers in Marine Science*. Vol. 5. 2018. 165 p. DOI=10.3389/fmars.2018.00165
3. Chopin T., Cooper J. A., Reid G., Cross S., Moore C. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. Vol. 4, iss. 4. 2012. P. 209-220.
4. Filgueira, R. Comeau, L. A., and Guyondet T. Modelling carrying capacity of bivalve aquaculture: a review of definitions and methods. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.* 2015/002. P. 31.
5. Cromey, C. J., Nickell, T. D., Black, K. D. DEPOMOD — modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture*. 2002. 214 (1–4). P. 211-239.
6. Объектно-ориентированная модель поликультуры «мидии – макрофиты» в прибрежной зоне Крыма. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика». 2014. Вып. 20. С. 220-225. [Электронный ресурс] https://www.researchgate.net/publication/322077377_Obektno-orientirovannaa_model_polikultury_midii_-_makrofity_v_pribreznoj_zone_Kryma.
7. Vasechkina E. F. Coupled physical biological model of shellfish mariculture. *Proceedings of the Thirteen International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017, 31 October – 04 November 2017. Mellieha, Malta. E. Ozhan (Editor)*. P. 381-392.
8. Филиппова Т. А., Васечкина Е. Ф., Кубряков А. И. Численное моделирование химико-биологических процессов в прибрежной зоне моря. *Материалы Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону*. 2018. С. 357-361.
9. Васечкина Е.Ф., Казанкова И.И. Математическое моделирование роста и развития мидии *Mytilus galloprovincialis* на искусственном субстрате. *Океанология*. 2014. Т. 54, № 6. С. 1-9.
10. Васечкина Е. Ф., Филиппова Т. А. Моделирование биохимических процессов в бентосных фитоценозах прибрежной зоны. *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 52-69.