РЕЦЕНЗИЯ № 1

на статью **«A REVIEW OF APPROACHES TO MODELING MARINE ECOSYSTEMS»**
автора: **О. К. Хмельницкая**

Переданная на рецензирование статья представляет собой обзорную работу, посвященную эволюции подходов к математическому моделированию морских экосистем – от первых эмпирических обобщений начала XX века до современных гибридных систем, интегрирующих детерминированные уравнения и методы машинного обучения. Объем статьи (более 1000 строк основного текста, 4 таблицы, 125 наименований в списке литературы) свидетельствует о серьезной аналитической работе авторов.

Тема обзора, несомненно, актуальна. В условиях развития «голубой экономики», усиления антропогенного прессинга на морские экосистемы и климатических изменений, математическое моделирование становится ключевым инструментом перехода от реактивного к превентивному управлению морскими ресурсами [см. строки 49–54]. Кроме того, стремительное внедрение методов искусственного интеллекта и появление концепции «цифрового двойника океана» требуют систематизации накопленного опыта, что и предпринято авторами.

Исторический обзор последовательно проведен по трем этапам:

1. Зарождение формальных методов (1920–1960-е гг.) – от стехиометрических обобщений А. Редфилда до первых динамических и пространственных моделей [строки 56–141].

2. Переход к многомерным сопряженным моделям (1970–1990-е гг.) – развитие точечных, боксовых и непрерывных моделей, появление первых физико-биогеохимических сопряженных конструкций [строки 142–315].

3. Современное состояние – классификация моделей по четырем уровням сложности (биогеохимические, трофодинамические, модели управления промыслом, сквозные (end-to-end)) с подробным описанием ключевых моделей в четырех таблицах [строки 316–353].

Отдельные разделы посвящены программным фреймворкам (FABM, Oceananigans.jl), обеспечивающим модульную интеграцию гидродинамических и биогеохимических блоков [строки 373–391], и перспективным направлениям – гибридизации с машинным обучением, фундаментальным моделям и концепции цифрового двойника океана [строки 392–486].

Рассмотрение гибридных подходов (глубокое обучение для параметризации, байесовское обучение, суррогатное моделирование) и концепции цифрового двойника показывает, что авторы не ограничиваются историческим обзором, но пытаются очертить траекторию дальнейшего развития.

В качестве рекомендаций (именно рекомендаций на будущее):

1. Статья преимущественно описательная. Хотя авторы упоминают ограничения отдельных моделей (например, субъективность идентификации боксовых моделей [строки 208–210], чувствительность EwE к пропущенным трофическим связям [строка 1036]), отсутствует систематический сравнительный анализ сильных и слабых сторон различных классов моделей. Желательно добавить раздел с обобщающей критической оценкой,

возможно, в виде сравнительной таблицы по критериям (вычислительная сложность, точность, возможность учета обратных связей, данные для калибровки и т. п.).

2. Авторы справедливо отмечают, что «основными ограничениями являются неполнота данных, вычислительная сложность и недостаточная стандартизация валидации» [строки 495–496]. Однако этому важнейшему вопросу не посвящен отдельный раздел. Целесообразно было бы рассмотреть современные подходы к валидации морских экосистемных моделей (например, использование данных дистанционного зондирования, сопоставление с независимыми наблюдениями, ансамблевые методы оценки неопределенности).

3. Обзор сосредоточен преимущественно на моделях, разработанных для Северной Атлантики, Балтийского, Северного и Черного морей. Модели для тропических и полярных регионов, а также для экосистем открытого океана, представлены менее детально. Было бы полезно расширить этот аспект или явно оговорить региональную направленность обзора.

В тексте встречаются опечатки и погрешности:

1. *Строки 48 и 51:* повторяется оборот «becoming a tool». Один из них можно заменить на синоним «serves as a critical framework» или «provides a fundamental mechanism».

2. *Строка 115* :«ecosystem being modeled» звучит громоздко. Лучше заменить на «modeled ecosystem».

3. *Строка 166:* «separated into separate blocks» – тавтология. Лучше: «detritus are divided into blocks/compartments» тексту.

4. *Строка 181:* не совсем понимаю, что такое «balance relationships», может имелось в виду «Mass balance equations» или «budget relationships».

5. *Table 1:* Графа про BSEM: «rivers (Danube)», если подразумевается множество рек, то лучше написать the Danube system/basin или оставить river.

6. *Table 3:* Графа про ISIS: опечатка не «metje», а «métier».

7. Страница 70–71 (она же 25) начинается не очень связное перечисление фактов после таблиц, надо как-то подвести.

8. «Oceanapiangas» в аннотации вместо «Oceananigans».

9. *Строка 82:* автор приводит следующую реакцию:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 106\ O_2 = 106\ CO_2 + 16\ NH_3 + H_3PO_4 + 106\ H_2O$$

Что не соответствует оригинальной работе Redfield et al. (1963). В первоисточнике окисление органического вещества в присутствии кислорода описывается с образованием азотной кислоты (HNO_3), а не аммиака (NH_3), как указано в статье. Кроме того, согласно тексту главы (стр. 27–28), стехиометрическое соотношение составляет $\Delta O/\Delta P = -276$, что соответствует потреблению 138 молекул O_2 на 1 атом фосфора, а не 106, как записано у автора. Правильное суммарное уравнение должно выглядеть следующим образом:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 138O_2 \rightarrow 106CO_2 + 16HNO_3 + H_3PO_4 + 122H_2O$$

В уравнении, приведенном автором рецензируемой статьи, окисление останавливается на стадии аммиака, что соответствует анаэробным условиям, а не

оксическим, которые описываются в контексте стехиометрии Рефилда для нормальной океанической воды.

Оценка: рекомендую к публикации с незначительными исправлениями. Повторное рецензирование не требуется, при условии устранения всех недостатков.

Подпись. Рецензент № 1. 24.07.2026.

От редакции: рецензия была направлена автору.

Ответ рецензенту № 1 на рецензию от 24.07.2026 на статью автора: О. К. Хмельницкая «A REVIEW OF APPROACHES TO MODELING MARINE ECOSYSTEMS».

Прежде всего, хочу поблагодарить Вас за внимательное прочтение моей работы и конструктивные замечания/рекомендации, с которыми я полностью согласна. Особую признательность выражаю за уточнение уравнения, описывающего стехиометрию Редфилда. Ошибка в исходной рукописи была вызвана тем, что предыдущие исследования автора связаны с экосистемой Черного моря. Для его специфических условий при моделировании часто используется именно усеченная реакция. Тем не менее, для обзорной статьи использование анаэробного уравнения в качестве универсального недопустимо.

В текст были внесены исправления и дополнения (для удобства они выделены желтым цветом). Ниже представлены пошаговые ответы на каждое из замечаний.

Рецензент: *1. Статья преимущественно описательная. Хотя авторы упоминают ограничения отдельных моделей (например, субъективность идентификации боксовых моделей [строки 208–210], чувствительность EwE к пропущенным трофическим связям [строка 1036]), отсутствует систематический сравнительный анализ сильных и слабых сторон различных классов моделей. Желательно добавить раздел с обобщающей критической оценкой, возможно, в виде сравнительной таблицы по критериям (вычислительная сложность, точность, возможность учета обратных связей, данные для калибровки и т.п.).*

Ответ. Добавлена таблица 5 со сравнительными характеристиками моделей – *строка 391.*

Рецензент: *2. Авторы справедливо отмечают, что «основными ограничениями являются неполнота данных, вычислительная сложность и недостаточная стандартизация валидации» [строки 495–496]. Однако этому важнейшему вопросу не посвящен отдельный раздел. Целесообразно было бы рассмотреть современные подходы к валидации морских экосистемных моделей (например, использование данных дистанционного зондирования, сопоставление с независимыми наблюдениями, ансамблевые методы оценки неопределенности).*

Ответ. В последний раздел добавлен абзац текста, касающийся валидации, – *строки 464-469.*

Рецензент: *Обзор сосредоточен преимущественно на моделях, разработанных для Северной Атлантики, Балтийского, Северного и Черного морей. Модели для тропических и полярных регионов, а также для экосистем открытого океана представлены менее детально. Было бы полезно расширить этот аспект или явно оговорить региональную направленность обзора.*

Ответ. Во введение и заключение добавлены уточнения, что основное внимание уделено Северной Атлантике, Северному, Балтийскому и Черному морям, для которых накоплен наибольший объем данных. *Строки 59–64 и 520–523.*

Рецензент: *Строки 48 и 51: повторяется оборот «becoming a tool». Один из них можно заменить на синоним serves as a critical framework или provides a fundamental mechanism.*

Ответ. Второй оборот исправлен на «provides a fundamental mechanism» – *строка 51.*

Рецензент: *Строка 115 :«ecosystem being modeled» звучит громоздко. Лучше заменить на modeled ecosystem.*

Ответ. Исправлено на «modeled ecosystem» – строка 121.

Рецензент: *Строка 166: «separated into separate blocks» тавтология. Лучше: detritus are divided into blocks/compartments тексту.*

Ответ. Исправлено на «divided into blocks» – *строка 172.*

Рецензент: *Строка 181: не совсем понимаю, что такое «balance relationships», может ввиду имелось Mass balance equations или budget relationships.*

Ответ. Исправлено на «budget relationships» – *строка 186.*

Рецензент: *Table 1: Графа про BSEM: «rivers (Danube)» если подразумевается множество рек, то лучше написать the Danube system/basin или оставить river.*

Ответ. Исправлено на «the Danube basin» – *Table 1 (BSEM).*

Рецензент: *Table 3: Графа про ISIS: опечатка не metje, а métier.*

Ответ. Исправлено на «métier» – *Table 3 (ISIS).*

Рецензент: *Страница 70–71 (она же 25) начинается не очень связное перечисление фактов после таблиц, надо как-то подвести.*

Ответ. Текст несколько переработан и дополнен – *строк 355–388.*

Рецензент: «*Oceanapiangas» в аннотации вместо «Oceananigans».*

Ответ. Текст рукописи и аннотации был повторно проверен – указанная опечатка в материалах статьи отсутствует. Название гидродинамической модели во всех разделах зафиксировано в корректной форме: «Oceananigans».

Рецензент: *Строка 82: автор приводит следующую реакцию:*

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 106\ O_2 = 106\ CO_2 + 16\ NH_3 + H_3PO_4 + 106\ H_2O$$

Что не соответствует оригинальной работе Redfield et al. (1963). В первоисточнике окисление органического вещества в присутствии кислорода описывается с образованием азотной кислоты (HNO_3), а не аммиака (NH_3), как указано в статье. Кроме того, согласно тексту главы (стр. 27–28), стехиометрическое соотношение составляет $\Delta O/\Delta P = -276$, что соответствует потреблению 138 молекул O_2 на 1 атом фосфора, а не 106, как записано у автора. Правильное суммарное уравнение должно выглядеть следующим образом:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 138O_2 \rightarrow 106CO_2 + 16HNO_3 + H_3PO_4 + 122H_2O$$

В уравнении, приведенном автором рецензируемой статьи, окисление останавливается на стадии аммиака, что соответствует анаэробным условиям, а не оксическим, которые описываются в контексте стехиометрии Рефилда для нормальной океанической воды.

Ответ. Уравнение исправлено на:

$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 138\ O_2 \rightarrow 106\ CO_2 + 16\ HNO_3 + H_3PO_4 + 122\ H_2O$ – *строка 88.*

Автор выражает надежду, что обновленная версия рукописи учитывает все комментарии рецензента и в полной мере отвечает высоким стандартам журнала.

С уважением, авторский коллектив. 03.08.2026.

От редакции: ответ и доработанная версия статьи были направлены редакцией рецензенту.

Подтверждение Рецензента № 1 на публикацию:

Уважаемая редакция!

Доработка статьи меня устраивает. Считаю, что можно публиковать.

Подпись. Рецензент № 1. 05.08.2026.