РЕЦЕНЗИЯ № 2

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

Статья посвящена аналитическому обзору, как в историческом, так и методическом аспектах, моделирования морских экосистем в умеренных и высоких широтах Северного полушария. Авторам удалось систематически изложить стремительное развитие подходов к моделированию морских экосистем в течение последнего столетия и показать, что моделирование морских экосистем становится фундаментальным инструментом в управлении морскими ресурсами. Актуальность обзора связана с необходимостью подготовки молодых исследователей в области экосистемного моделирования, которым он поможет ориентироваться «в море» существующих публикаций. Основным достоинством обзора следует считать, на мой взгляд, следующий главный вывод о том, чем характеризуется современное состояние моделирования морских экосистем. Несмотря на огромное число разработок со всё большей детализацией отдельных процессов, адекватность модельных реализаций остаётся зачастую непроверяемой из-за недостатка фактических данных, либо, вообще, их полного отсутствия. Поэтому усилия исследователей в настоящее время должны быть направлены на тщательную валидацию и калибровку (с помощью ИИ) выбранных среди множества моделей наиболее надежных и практически важных из них. Выбору таких моделей может помочь настоящая статья.

Общие замечания по статье:

1. Недооценена роль российских учёных в разработке надёжных биогеохимических моделей промежуточной сложности. Имеются в виду следующие модели:

   1) Трёхмерная модель SPBEM (St. Petersburg Baltic Eutrophication Model, Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря) (Ryabchenko V. A. et al., 2016; Isaev A. et al., 2020), основанная **на тщательно валидированной** модели О. П. Савчука (Savchuk, 2002). SPBEM участвовала в оценке сценариев борьбы с эвтрофикацией Балтийского моря с помощью многомодельного ансамблевого моделирования (Meier et al., 2018; Meier et al., 2019). SPBEM также недавно была адаптирована к условиям Ладожского озера (Isaev and Ryabchenko, 2024). Модель SPBEM следует включить в Таблицу 1 современных биогеохимических моделей.

   2) Заслуживает упоминания также одна из первых трехмерных объединенных физико-биогеохимических моделей промежуточной сложности (к сожалению, не имеющая аббревиатуры), основанная на классической модели Фэшема и **тщательно валидированная** для условий северной части Индийского океана (Ryabchenko, Gorchakov and Fasham, 1998; Anderson et al., 2007). Подробное описание модели дано в Anderson et al. (2007). Модель с некоторыми модификациями успешно использовалась для анализа изменчивости экосистемы Канарского апвеллинга (Gorchakov et al., 2012). Модифицированная для учета ледовых условий модель использовалась в Арктических морях (Рябченко и др., 2005: 1D вариант модели; Рябченко и др.., 2016; Martyanov et al., 2018).

2. Хотелось бы узнать мнение авторов о том, какие конкретные, уже разработанные модели в каждом из выделенных классов (*биогеохимические, трофодинамические, управления промыслом и сквозные (end-to-end))* являются наиболее надёжными и подходящими (в том числе и с вычислительной точки зрения) для решения задач прогноза поведения морских экосистем в результате возможных будущих изменений климата и антропогенной нагрузки. Это помогло бы исследователям (особенно молодым) выбрать модель, позволяющую в разумные сроки решить стоящие перед ними задачи.

Редакционные (построчные) замечания по тексту статьи (если есть):

1. С. 233–234: «The two-dimensional Kagan model simulates …». Не ясно, о какой модели Кагана идет речь. Необходимо дать ссылку.

Список литературы:

1. Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V., et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate // Oceanology. 2016. Vol. 56, No. 1. P. 36–45. DOI: 10.1134/S0001437016010161
2. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // Water. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 1307. DOI: 10.3390/w12051307
3. Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: Scaling up field studies with a mathematical model. J. Mar. Syst. **2002**, 32, 253–280.
4. Meier H. E. M., Edman M., Eilola K., Placke M., Neumann T., Andersson H. C., Brunnabend S.-E., Dieterich C., Frauen C., Friedland R. et al. Assessment of Uncertainties in Scenario Simulations of Biogeochemical Cycles in the Baltic Sea. Front. Mar. Sci. **2019**, 6, 46.
5. Meier H. E. M., Edman M. K., Eilola K. J., Placke M., Neumann T., Andersson H. C., Brunnabend S.-E., Dieterich C., Frauen C., Friedland R. et al. Assessment of Eutrophication Abatement Scenarios for the Baltic Sea by Multi-Model Ensemble Simulations. Front. Mar. Sci. **2018**, 5, 440.
6. Isaev A. V., Ryabchenko V. A. Model estimates of interannual variability of the Lake Ladoga ecosystem characteristics in the period from 1980 to 2020. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2024, 17 (4), 32–42 (In Russ.), https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2
7. Ryabchenko V. A., Gorchakov V. A., Fasham M. J. R.. Seasonal dynamics and biological productivity in the Arabian Sea euphotic zone as simulated by a three-dimensional ecosystem model. Global Biogeochemical Cycles, 1998, Vol. 12, No. 3, 501–530.
8. Anderson T. R., Ryabchenko V. A., Fasham M. J., Gorchakov V. A. Denitrification in the Arabian Sea: A 3D ecosystem modeling study. Deep-Sea Research, Part I , 2007, Vol. 54, Issue 12, 2082–2119.
9. Gorchakov V. A., Ryabchenko V. A., Dianskii N. A., Gusev A. V. Modelling the seasonal variability of marine ecosystem in the Central-Eastern Atlantic//Oceanology (English translation). 2012, Vol. 52, Issue 3, pp. 322–334, DOI: 10.1134/S0001437012020051
10. Рябченко В. А., Горчаков В. А., Дворников А. Ю., Пугалова С. С. Оценки влияния ледового покрова на первичную продукцию фитопланктона в Баренцевом море (по результатам трехмерного моделирования) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 1, С. 41–51.

11. Martyanov S. D., Dvornikov A. Yu., Ryabchenko V. A., Sein D. V., Gordeeva S. M. Investigation of the relationship between primary production and sea ice in the arctic seas: assessments based on a small-component model of marine ecosystem. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2018, 11, 2, 108–117, doi: 10.7868/S2073667318020107
12. Рябченко В. А., Гальцова В. В., Дворников А. Ю., Нитишинский М. А., Пугалова С. С. Моделирование сезонной изменчивости экосистемы в шельфовой зоне моря Лаптевых. Метеорология и гидрология, 2004, № 6, С. 59–71.

Резюме рецензента: после исправления указанных замечаний статья может быть опубликована.

Подпись. Рецензент № 2. 10.08.2026.

От редакции: рецензия была направлена автору.

Ответ рецензенту № 2 на рецензию от 10.08.2026 на статью автора: О. К. Хмельницкая «A REVIEW OF APPROACHES TO MODELING MARINE ECOSYSTEMS».

Благодарю Вас за внимательное и конструктивное рецензирование. В текст были внесены исправления и дополнения (для удобства они выделены зеленым цветом). Ниже представлены пошаговые ответы на каждое из замечаний.

Рецензент: *1. Недооценена роль российских учёных в разработке надёжных биогеохимических моделей промежуточной сложности. Имеются в виду следующие модели:*

Ответ. Согласна с этим замечанием.

Рецензент: *1) Трёхмерная модель SPBEM (St. Petersburg Baltic Eutrophication Model, Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря) (Ryabchenko V. A. et al., 2016; Isaev A. et al., 2020), основанная на тщательно валидированной модели О.П. Савчука (Savchuk, 2002). SPBEM участвовала в оценке сценариев борьбы с эвтрофикацией Балтийского моря с помощью многомодельного ансамблевого моделирования (Meier et al., 2018; Meier et al., 2019). SPBEM также недавно была адаптирована к условиям Ладожского озера (Isaev and Ryabchenko, 2024). Модель SPBEM следует включить в Таблицу 1 современных биогеохимических моделей.*

Ответ. Модель SPBEM (Ryabchenko et al., 2016) добавлена в таблицу 1.

Рецензент: *2) Заслуживает упоминания также одна из первых трехмерных объединенных физико-биогеохимических моделей промежуточной сложности (к сожалению, не имеющая аббревиатуры), основанная на классической модели Фэшема и тщательно валидированная для условий северной части Индийского океана (Ryabchenko, Gorchakov and Fasham, 1998; Anderson et al., 2007). Подробное описание модели дано в Anderson et al. (2007). Модель с некоторыми модификациями успешно использовалась для анализа изменчивости экосистемы Канарского апвеллинга (Gorchakov et al., 2012). Модифицированная для учета ледовых условий модель использовалась в Арктических морях (Рябченко и др., 2005: 1D вариант модели; Рябченко и др.., 2016; Martyanov et al., 2018).*

Ответ. Модель Ryabchenko, Gorchakov and Fasham (1998) также включена в обзор – в раздел «Transition to multidimensionality and connection (1970-90s)», строки 306–313.

Рецензент: *Хотелось бы узнать мнение авторов о том, какие конкретные, уже разработанные модели в каждом из выделенных классов (биогеохимические, трофо-динамические, управления промыслом и сквозные (end-to-end)) являются наиболее надёжными и подходящими (в том числе и с вычислительной точки зрения) для решения задач прогноза поведения морских экосистем в результате возможных будущих*

изменений климата и антропогенной нагрузки. Это помогло бы исследователям (особенно молодым) выбрать модель, позволяющую в разумные сроки решить стоящие перед ними задачи.

Ответ. В раздел «Classification of modern models by complexity and coverage» добавлен абзац с рекомендациями по выбору наиболее надежных и вычислительно эффективных моделей в каждом из четырех рассматриваемых типов – строки 401–411.

Рецензент: *С.233-234. «The two-dimensional Kagan model simulates …». Не ясно, о какой модели Кагана идет речь. Необходимо дать ссылку.*

Ответ. Уточнено: в данном случае речь идет о модели распространения примеси антропогенного происхождения, представленной в работе: Каган Б. А., Рябченко В. А. Трассеры в Мировом океане (1978). Исправлена неточность в указании автора и подкорректирован текст – строки 235–236.

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

С уважением, авторский коллектив. 24.08.2026.

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

Подтверждение Рецензента № 2 на публикацию:

Уважаемая редакция.

Считаю, что статья "A REVIEW OF APPROACHES TO MODELING MARINE ECOSYSTEMS" в доработанном виде может быть опубликована в журнале "Океанологические исследования".

Подпись. Рецензент № 2. 07.09.2026.