

УДК 574.5:[546.16+546.17]:001.891.57(261.243)

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ БАЛАНСА АЗОТА И ФОСФОРА В ЭКОСИСТЕМЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

*О.М. Владимирова¹, Т.Р. Еремина¹, А.В. Исаев²,
В.А. Рябченко², О.П. Савчук^{3,4}*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова

³ Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет

⁴ Балтик Нест институт, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета,
3256767@gmail.com

Представлены результаты расчетов составляющих баланса фосфора и азота в водной среде с использованием трехмерной термогидродинамической модели, совмещенной с модулем биогеохимических циклов, для Финского залива (SPBEM-2). Получены количественные среднегодовые оценки потоков азота и фосфора и их составляющих — стойкой и лабильной органики, детрита и минеральных форм; рассчитан среднегодовой баланс общего азота и фосфора в водной среде Финского залива. Показано, что поступление и вынос биогенных соединений в Финский залив обеспечиваются за счет фосфора и азота, находящихся в различных формах. По среднегодовым оценкам установлено, что растворенное органическое вещество в лабильной форме поступает в залив из открытой части Балтики, а минеральные соединения азота и фосфора выносятся из залива.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество, модель SPBEM-2, Финский залив, биогенные соединения, баланс, эвтрофикация.

MODEL ESTIMATES OF NITROGEN AND PHOSPHORUS BUDGET COMPONENTS FOR THE GULF OF FINLAND ECOSYSTEM

*O.M. Vladimirova¹, T.R. Eremina¹, A.V. Isaev²,
V.A. Ryabchenko², O.P. Savchuk^{3,4}*

¹ Russian State Hydrometeorological University

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

³ Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University

⁴ Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre

The model results of the nitrogen and phosphorus budget components calculations for pelagic system using three-dimensional thermo-hydrodynamic model coupled with a module of biogeochemical cycles for the Gulf of Finland (SPBEM-2) are presented. Quantitative interannual estimates of nitrogen and phosphorus flows with components (refractory and liability organic, detritus and mineral form) were obtained; the average annual balance of total nitrogen and phosphorus in the pelagic system of the Gulf of Finland was calculated. It is shown that the inflow and outflow of nutrients are provided by phosphorus and nitrogen which are in different forms. It was calculated that according to average annual estimates dissolved organic matter in a labile form enters the bay from the open part of the Baltic Sea, and the mineral compounds of nitrogen and phosphorus are removed from the bay.

Keywords: dissolved organic matter, SPBEM-2 model, the Gulf of Finland, nutrient compounds, the balance, eutrophication.

Введение

Эвтрофикация Финского залива определяется поступлением азота и фосфора непосредственно с водосбора залива, водообменом с Балтийским морем, а также транспортом вещества между различными районами залива, внутренними химическими и биологическими процессами [2, 3, 17]. Значительная часть поступающих с речными водами питательных веществ представлена в растворенной органической форме [5]. Исследования показали, что растворенное органическое вещество играет значительную роль в функционировании экосистемы Балтийского моря [9]. Растворенное органическое вещество (РОВ) является одним из звеньев пищевой цепи морских экосистем, служит основным источником энергии для гетеротрофных бактерий в поверхностных водах, что способствует повышению продуктивности и изменению трофического статуса прибрежных акваторий [10, 16].

Для исследования эвтрофикации Балтийского моря широко используются трехмерные модели биогеохимических циклов, такие как ERGOM (www.ergom.net), SCOBI [5], ECOSMO [4, 18], BFM [20, 21], SPBEM [1, 14, 15]. Основные процессы, описываемые в моделях, включают в себя: потребление минеральных соединений продуцентами, поедание продуцентов растительноядным зоопланктоном, отмирание фито- и зоопланктона, гравитационное оседание и минерализацию детрита, обмен азотом, фосфором и кремнием с донными отложениями. Однако при всех существующих различиях между моделями экосистем Балтийского моря следует отметить, что растворенное органическое вещество (РОВ), поступающее с суши, во всех моделях задается в виде детрита, а коэффициенты биодоступности РОВ принимаются при этом достаточно произвольно. Это приводит к значительным различиям граничных условий, задаваемых в различных моделях в виде внешних нагрузок по азоту и фосфору [13], что затрудняет сопоставление результатов моделирования.

Поскольку прямых измерений содержания растворенного органического вещества в водной среде Балтийского моря недостаточно для оценки его влияния на процесс эвтрофирования, то данный пробел можно заполнить с использованием методов математического моделирования. В связи с этим целью исследования является количественная оценка вклада растворенного органического азота и фосфора в биогеохимический цикл в водной среде Финского залива и выявление процессов, оказывающих влияние на эвтрофикацию залива с использованием модифицированной Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM-2).

Материалы и методы

Для проведения расчетов трансформации растворенного органического вещества в Финском заливе трехмерная термогидродинамическая модель, совмещенная с моделью биогеохимических циклов, была модифицирована для учета в пелагиали процессов трансформации РОВ. Подробное описание модифицированной модели и сравнение результатов моделирования с данными натурных

измерений приведено в работе [22]. Гидродинамический модуль основан на модели циркуляции океана Массачусетского технологического института MITgcm [12] в гидростатическом приближении. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена импульсом, теплом и солью принимались постоянными. Для параметризации вертикального турбулентного обмена использована схема замыкания ТКЕ [7]. Динамика морского льда основана на модели с вязко-пластичной реологией [11, 23]. Биогеохимический модуль основан на уравнениях углеродной модификации модели эвтрофикации Балтийского моря BALTSEM [8] и описывает круговорот биогенов в системе вода — донные отложения (рис. 1).

Модуль включает 16 переменных для пелагиали (зоопланктон, сине-зеленые и диатомовые водоросли, флагеллаты, взвешенный органический азот и фосфор (ВОА(Ф)), аммоний, окисленную форму азота, фосфаты, растворенную форму органического азота и фосфора (РОА(Ф)) в двух фракциях (стойкой и лабильной),



Рис. 1. Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества.

кремний и растворенный кислород) и три переменных для донных отложений (бентосный азот, фосфор и кремний).

Внутренними источниками лабильной фракции азот- и фосфорсодержащего растворенного органического вещества являются деструкция взвешенной органики и выделяемые гетеротрофами продукты катаболизма. Для стойкой фракции РОА(Ф) источником также является метаболизм гетеротрофов. Под воздействием света стойкая фракция РОА(Ф) разлагается до лабильной, которая в процессе минерализации окисляется до минеральных форм азота и фосфора.

Расчеты на модифицированной модели были выполнены для Финского залива (рис. 2). Пространственное разрешение модели составляло около 2 морских миль по широте и долготе и 3 метра по глубине.

Начальные поля распределения температуры и солёности воды и биогеохимических переменных модели строились на основе данных натурных наблюдений, осредненных для зимних месяцев 2002—2012 гг., которые были выбраны из международной базы, собранной в рамках проведения года Финского залива 2014 г. [19]. Значения уровня моря и компонентов скорости течений задавались равными нулю. Концентрации планктона и детрита были заданы близкими к нулю. Распределение бентосных переменных было получено из результатов расчетов, выполненных на модели BALTSEM для всего Балтийского моря. Содержание растворенного органического вещества для азота и фосфора рассчитывалось как разность между общим содержанием азота и фосфора и их минеральными составляющими.

Условия на открытой границе были получены путем обработки данных наблюдений из базы [19], которая содержит такие данные за период с 1999 по 2014 г. Для фитопланктона, детрита и зоопланктона значения на открытой границе задавались из внутренней области.

Ежечасный уровень моря на границе задавался из данных наблюдений в пункте Палдиске, доступных в он-лайн каталоге (<http://marine.copernicus.eu>). Атмосферное воздействие задавалось на основе полей реанализа ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int>). Среднемесячные значения речного стока и нагрузки

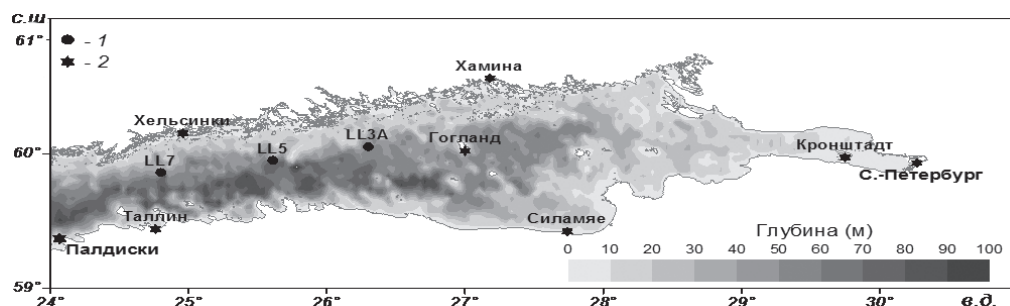


Рис. 2. Расчетная область модели. Финский залив.

1 — станции мониторинга ХЕЛКОМ, 2 — станции наблюдения за уровнем.

биогенными элементами с суши брались из базы данных Стокгольмского университета (BED).

В данной постановке расчеты выполнялись для периода с 2009 по 2014 г. с шагом по времени 600 секунд.

Результаты и их обсуждение

Скорость и характер протекания биогеохимических процессов зависят от гидрофизических процессов в морской среде, что обуславливает необходимость адекватного воспроизведения на модели циркуляции вод и термохалинной структуры. Выполненная верификация результатов модельных расчетов по данным натурных наблюдений показала, что модель адекватно воспроизводит сезонный ход гидрофизических и гидрохимических характеристик [22].

Так, например, сравнение пространственного распределения концентрации придонного растворенного кислорода, полученного на модели, показало хорошее соответствие данным натурных наблюдений, собранным во время экспедиции в июле 2010 г. (рис. 3), когда в восточной части Финского залива была зафиксирована обширная зона гипоксии. В гипоксических условиях содержание фосфатов в придонном слое значительно увеличивается за счет их выхода из донных отложений, что также хорошо воспроизводится моделью (рис. 4).

Временные ряды годовых значений потоков фосфора, проинтегрированных по всей области моделирования (табл. 1), позволяют оценить соотношение внутренних и внешних источников и стоков фосфора.

Сопоставив внешнюю нагрузку (с учетом обмена с Балтикой) и внутренних процессов, можно заключить, что отношение количества импортируемого растворенного органического фосфора (РОФ) к его количеству, производимому внутри залива за счет экскреции гетеротрофных организмов и разложения детрита

Таблица 1

Межгодовые изменения потоков фосфора (т/год)

Год	Потребление фитопланктоном (V_p)	Экскреция минеральной формы фосфора	Минерализация	Выход из донных отложений	Седиментация	Лабильный РОФ за счет внутренних процессов в пелагиали (Q_i)	Внешняя нагрузка + обмен с Балтикой РОФ (Q_o)	Q_o/Q_i %	Q_o/V_p %
2009	63451	28375	20344	27582	25109	9800	7946	81	13
2010	68839	37417	17914	31919	19951	11663	6453	55	9
2011	100674	61425	25274	25638	22891	18079	7792	43	8
2012	71617	38516	20695	18207	21802	12106	13482	111	19
2013	65931	34133	26220	19771	20194	10968	12233	112	19
2014	73111	39159	21435	17554	21008	12152	6322	52	9

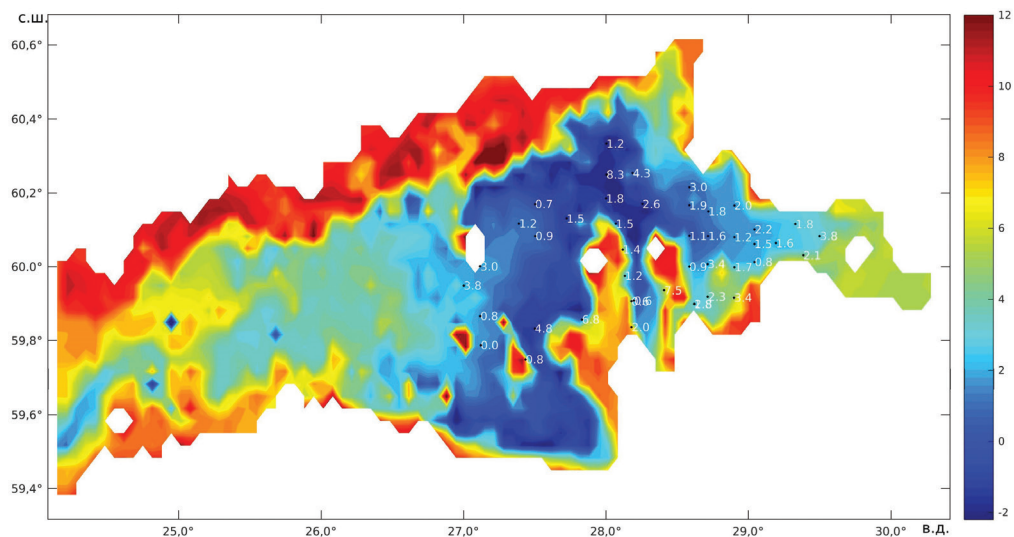


Рис. 3. Распределение концентрации придонного растворенного кислорода (мл/л) за 15—22 июля 2010 г.

Цветовая шкала — результаты моделирования, цифрами указаны данные натурных наблюдений.

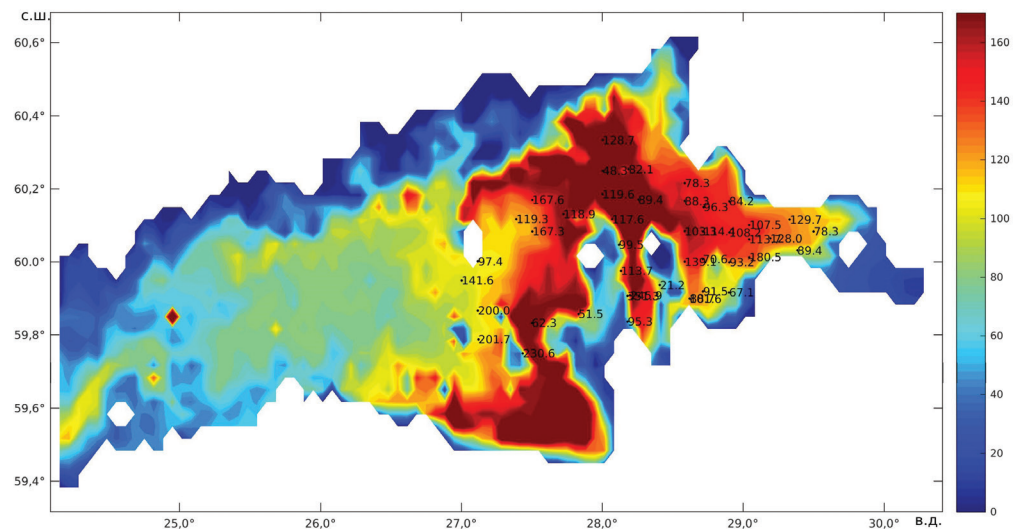


Рис. 4. Распределение концентрации придонных фосфатов (мг Р/л) за 15—22 июля 2010 г.

Цветовая шкала — результаты моделирования, цифрами указаны данные натурных наблюдений.

фосфора, варьирует от 43 до 112 %. В то же время вклад внешней нагрузки РОФ с учетом обмена с Балтикой в первичную продукцию залива составляет от 8 до 19 % ежегодно.

Анализ среднегодовых значений компонентов баланса фосфора показывает, что источниками фосфора в пелагической системе являются потоки из донных отложений и внешняя нагрузка. Вынос фосфора из водной толщи залива обеспечивается процессом седиментации и обменом на открытой границе (рис. 5).

По сравнению с внутренними процессами экспорт общего фосфора из залива в Балтийское море незначителен (рис. 5), однако распределение потоков различных фракций фосфора показывает, что обмен на границе происходит главным образом за счет выноса растворенного неорганического фосфора, в то время как в залив фосфор поступает в виде лабильного РОВ (рис. 6).

Круговорот азота, в отличие от круговорота фосфора включает в себя такие дополнительные процессы, как азотфиксация и денитрификация. Анализ среднегодовых значений составляющих баланса азота показывает, что основной вклад вносят внешняя нагрузка, а также выход из донных отложений и азотфиксация. Вынос азота из водной системы происходит за счет процесса седиментации, обмена на открытой границе и денитрификации (рис. 7). В водной толще потери азота за счет денитрификации незначительны.

Так же как и для фосфора, через открытую границу происходит отток общего азота из залива в Балтийское море (см. рис. 7). Распределение потоков различных фракций азота показывает, что обмен на границе происходит главным образом за счет поступления лабильной фракции растворенного органического азота и

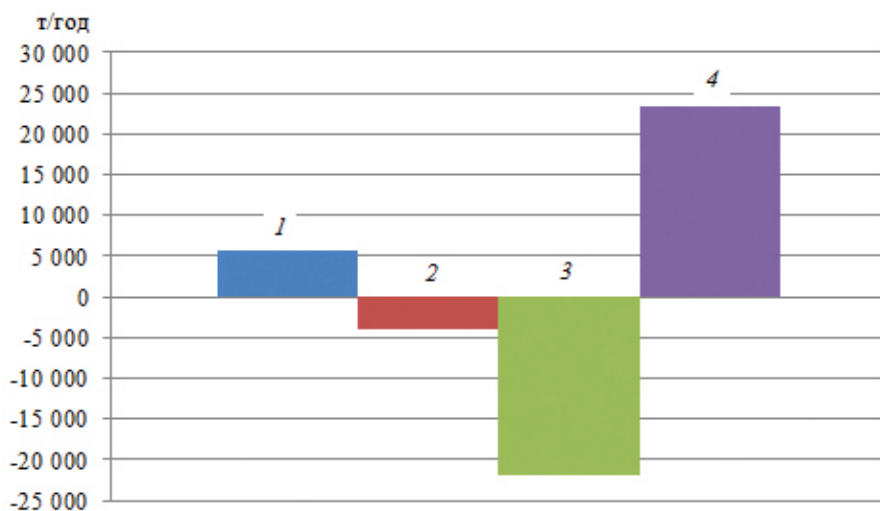


Рис. 5. Среднегодовой баланс общего фосфора (т/год) в водах Финского залива.

1 — внешняя нагрузка, 2 — обмен на границе, 3 — седиментация, 4 — выход из отложений.

в незначительном количестве в виде взвешенной органики. Из Финского залива азот выносится в виде стойкой фракции РОА и в несколько меньшем количестве в минеральной форме (рис. 8).

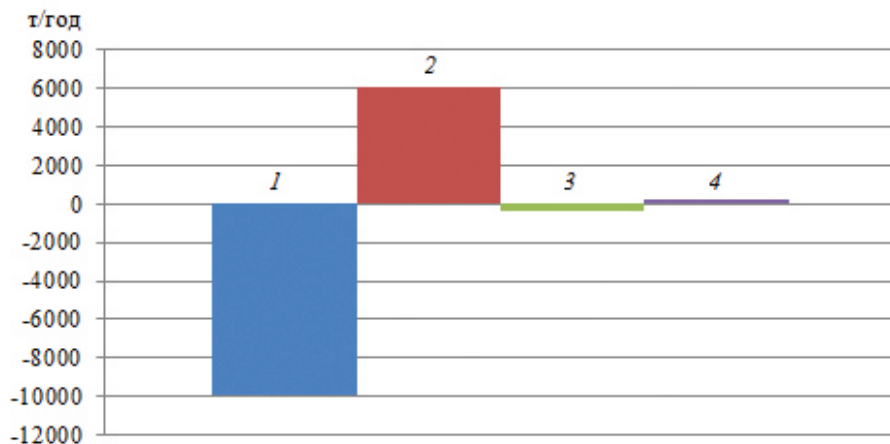


Рис. 6. Поток органического и неорганического фосфора (т/год) на жидкой границе области моделирования (см. рис. 2).

1 — растворенный неорганический фосфор,
2 — лабильный растворенный органический фосфор,
3 — стойкий растворенный органический фосфор, 4 — взвешенный органический фосфор.

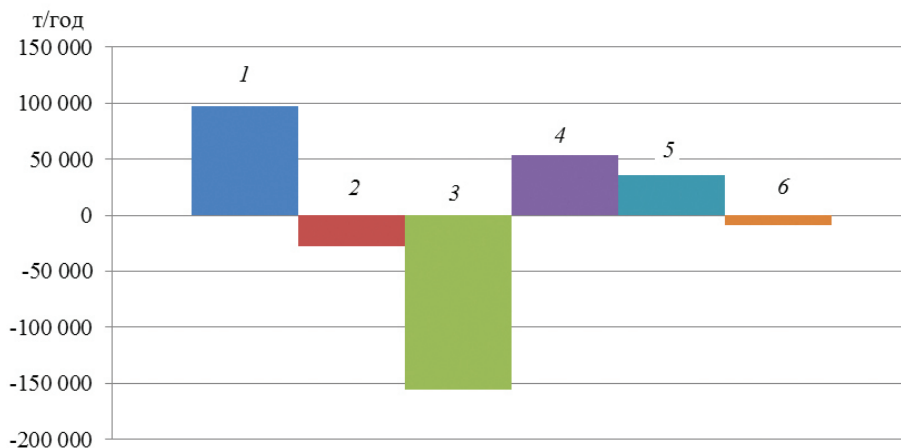


Рис. 7. Среднегодовой баланс общего азота (т/год) в водах Финского залива.

1 — внешняя нагрузка, 2 — обмен на границе, 3 — седиментация,
4 — выход из отложений, 5 — азот-фиксация, 6 — денитрификация.

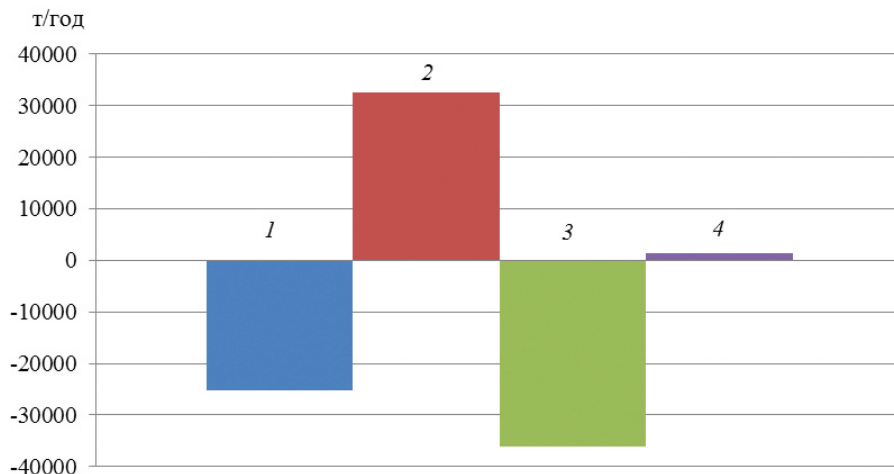


Рис. 8. Потoki органического и неорганического азота (т/год) на жидкой границе области моделирования.

1 — растворенный неорганический азот, 2 — лабильный растворенный органический азот, 3 — стойкий растворенный органический азот, 4 — взвешенный органический азот.

Выводы

В результате проведенного исследования показано, что обмен азотом и фосфором между Финским заливом и открытой частью Балтийского моря в исследуемый период имеет четко выраженную закономерность. Вынос из залива осуществляется в виде минерального азота и фосфора и стойкой фракции РОВ, а поступление в акваторию залива происходит в виде лабильного РОВ.

Таким образом, учет растворенных органических форм азота и фосфора с учетом их стойкости к процессам минерализации является необходимым в моделях эвтрофикации Балтийского моря как для более реалистичного учета внешних нагрузок, так и для более достоверного описания процессов транспорта и трансформации биогенных соединений в эвтрофированном водоеме.

О.М. Владимирова и Т.Р. Ерёмину выполняли работу в рамках осуществления научной деятельности по базовой части государственного задания № 5.6010.2017/8.9 БЧ Министерства образования и науки РФ; А.В. Исаев и В.А. Рябченко выполняли работу в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2019-0015).

Список литературы

1. Ерёмину, Т.Р., Исаев, А.В., Рябченко, В.А. Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 118—127.

2. Проект «Балтика»: Проблемы исследования и моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып.5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч. 2 / Под ред. И.Н. Давидана и О.П. Савчука. СПб: Гидрометеиздат, 1997.
3. Рябченко, В.А., Карлин, Л.Н., Исаев, А.В., Ванкевич, Р.Е., Ерёмкина, Т.Р., Молчанов, М.С., Савчук, О.П. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 41—50.
4. Daewel, U., Schrum, C. Simulating long-term dynamics of the coupled North Sea and Baltic Sea ecosystem with ECOSMO II: Model description and validation // J. Mar. Syst. 2013. V. 119—120. P. 30—49.
5. Deutsch, B., Alling, V., Humborg, C., Korth, F., Mörrth, C.M. Tracing inputs of terrestrial high molecular weight dissolved organic matter within the Baltic Sea ecosystem // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 4465—4475.
6. Eilola, K., Meier, H. M., Almroth, E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study // J. Mar. Syst. 2009. V. 75. P. 163—184.
7. Gaspar, P., Gregoris, Y., Lefevre, J.-M. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site // J. Geophys. Res. 1990. V. 95-C9. P. 179—193.
8. Gustafsson, E., Deutsch, B., Gustafsson, B.G., Humborg, C., Mörrth, C.-M. Carbon cycling in the Baltic Sea. The fate of allochthonous organic carbon and its impact on air – sea CO₂ exchange // J. Mar. Syst. 2013. V. 129. P. 289—302. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.07.005
9. HELCOM. Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan – Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea. 3 October 2013, Copenhagen, Denmark. <http://helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Ministerial%20declaration> (Accessed on 01.04.2018)
10. Hoikkala, L., Kortelainen, P., Soinne, H., & Kuosa, H. Dissolved organic matter in the Baltic Sea // J. Mar. Syst. 2015. V. 142. P.47—61. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.10.005/
11. Losch, M., Menemenlis, D., Campin, J.-M., Heimbach, P., and Hill C. On the formulation of sea-ice models. Part 1: Effects of different solver implementations and parameterizations // Ocean Modelling. 2010. V. 33 (1—2). P. 129—144. doi:10.1016/j.ocemod.2009.12.008.
12. Marshall J., Adcroft A., Hill C., Perelman L., and Heisey C. A finite-volume, incompressible navier-stokes model for studies of the ocean on parallel computers // J. Geophys. Res. 1997. V. 102 (C3). P. 5753—5766.
13. Meier, H.E.M., Edman, M.K., Eilola, K.J., Placke, M., Neumann, T., Andersson, H.C., Brunnabend, S.-E., Dieterich, C., Frauen, C., Friendland, R., Gröger, M., Gustafsson, B.G., Gustafsson, E., Isaev, A., Kniebusch, M., Kuznetsov, I., Müller-Karulis, B., Omstedt, A., Ryabchenko, V., Saraiva, S., Savchuk, O.P. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // Front. Mar. Sci. 2018. 5:440. doi: 10.3389/fmars.2018.00440
14. Myrberg, K., Ryabchenko, V., Isaev, A., Vankevich, R., Andrejev, O., Bendtsen, J., Erichsen, A., Funkquist, L., Inkala, A., Neelov, I. et al. Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland // Boreal Environmental Research. 2010. V. 15. P. 453—479.
15. Neelov, I.A., Eremina, T.R., Isaev, A.V., Ryabchenko, V.A., Savchuk, O.P. and Vankevich, R.E. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model // Proc. Estonian Academy of Sciences, Biology, Ecology. 2003. V. 52. P. 346—359.
16. Sandberg, J., Andersson, A., Johansson, S., Wikner, J. Pelagic foodweb structure and carbon budget in the northern Baltic Sea: potential importance of terrigenous carbon // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2004. V. 268. P. 13—29.
17. Savchuk O.P., Eremina T.R., Isaev A.V., Neelov I.A. Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios // Hydrobiologia. 2009. No. 629. P. 225—237.
18. Schrum, C., Backhaus, J. Sensitivity of atmosphere – ocean heat exchange and heat content in the North Sea and the Baltic Sea // Tellus. 1999. V. 51. P.526—549.
19. The Gulf of Finland assessment / Editors: Mika Raateoja and Outi Setälä. Reports of the Finnish environment institute 27 | 2016. Finnish Environment Institute, 2016. 363 p.

20. *Vichi, M., Lovato, T., Lazzari, P., Cossarini, G., Gutierrez Mlot, E., Mattia, G., Masina, S., Mc Kiver, W. J., Pinardi, N., Solidoro, C., Tedesco, L., Zavatarelli, M.* The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.1., Tech. Rep. BFM Report series N. 1 Release 1.1, CMCC, URL <http://bfm-community.eu>, 2015.
21. *Vichi, M., Pinardi, N., Masina, S.* A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: Theor // *J. Marine Systems*. 2007. V. 64 (1—4). P. 89—109.
22. *Vladimirova, O.M., Eremina, T.R., Isaev, A.V., Ryabchenko, V.A., Savchuk, O.P.* Modelling dissolved organic nutrients in the Gulf of Finland. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4 (в печати).
23. *Zhang, J., Hibler, W.D., III.* On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 (C4). P. 8691—8702.