

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОТОКОВ ФОСФОРА В ВОДНОЙ СРЕДЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.М. Владимирова<sup>1</sup>, Т.Р. Еремина<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, А.В. Исаев<sup>2</sup>, канд. геогр. наук,  
В.А. Рябченко<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, О.П. Савчук<sup>3,4</sup>, канд. геогр. наук

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Балтик Нест институт, Центр Балтийского моря Стокгольмского университета, Стокгольм, Швеция

## QUANTITATIVE EVALUATION OF THE PHOSPHORUS FLOWS IN PELAGIC SYSTEM OF THE GULF OF FINLAND BASED ON THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING

O.M. Vladimirova<sup>1</sup>, T.R. Eremina<sup>1</sup>, Cand.Sc., A.V. Isaev<sup>2</sup>, Cand.Sc., V.A. Ryabchenko<sup>2</sup>, Dr.Sc., O.P.  
Savchuk<sup>3,4</sup>, Cand.Sc.

<sup>1</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Stockholm, Sweden

*В работе представлены результаты количественных оценок потоков фосфора в Финском заливе на основе математического моделирования с использованием модифицированной модели SPBEM-2. На основе данных оценок подтверждена значимость учета растворенной органической формы для азота и фосфора в моделях эвтрофикации для Финского залива и Балтийского моря в целом.*

*The results of phosphorus flows quantitative evaluations for the Gulf of Finland based on mathematical modeling using modified model SPBEM-2 are discussed. There were confirmed the significance of phosphorus and nitrogen dissolved organic forms in eutrophication models for the Gulf of Finland and Baltic Sea.*

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. Хорошо известно, что наряду с минеральными формами азота и фосфора, в водную среду в значительном объеме поступают их органические компоненты [1]. Исследования показали, что растворенное органическое вещество играет значительную роль в функционировании экосистемы Балтийского моря [2]. В существующих моделях экосистемы для Балтийского моря органическое вещество представлено только в виде детрита, что подразумевает использование коэффициента биодоступности для биогенной нагрузки, поступающей с речным стоком. Это приводит к занижению поступающей нагрузки по сравнению с определяемыми ХЕЛКОМ значениями [3]. Поэтому целью данной работы является оценка значимости учета растворенного органического азота и фосфора в моделях эвтрофикации Балтийского моря.

Исследование влияния растворенного органического вещества на процесс эвтрофикации Финского залива проводилось с использованием модифицированной Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM-2) [4]. Для достижения поставленных целей была выполнена модификация модели SPBEM за счет включения четырех дополнительных уравнений, описывающих перенос и трансформацию легко окисляемых и стойких форм растворенных азота и фосфора. Подробное описание постановки и задачи и верификация описаны в работе [4]. Моделирование изменчивости характеристик водной среды Финского залива выполнялись для периода с 2009 по 2014 годы. В данной работе будут рассматриваться количественные характеристики потоков фосфора, полученные в результате моделирования.

Баланс фосфора Финского залива представляет собой суперпозицию внутреннего круговорота и обмена через внешние границы. По результатам математического моделирования были рассчитаны годовые потоки фосфора (таблица 1). Анализ таблицы 1 показывает, что

потребление фосфора фитопланктоном варьируется от 63 тыс. тонн до 100 тыс. тонн в год. При этом следует отметить, что суммарное поступление минеральной формы фосфора в акваторию Финского залива превышает создаваемую первичную продукцию на 10000 тонн в год. Объяснение данному наблюдению можно найти, рассмотрев обмен фосфором на жидкой границе (рис. 1). Рисунок 1 показывает, что импорт в акваторию залива происходит в виде быстро окисляемого растворенного органического фосфора (LDOP), который разлагается до минерального фосфора, а экспорт в виде минеральной формы (DIP).

Таблица 1. Годовые потоки фосфора, тонн год<sup>-1</sup>

Год	Потребление P (Vp)	Экскреция DIP	Экскреция LDOP	Минерализация	Выход из донных отложений	Седиментация	Внутриводные процессы DOP (Qi)	Поступление DOP(Qo)	Qo/Qi %	Qo/Vp%
2009	63451	28375	6656	20344	27582	25109	<b>9800</b>	<b>7946</b>	81	13
2010	68839	37417	8777	17914	31919	19951	<b>11663</b>	<b>6453</b>	55	9
2011	100674	61425	14408	25274	25638	22891	<b>18079</b>	<b>7792</b>	43	8
2012	71617	38516	9035	20695	18207	21802	<b>12106</b>	<b>13482</b>	111	19
2013	65931	34133	8006	26220	19771	20194	<b>10968</b>	<b>12233</b>	112	19
2014	73111	39159	9185	21435	17554	21008	<b>12152</b>	<b>6322</b>	52	9

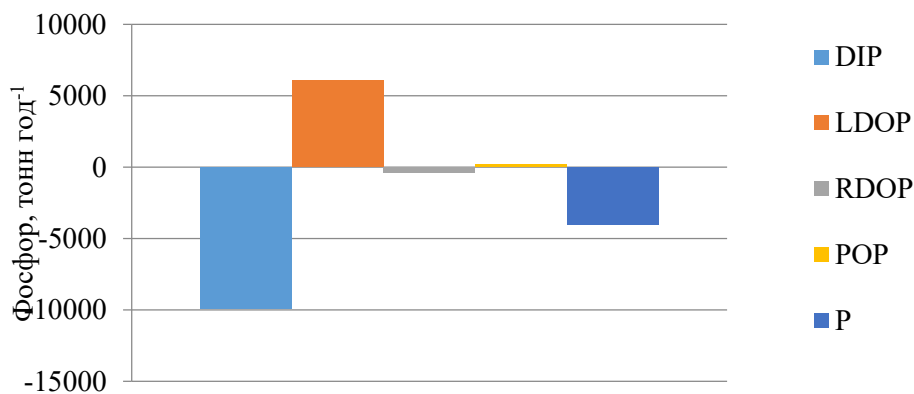


Рис. 1. Потоки органического и неорганического фосфора на жидкой границе в Финском заливе

Таким образом, зная все составляющие баланса фосфора, можно оценить вклад различных источников в формирование первичной продукции. В среднем за период расчета вклад в первичную продукцию различных источников минерального фосфора составляет:

- за счет экскреции минеральной формы фосфора - 48%,
- за счет выхода из донных отложений – 28%,
- за счет внешних нагрузок – 11%,
- за счет обмена на жидкой границе – 9%,
- за счет минерализации автохтонного органического вещества – 4%.

Внутри залива обмен фосфором происходит по большей части за счет поступления из донных отложений и процесса седиментации, в то время как внешняя нагрузка и вынос на границе с Балтийским морем в 4-5 раз меньше (рис. 2, таблица 1). Вклад внутренних процессов в круговорот общего фосфора в заливе составляет от 43 до 112 % в год. В то же время, поступающий извне общий фосфор составляет от 8 до 19% потребляемого фитопланктоном фосфора.

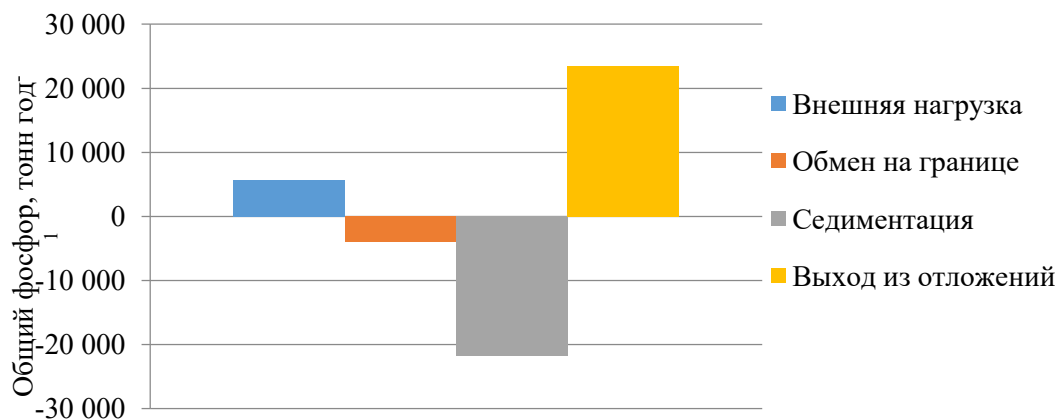


Рис. 2. Среднегодовые значения истоков и стоков фосфора в Финском заливе.

Проведенный анализ потоков фосфора в Финском заливе показывает, что учет в явном виде растворенного органического вещества в моделях эвтрофикации Балтийского моря необходим не только из-за более реалистичного описания внешних нагрузок и их изменений, но и для понимания механизмов обмена различными формами фосфора между суббассейнами Балтийского моря.

### Литература

1. Deutsch, B., Alling, V., Humborg, C., Korth, F., Mörth, C.M. Tracing inputs of terrestrial high molecular weight dissolved organic matter within the Baltic Sea ecosystem // Biogeosciences. 2012. 9. P. 4465–4475.
2. HELCOM. Summary Report on the Development of Revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and Updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan. <http://helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Associated%20documents/Supporting> (Accessed on 01.04.2018)
3. Meier et al. 2018. Assessment of scenario simulations for biogeochemical cycles in the Baltic Sea. Frontiers in Marine Sciences (in print).
4. Vladimirova, O.M., Eremina, T.R., Isaev, A.V., Ryabchenko, V.A., Savchuk, O.P. 2018. Modelling dissolved organic nutrients in the Gulf of Finland (in print).

*Авторы О.М. Владимирова и Т.Р. Еремина выполняли данную работу в рамках базовой части государственного задания проект номер N 5.6010.2017/БЧ, А.В. Исаев и В.А. Рябченко в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0014).*

*The authors O.M Vladimirova and T.R. Eremina were supported by Government Target Project N 5.6010.2017/БЧ of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The authors A.V. Isaev and V.A. Ryabchenko performed this research in the framework of the state assignment of FASO Russia (theme No. 0149-2018-0014).*