

*Т.Р. Ерёмкина, А.В. Исаев, В.А. Рябченко*

### **ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ТЕНДЕНЦИЙ В ЭВОЛЮЦИИ ЭКОСИСТЕМЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ В БУДУЩЕМ КЛИМАТЕ**

*T.R. Eremina, A.V. Isaev, V.A. Ryabchenko*

### **ASSESSMENT AND FORECAST OF THE TRENDS IN THE ECOSYSTEM EVOLUTION OF THE EASTERN PART OF THE GULF OF FINLAND UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF CHANGES IN NUTRIENT LOADING IN A FUTURE CLIMATE**

*Оценка и прогноз экологического состояния Восточной части Финского залива выполнены на основе Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) с учетом возможных изменений климата и биогенных нагрузок в 21 столетии. Согласно модельным оценкам, меры по уменьшению биогенных нагрузок приведут к незначительным изменениям показателей эвтрофирования в будущем климате. Поэтому, уменьшение биогенной нагрузки, предполагаемое в Планах Действий по Балтийскому морю, сможет лишь частично компенсировать последствия потепления климата.*

*Ключевые слова: прибрежная экосистема, изменения климата, биогенные нагрузки, моделирование, сценарные расчеты, эвтрофикация, Финский залив.*

*Assessment and prediction of the ecological state of the Eastern part of the Gulf of Finland is implemented on the basis of the St. Petersburg model of the Baltic Sea eutrophication (SPBEM) taking into account possible changes in climate and nutrient loads in the 21<sup>st</sup> century. According to the model estimates, actions to reduce nutrient loads will lead to slight changes in eutrophication indicators in the future climate. Therefore, reducing nutrient loads, proposed in the Baltic Sea Action Plan, will only partly compensate the effects of global warming.*

*Key words: coastal ecosystems, climate change, nutrient loading, modeling, scenario calculations, eutrophication, Gulf of Finland.*

#### ***Введение***

Водные системы в Балтийском регионе в настоящее время функционируют в условиях изменений климата и усиления биогенной нагрузки. Совместное действие этих факторов обуславливает перестройку структуры и изменяет скорости процессов в водных экосистемах.

Наиболее интенсивно процесс эвтрофикации протекает в прибрежных зонах моря, задерживающих и преобразующих значительную долю биогенной нагрузки. Финский залив относится к одному из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря. В связи с этим, задача восстановления «хорошего экологического состояния» залива сохраняет свою актуальность [9, 10].

Согласно Плану Действий по Балтийскому морю (ПДБМ) ХЕЛКОМ страны балтийского региона должны уменьшить азотные и фосфорные нагрузки на морскую среду, что должно обеспечить улучшение состояния экосистем Балтийского моря. Однако, это сокращение будет происходить на фоне изменений климата, которые могут противодействовать мерам по снижению биогенных нагрузок.

Для оценки отклика экосистемы Финского залива на снижение биогенной нагрузки были получены модельные оценки на основе трехмерной гидродинамической модели, совмещенной с моделью биогеохимических циклов [18]. Однако в расчетах не учитывалось влияние изменения климата на эволюцию экосистемы залива.

Для изучения функционирования морских экосистем при различных сценариях изменения климата используются региональные эко-гидродинамические модели Балтийского моря [2, 5, 6, 7, 19], в том числе и отечественная Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (St.Petersburg Baltic Eutrophication Model) [15, 18]. Для оценки отклика морских экосистем Балтики на изменения климата и биогенных нагрузок, моделируется их функционирование при задании внешних воздействий на систему в соответствии с заранее разработанными сценариями для климата и нагрузок по фосфору и азоту.

Полученные модельные оценки изменений морских экосистем Балтийского моря в 21 столетии на основе ансамблевого подхода [5, 12, 13] на 3-х моделях (BALTSEM, RCO-SCOBI и ERGOM), показали, что потепление климата может привести к росту температуры моря, уменьшению солености, сокращению периода ледового покрытия и площади морского льда, увеличению речного стока. Эти изменения гидрологического режима будут оказывать существенное воздействие на морские экосистемы Балтийского моря.

Целью настоящей работы является получение сценарных оценок изменения гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик в отдельных районах Восточной части Финского залива, в различной мере испытывающих воздействие стока Невы и влияние открытой Балтики, при возможных изменениях климата и биогенных нагрузок в будущем до 2100 г. Для получения этих оценок используется Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM.

### *Описание модели*

SPBEM представляет собой совместную трехмерную эко-гидродинамическую модель, имеющую модульную структуру. Гидродинамический модуль: z-координатная модель, основанная на полных уравнениях движения, переноса тепла и соли, объединенная с динамико-термодинамической моделью морского льда [15].

Биогеохимический модуль состоит из моделей пелагиали и бентали [17], описывающих биогеохимические циклы азота, фосфора и кремния в водной толще и донных осадках. Основными переменными пелагической модели являются: 3 вида фитопланктона (диатомовые, флагеллаты, сине-зеленые водоросли), зоопланктон, концентрации азота, фосфора и кремния в детрите, концентрации нитратов+нитритов, аммония, фосфатов, силикатов и растворенного кислорода. Кроме того, в модель включены 3 основные переменные в подсистеме бентали: это суммарные количества

биологически доступных фракций всех форм азота, фосфора и кремния в верхнем «активном» слое донных осадков.

Горизонтальное разрешение современной версии модели SPBEM составляет 9,3 км, вертикальное разрешение – 2 м в верхнем 100-метровом слое моря и 5 м в нижележащих слоях. Временной шаг модели равен 1200 с.

### ***Условия сценарных расчетов***

Изменения климата в будущем рассчитывались для периода 1 января 1961 г. – 31 декабря 2099 г. при задании сценария эмиссии парниковых газов и глобального социально-экономического развития A1B, предусматривающего быстрый рост экономики и численности населения с пиком в середине столетия, быстрое внедрение новых технологий, сокращение региональных различий в доходе на душу населения [11].

Региональные изменения климата оценивались на основе расчетов по региональным климатическим моделям, причем в качестве граничных условий использовались результаты расчетов по глобальным моделям климата.

В частности, в расчетах на модели SPBEM глобальные изменения атмосферных характеристик восстановлены по МОЦАО ECHAM5/MPI-OM Института Метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [16]. 3-х часовые атмосферные поля в Балтийском регионе восстановлены на основе МОЦАО Центра Россби (Rossby Centre Atmosphere Ocean Model, RCAO) Шведского метеорологического и гидрологического института [3] с пространственным разрешением 25×25 км.

Речной сток для современного периода с 1961 по 2007 г. был задан по имеющимся средним месячным данным [20]. Для периода 2007–2100 гг. сток был рассчитан с помощью статистической модели для 5 различных бассейнов Балтийского моря на основе разности осадки минус испарение для суши, полученной из региональной климатической модели RCAO [14].

Речные нагрузки рассчитаны как произведение концентраций биогенных элементов и расхода речных вод.

На границе с Северным морем уровень в Балтике рассчитывается с помощью статистической модели на основе меридиональной разности атмосферного давления над Северным морем [10]. В случае втекающей жидкости на открытой границе задаются средние месячные климатические профили температуры, солености и концентрации биогенов. Для вытекающей жидкости используется условие излучения, в том числе и для концентрации органических компонентов экосистемы (фито- и зоопланктон, детрит), площади и толщины льда. В случае втекающей жидкости эти характеристики полагаются равными нулю.

В качестве будущих изменений нагрузки биогенами рассматриваются 2 сценария: 1) опорный (REF), в котором используются современные атмосферные выпадения и концентрации в реках [4]; и 2) План Действий по Балтийскому морю (BSAP), в котором используются уменьшенные концентрации биогенов в реках [9] и задаётся 50 % уменьшение атмосферных выпадений. В сценарии REF после 2007 г. азотные выпадения и концентрации биогенов/органического вещества в реках предполагаются постоянными и равными их средним значениям в период 1995–2002 гг. В сценарии

BSAP в период с 2007 по 2020 г. концентрации биогенов в реках и атмосферные выпадения меняются линейно от современных до будущих значений. После 2020 г. эти характеристики считаются постоянными.

В качестве начальных условий использовались средние зимние (декабрь–февраль) трехмерные поля температуры, солености, нитратов+нитритов, фосфатов, аммония, силикатов и кислорода в Балтийском море. Эти поля были построены с помощью «Балтийской базы данных об окружающей среде» BED (Baltic Environmental Database) Стокгольмского университета [1]. Поля остальных искомым переменных (скорость течений, уровень моря, характеристики льда, концентрации органических компонент экосистемы) задавались нулевыми.

### *Результаты моделирования*

Для верификации модели было выполнено сравнение модельных характеристик, рассчитанных для современного периода по сценарию REF, с данными наблюдений [1] на станции F1, расположенной в Восточной части Финского залива. Сравнение проводилось на основе рассчитанных средних значений и интервалов изменчивости для следующих характеристик: температуры, солености, нитратов+нитритов, фосфатов, растворенного кислорода и хлорофилла «а». С целью получения климатических значений характеристик, осреднение проводилось по 30-летнему периоду 1971–2000 гг. Результаты сравнения показывают хорошее совпадение модельных и расчетных значений вертикального профиля температуры воды (рис. 1). Вместе с тем, модель дает заметное завышение по солености, согласие между модельными результатами и данными наблюдений оказалось плохим. Это может быть объяснено несогласованностью внешних воздействий (потоков пресной и солёной воды), определяющих содержание соли в Балтийском море. В частности, в Финском заливе это скорее всего связано с недооценкой стока р. Нева.

В отношении воспроизведения содержания биогенных элементов можно отметить, что модель хорошо воспроизводит вертикальное распределение содержания кислорода, дает неплохое согласие рассчитанных и наблюдаемых зимних концентраций минеральных форм фосфора и азота, а также удовлетворительное согласие летних значений хлорофилла.

### *Оценка отклика экосистемы на изменение климата и снижение биогенной нагрузки*

Анализ последствий изменения климата и биогенной нагрузки для Восточной части Финского залива, включающей внешний эстуарий р. Нева, выполнены для трех районов залива — мелководного, переходного и глубоководного (рис. 2).

*Последствия изменения климата.* Согласно результатам моделирования, температура воды в Восточной части Финского залива будет расти (табл. 1). В мелководном районе рост температуры будет наибольшим — 2,4°C, в переходном и глубоководном районах рост температуры составит 2,2°C и 2,1°C, соответственно.

Прогнозируемое увеличение речного стока обуславливает уменьшение солености во всех трех выделенных районах на 1,2–1,3 ‰ (табл. 2).

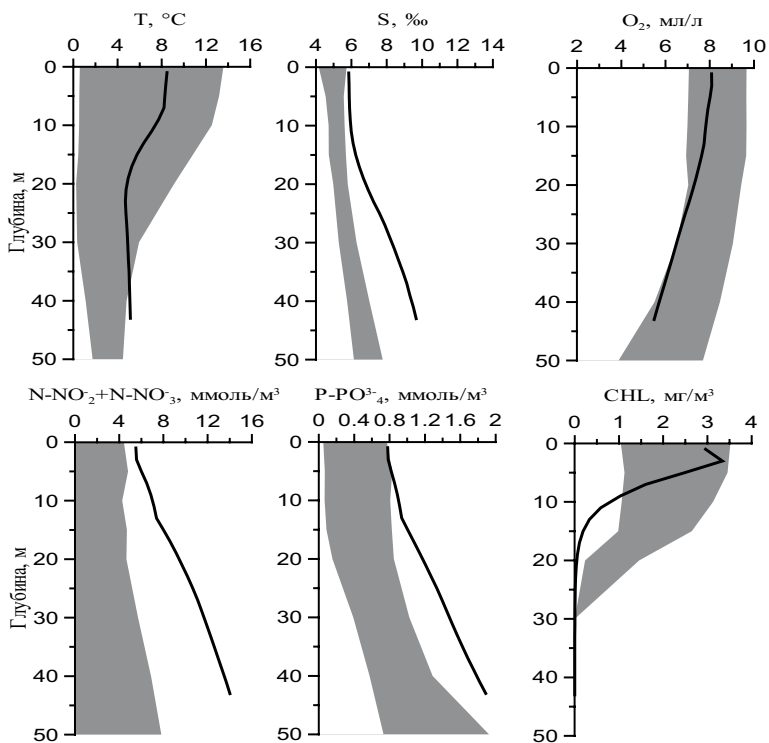


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений, осредненных за период с 1971 по 2000 г. на станции мониторинга F1 (60° 08' с.ш. 26° 20' в.д.)

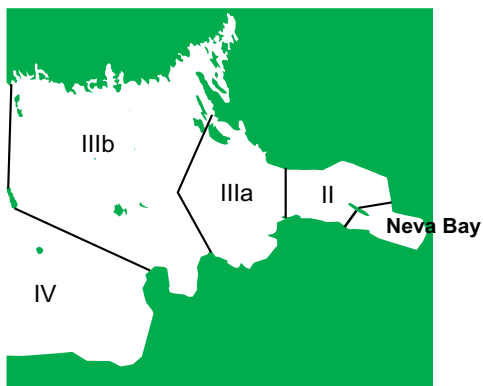


Рис. 2. Схема Восточной части Финского залива и деления его на подрайоны. II, IIIa и IIIb — мелководная, переходная и глубоководная зоны, соответственно

Таблица 1

**Средние значения температуры (°С) в Восточной части Финского залива  
в современном и будущем климате**

Средняя за вегетационный период, средняя по объему температура (°С)	Современный климат	Будущий климат
Мелководный район	10,4	12,8
Переходный район	9,9	12,1
Глубоководный район	8,1	10,2

Таблица 2

**Средние значения солености (‰) в Восточной части Финского залива  
в современном и будущем климате**

Средняя за вегетационный период, средняя по объему соленость (‰)	Современный климат	Будущий климат
Мелководный район	3,5	2,3
Переходный район	5,1	3,8
Глубоководный район	7,0	5,7

Уменьшение солености должно ослабить стратификацию вод Восточной части Финского залива. Таким образом, стратификация по солености в этой части залива в будущем климате будет слабее по сравнению с современным периодом. Однако увеличение температуры и небольшой вклад солености в плотность морской воды в рассматриваемом районе дают в результате небольшое усиление стратификации по плотности.

*Последствия снижения биогенной нагрузки.* Рассмотрим последствия снижения биогенной нагрузки, запланированное в ПДБМ (BSAP), на основе перечисленных выше показателей эвтрофикации.

Из-за роста температуры концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое в сценарии REF уменьшаются во всех рассматриваемых районах (табл. 3). В сценарии BSAP эта тенденция сохраняется, но абсолютные значения этого уменьшения становятся меньше: поверхностная концентрация растворенного кислорода уменьшается на 0,5 мл/л (на 0,7 мл/л в сценарии REF) по сравнению с современным климатом.

В придонном слое вместо уменьшения концентрации (на 0,2–0,5 мл/л) отмечается ее небольшой рост (на 0,01–0,24 мл/л). Это небольшое улучшение аэрации моря сопровождается уменьшением в течение годового цикла концентраций (зимнего запаса) биогенов (рис. 3). Наиболее сильное падение приходится на мелководный район, где в поверхностном слое фосфаты уменьшаются на 15 мг/м<sup>3</sup> (51 %), а нитраты — на 140 мг/м<sup>3</sup> (31 %).

В глубоководном районе тенденции к уменьшению концентрации фосфатов и нитратов в будущем климате не прослеживается, хотя в случае сценария BSAP значения концентрации этих биогенных соединений ниже, чем для сценария REF.

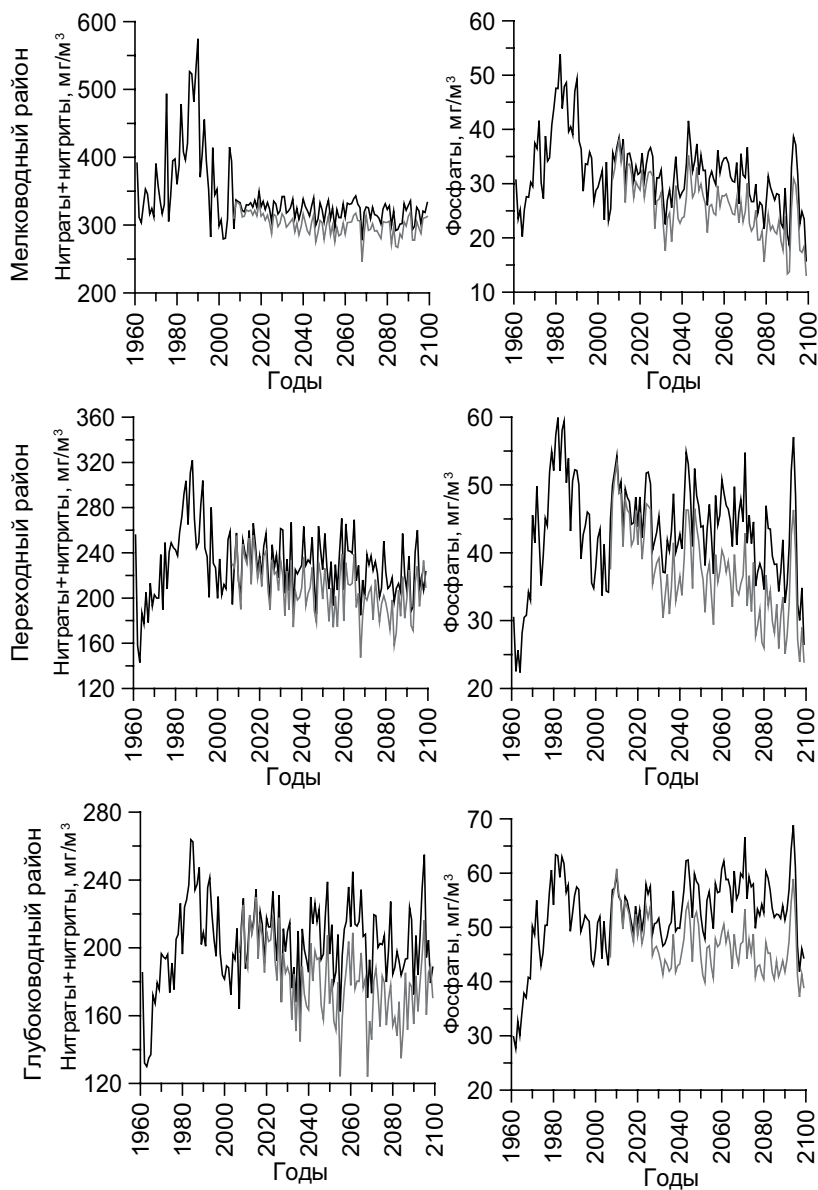


Рис. 3. Межгодовая изменчивость концентрации биогенных элементов в зимний период при различных сценариях изменения биогенных нагрузок в будущем климате (сценарий REF — черная линия, сценарий BSAP — серая линия)

Таблица 3

**Минимальные в течение годового цикла концентрации растворенного кислорода (мл/л)  
в Восточной части Финского залива в современном и будущем климате  
при различных внешних нагрузках**

Район	Период осреднения и сценарий		
	1970–2000 гг.	2070–2100 гг. REF	2070–2100 гг. BSAP
Поверхностный слой			
Мелководный	5,49	4,82	4,94
Переходный	5,48	4,79	5,02
Глубоководный	5,93	5,18	5,39
Придонный слой			
Мелководный	4,23	3,94	4,24
Переходный	3,70	3,53	3,94
Глубоководный	3,85	3,33	3,91

В соответствии с уменьшением зимних запасов биогенов уменьшаются и биомассы диатомовых, флагеллят и сине-зеленых водорослей (табл. 4). В результате прозрачность воды в Восточной части Финского залива слабо увеличивается — всего на 0,2–0,4 м (табл. 5).

Таблица 4

**Средние значения биомассы диатомовых, флагеллят и сине-зеленых в Восточной части  
Финского залива в современном и будущем климате при различных внешних нагрузках**

Район	Средние значения биомассы фитопланктона за вегетационный период (апрель–октябрь)		
	Период осреднения и сценарий		
	1970–2000 гг.	2070–2100 гг. REF	2070–2100 гг. BSAP
Диатомовые, мг/м <sup>3</sup>			
Мелководный	6,5	5,0	3,4
Переходный	9,3	10,8	8,9
Глубоководный	9,1	9,6	8,2
Флагелляты, мг/м <sup>3</sup>			
Мелководный	18,9	15,6	12,6
Переходный	16,9	15,8	13,8
Глубоководный	16,5	19,5	17,4
Сине-зеленые, мг/м <sup>3</sup>			
Мелководный	2,9	0,7	0,3
Переходный	12,6	5,8	3,2
Глубоководный	18,5	12,2	8,3



**Средние значения прозрачности (глубины диска Секки) в Восточной части Финского залива в современном и будущем климате при различных внешних нагрузках**

Район	Средние за вегетационный период (апрель–октябрь) значения прозрачности, м		
	Период осреднения и сценарий		
	1970–2000 гг.	2070–2100 гг. REF	2070–2100 гг. BSAP
Мелководный	2,8	3,0	3,2
Переходный	3,3	3,3	3,5
Глубоководный	3,3	3,2	3,5

**Выводы**

Согласно полученным оценкам, в будущем климате изменения гидрологического режима в Восточной части Финского залива, вызванные ростом температуры воздуха и усилением речного стока, выразятся в интенсификации циркуляции и некотором усилении стратификации в этом районе. Зимние концентрации биогенных элементов в поверхностном слое Восточной части Финского залива в будущем климате будут уменьшаться в мелководном и переходном районах. Биомассы диатомовых и флагеллят уменьшатся в мелководном районе и возрастут в переходном и глубоководном районах, биомассы сине-зеленых окажутся повсюду меньше. Потепление климата приведет к некоторому ухудшению аэрации морской среды залива. Однако все указанные изменения будут относительно невелики, так что прозрачность воды останется практически неизменной. Таким образом, уменьшение биогенной нагрузки, предполагаемое в Плане Действий по Балтийскому морю, сможет лишь частично компенсировать негативные последствия потепления климата.

Следует отметить, что оценки для трех районов российской части Финского залива получены на модели, имеющей горизонтальное разрешение 9,3 км. Принимая во внимание небольшие размеры исследованных районов, находящихся в непосредственной близости от границы расчетной области, на которой задается сток Невы и поступающие с ним биогенные нагрузки, то полученные оценки можно рассматривать лишь как предварительные. В дальнейшем для повышения качества оценок требуется более точное задание граничных условий, а также увеличение горизонтального разрешения модели.

**Литература**

1. BED — Baltic Environmental Database at Baltic Nest Institute. — [http://nest.su.se/bed].
2. Bendtsen J., Hansen J.L.S. Effects of global warming on hypoxia in the North Sea–Baltic Sea transition zone. // *Ecol. Modell.*, 2013, 264, 17–26 pp.
3. Döscher R., Willén U., Jones C. *et al.* The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCO. // *Boreal Environ Res.*, 2002, 7, 183–192 pp.
4. Eilola K., Meier H.E.M., Almroth E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study. // *J. Mar. Sys.*, 2009, 75, 163–184 pp.

5. *Eilola K., Gustafsson B.G., Kuznetsov I., Meier H.E.M., Neumann T., Savchuk O.P.* Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea. // *Journal of Marine Systems*, 2011, 88, 267–284 pp.
6. *Eilola K., Hansen J., Meier H.E.M., Myrberg K., Ryabchenko V.A., Skogen M.D.* Eutrophication Status Report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study. Years 2001–2005. // *Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Oceanografi*, 2011, 110, 66 p.
7. *Gustafsson B.G.* A time-dependent coupled-basin model for the Baltic Sea. // *Earth Sciences Centre, Göteborg University*, 2003, rep. C47, 61 p.
8. *Gustafsson B.G., Andersson H.C.* Modeling the exchange of the Baltic Sea from the meridional atmospheric pressure difference across the North Sea. // *J. Geophys. Res.*, 2001, 106, 19,731–19,744.
9. HELCOM, 2007. Toward a Baltic Sea unaffected by eutrophication. Background document to Helcom Ministerial Meeting, Krakow, Poland, Tech. rep., Helsinki Commission, Helsinki, Finland.
10. HELCOM, 2014. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011 — A concise thematic assessment. // *Baltic Sea Environment Proceedings*, 143, 40 p.
11. *Meier H.E.M., Eilola K., Almroth E.* Climate-related changes in marine ecosystems simulated with a three-dimensional coupled biogeochemical-physical model of the Baltic Sea. // *Clim Res.*, 2011, 48, 31–55 pp.
12. *Meier H.E.M., Andersson H.C., Eilola K., Gustafsson B.G., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Neumann T., Savchuk O.P.* Hypoxia in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea. // *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24608. — DOI 10.1029/2011GL049929.
13. *Meier H.E.M., Müller-Karulis B., Andersson H.C., Dieterich C., Eilola K., Gustafsson B.G., Höglund A., Hordoir R., Kuznetsov I., Neumann T., Ranjbar Z., Savchuk O.P., Schimanke S.* Impact of climate change on ecological quality indicators and biogeochemical fluxes in the Baltic Sea: a multi-model ensemble study. // *Ambio*, 2012, 41, 558–573 pp. — DOI 10.1007/s13280-012-0320-3.
14. *Meier H.E.M., Hordoir R., Andersson H.C., Dieterich C., Eilola K., Gustafsson B.G., Höglund A., Schimanke S.* Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961–2099. // *Climate Dynamics*, 2012, 39, 2421–2441 pp. — DOI 10.1007/s00382-012-1339-7.
15. *Neelov I.A., Eremina T.R., Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Savchuk O.P., Vankevich R.E.* A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model. // *Proceedings Estonian Academy of Science. Biology. Ecology*, 2003, 52, 347–359 pp.
16. *Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U. et al.* Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. // *Journal of Climate*, 2006, 19, 3771–3791 pp.
17. *Savchuk O.P.* Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. // *J. Mar. Sys.*, 2002, 32, 235–280 pp.
18. *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, 629, 225–237 pp.
19. *Savchuk O.P., Gustafsson B.G., Müller-Karulis B.* BALTSEM — a marine model for decision support within the Baltic Sea region. // *Baltic Nest Institute Technical Report*, 2012, 7, 55 p. — ISBN: 978-91-86655-06-8.
20. *Stålnacke P., Grimvall A., Sundblad K., Tonderski A.* Estimation of riverine loads of nitrogen and phosphorus to the Baltic Sea 1970–1993. // *Environ. Monit. Assess.*, 1999, 58, 173–200 pp.

Работа выполнена в рамках осуществления научной деятельности по базовой части государственного задания №2014/166 Минобрнауки РФ.