

УДК 551.465

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭВТРОФИКАЦИИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В СОВРЕМЕННОМ И БУДУЩЕМ КЛИМАТЕ

© 2016 г. В. А. Рябченко¹, Л. Н. Карлин², А. В. Исаев^{1,2}, Р. Е. Ванкевич^{1,2},
Т. Р. Еремина², М. С. Молчанов³, О. П. Савчук^{4,5}

¹ Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН
e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru, isaev@rshu.ru, rvankevich@mail.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
e-mail: tanya@rshu.ru, isaev@rshu.ru, rvankevich@mail.ru

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург
e-mail: mms@aari.ru

⁴ Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет
e-mail: oleg.savchuk@su.se

⁵ Baltic Sea Centre, Stockholm University
e-mail: oleg.savchuk@su.se

Поступила в редакцию 16.05.2014 г.

После доработки 27.01.2015 г.

Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) используется для оценки экологического состояния моря при возможных изменениях климата и биогенных нагрузок в 21 столетии. Согласно модельным оценкам, в будущем климате качество воды будет ухудшаться по сравнению с современными условиями. Это ухудшение оказалось сильнее в случае использования сценария потепления климата с более сильным повышением приземной температуры воздуха в будущем. При рассмотренных сценариях изменения климата, его потепление приведет к увеличению площади бескислородных и гипоксических зон. Уменьшение биогенной нагрузки, предполагаемое в Плане Действий по Балтийскому морю, сможет лишь частично компенсировать негативные последствия потепления климата.

DOI: 10.7868/S0030157416010160

ВВЕДЕНИЕ

Морские экосистемы Балтийского моря в настоящее время функционируют в условиях изменений климата и заметного эвтрофирования. Накопление биогенных элементов (минеральных соединений азота и фосфора) в морской среде связано с их поступлением с суши и из атмосферы. Избыток минеральных соединений азота и фосфора приводит к эвтрофикации вод, проявляющейся в цветении сине-зеленых водорослей, снижении прозрачности воды, обрастании берегов, изменении кормовой базы рыб и смене их видового состава. В настоящее время состояние большей части Балтийского моря неудовлетворительно и задача восстановления “хорошего экологического состояния” моря остается по-прежнему центральной проблемой [14, 15]. Для достижения этого состояния необходимо уменьшить азотные и фосфорные нагрузки на Балтийское море. Эти уменьшения будут происходить на фоне изменений климата, которые могут противодействовать мерам по снижению биогенных нагрузок.

Для количественного описания функционирования морских экосистем в условиях изменений климата и усиления биогенной нагрузки привлекаются детальные региональные эко-гидродинамические модели Балтийского моря. Первой среди этих моделей была разработана долгосрочная крупномасштабная модель эвтрофикации Балтийского моря BALTSEM (the Baltic sea Long-Term large-Scale Eutrophication Model) [9, 27, 30]. В модели BALTSEM Балтийское море представлено 13 бассейнами с горизонтально-осредненными характеристиками, которые динамически связаны между собой и имеют высокое разрешение по вертикали. Позже были разработаны трехмерные модели: экологическая региональная модель океана ERGOM (the Ecological Regional Ocean Model) [24, 25]; шведская биогеохимическая модель прибрежных и океанских вод, объединенная с моделью циркуляции океана центра Россби RCO-SCOB1 (the Swedish Coastal and Ocean Biogeochemical model coupled to the Rossby Centre Ocean circulation model) [5, 17]; Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (St. Petersburg Baltic Eutrophication

Таблица 1. Многолетние средние (1970–2005 гг.) m и среднеквадратичное отклонение σ площади $S_{\text{гипокс}}^{\text{гипокс}}^{\text{гипокс}}$ гипоксических зон (в 10^3 км^2) для разных моделей

Модель/данные	BED [2]	BALTSEM	ERGOM	RCO–SCOBI	Ансамбль	SPBEM (ECHAM5)	SPBEM (HadCM3)
$S_{\text{гипокс}}, m$	49	58	54	57	56	46	53
$S_{\text{гипокс}}, \sigma$	12	15	6	7	8	11	11

Model) [22, 29]. Оценка возможных изменений морских экосистем производится путем имитации их поведения при задании воздействий на систему в соответствии с заранее разработанными сценариями изменения климата и биогенных нагрузок на Балтийское море.

Наиболее детальные модельные оценки таких изменений морских экосистем Балтийского моря в 21 столетии получены недавно на основе ансамблевого подхода [19–21]. В [19–21], используя ансамбль из 3-х моделей (BALTSEM, RCO-SCOBI и ERGOM), было показано, что потепление климата может привести к росту температуры моря, уменьшению солёности и площади морского льда, увеличению речного стока. Эти изменения гидрологического режима будут оказывать существенное воздействие на морские экосистемы Балтийского моря. При потеплении климата площади гипоксических и аноксических зон в Балтийском море будут увеличиваться по сравнению с их современными значениями. Этот результат в качественном отношении не зависит от того, какая глобальная климатическая модель и какой сценарий потепления климата использовались в расчетах.

Следует подчеркнуть, что описанные выше оценки, так же как и оценки, представленные в настоящей работе, основаны на гипотетических сценариях Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) эмиссии концентрации парниковых газов в атмосфере [32], в соответствии с которыми климатические модели предсказывают потепление климата в 21 столетии. Используемые климатические модели с той или иной степенью точности и полноты описывают изменения климата в современный период, хотя полученные решения могут и не отражать всех особенностей его реальных изменений, таких как, например, похолодание 2008–2011 гг. в Арктике, которое в 2012 г. сменилось потеплением, когда был зафиксирован новый рекорд минимума площади морского льда за период спутниковых наблюдений. Упомянутые изменения происходят на фоне наблюдаемой последние 30–40 лет устойчивой тенденции потепления климата.

Представление о надежности полученных результатов дают количественные оценки неопределенности предсказаний физических и биогеохимических характеристик моря. Эти неопределенности обусловлены: 1) упомянутыми выше

неопределенностями оценок будущих эмиссий углекислого газа в атмосферу, 2) неточностями глобальных моделей климата, используемых для выработки граничных условий для региональных моделей климата, 3) неточностями региональных моделей климата, на основе которых задается атмосферное воздействие и речной сток в будущем периоде, 4) неопределенностями, связанными с заданием условий на открытой границе моря в проливах в будущем, 5) неопределенностями оценок будущих биогенных нагрузок с суши и из атмосферы, 6) неточностями биогеохимических моделей и задания начальных условий для биогеохимических характеристик в море и донных отложениях. Оценка всех указанных неопределенностей представляет собой сложную задачу, которая, несмотря на значительные усилия, принятые в [6, 18–21, 23], в полном объеме до сих пор не решена, и не является основной целью настоящей работы.

Отметим, тем не менее, что качество моделей, по которым были получены оценки [19–21], анализировалось в [6] путем сравнения статистических характеристик (средние сезонные и годовые значения, стандартные отклонения для солёности, температуры, кислорода, нитратов, аммония и фосфатов, площадь гипоксических зон и др.) результатов ретроспективных расчетов на период 1970–2005 гг. для каждой из 3-х участвующих в ансамбле моделей с имеющимися данными наблюдений. В частности, было получено, что модели дают завышенные на 10–20% средние за указанный период значения площади гипоксических зон $S_{\text{гипокс}}$ (одной из важных характеристик эвтрофикации моря) по сравнению с оценками, основанными на данных наблюдений [2]. Согласно [2], долгопериодный тренд в $S_{\text{гипокс}}$ в указанный период отсутствует. Среднеквадратичное отклонение $S_{\text{гипокс}}$ в моделях варьируется в пределах от на 50% меньше до на 25% больше, чем оцененное по данным [2] (см. табл. 1). Согласно [19], к концу 21 столетия ансамблевое среднее значение $S_{\text{гипокс}}$ для тех же 3-х моделей и 4-х различных климатических сценариев составит $80 \pm 25 \times 10^3 \text{ км}^2$ в случае сохранения биогенных нагрузок на современном уровне и $55 \pm 35 \times 10^3 \text{ км}^2$ в случае уменьшения биогенных нагрузок в соответствии с Планом Действий по Балтийскому морю (ПДБМ) (Baltic Sea Action Plan (BSAP)) [14].

Целью настоящей работы является оценка функционирования морских экосистем Балтийского моря при возможных изменениях климата и биогенных нагрузок в будущем до 2100 г. Для оценки неопределенности прогноза рассматриваются сильно отличающиеся между собой сценарии будущих изменений климата и различные сценарии биогенной нагрузки: 1) сохранение современного уровня нагрузок и 2) их уменьшение в соответствии с ПДБМ (BSAP). Для получения этой оценки привлекается Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря SPBEM.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

SPBEM представляет собой совместную трехмерную эко-гидродинамическую модель, имеющую модульную структуру. Гидродинамический модуль модели, более детально описанный в статье [22], состоит из моделей циркуляции моря и морского льда. Модель морского льда позволяет рассчитывать скорость дрейфа льда, его толщину и площадь, толщину снега на поверхности льда. Модель циркуляции моря основана на полных уравнениях гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики. Основные прогностические переменные модели – вектор скорости течений, температура и соленость воды, уровень моря. Рассчитанные в гидродинамическом модуле скорости течений используются в уравнениях переноса и трансформации компонентов биогеохимического модуля. Этот модуль состоит из моделей пелагиали и бентали [27], 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. Суммарные количества биологически доступных фракций всех форм азота, фосфора и кремния в верхнем, “активном” слое донных осадков рассматриваются как 3 основные переменные модели бентали.

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.

Дискретный аналог модели SPBEM обеспечивает сохранение массы воды в бассейне, количества движения, теплосодержания, содержания соли, биогенных элементов и других биогеохимических характеристик при отсутствии обменных потоков на границе с атмосферой и дном, речного стока и обмена на жидких границах бассейна. Поэтому так же, как и в работах [19–21], используе-

мые в модели внешние воздействия (атмосферный форсинг, характеристики речного стока, включая биогенные нагрузки, граничные условия в проливах, захоронение биогенных элементов в осадках) не обязательно находятся в балансе, моделируя естественные и антропогенные изменения состояния Балтийского моря.

УСЛОВИЯ РАСЧЕТОВ

Сценарии изменения климата. В расчетах с моделью SPBEM при задании атмосферных метеорологических воздействий (АМВ) использовались 2 сценария изменения климата для периода 1 января 1961 г.–31 декабря 2099 г. АМВ (облачность, скорость ветра, температура и относительная влажность воздуха в приводном слое атмосферы, осадки) были заданы на основе расчетов по региональной климатической модели Центра Россби Шведского метеорологического и гидрологического института RCAO (Rossby Centre Atmosphere Ocean model) [4]. На боковых границах для модели RCAO были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM Института Метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [26, 16] и HadCM3 Центра Хэдли в Великобритании [8]. В обоих случаях расчеты были выполнены при задании сценария эмиссии парниковых газов A1B [32], предполагающего быстрый экономический рост с использованием разнообразных источников энергии. В дальнейшем указанные АМВ называются для краткости АМВ-Е и АМВ-Н.

Речной сток для современного периода с 1961 по 2007 гг. был задан по имеющимся средним месячным данным [33]. Для периода 2007–2100 гг. он был рассчитан с помощью статистической модели для 5 различных бассейнов (Ботнический залив, Ботническое море, Финский залив, Центральная Балтика, Каттегат) на основе разности осадки минус испарение для суши, полученной из региональной климатической модели RCAO [20].

Уровень моря на открытой границе модельной области, расположенной в Каттегате, рассчитан с помощью статистической модели на основе меридиональной разности атмосферного давления над Северным морем [10]. На этой границе в случае втекающей жидкости задаются средние месячные климатические профили температуры, солености и концентрации биогенных веществ, для вытекающей жидкости используется условие излучения. Для вытекающей жидкости это условие используется также и для концентрации органических компонентов экосистемы (фито- и зоопланктон, детрит) и площади и толщины льда, в случае втекающей жидкости эти характеристики полагаются равными нулю.

Таблица 2. Средние по 16 станциям значения (M_{16}) разности (Δ) между расчетными и наблюдаемыми температурой T ($^{\circ}\text{C}$), соленостью S (‰), концентрацией нитратов (+нитритов) NO_3 (ммоль $\text{N}/\text{м}^3$), фосфатов PO_4 (ммоль $\text{P}/\text{м}^3$), растворенного кислорода O_2 (мл/л) и хл “а” Chl (мг/м³) в верхнем и придонном слоях, осредненное по периоду 1971–2000 гг., и число станций с хорошим NG ($0 \leq C < 1$) и удовлетворительным NS ($1 \leq C < 2$) согласием с данными наблюдений для каждой характеристики

Характеристики согласия расчетов и наблюдений	Верхний слой, 0–10 м								Придонный слой				
	ΔT год	ΔT , зима	ΔT , лето	ΔS , год	ΔNO_3 , зима	ΔPO_4 , зима	ΔO_2 , лето	ΔChl , лето	ΔT , год	ΔS , год	ΔNO_3 , зима	ΔPO_4 , зима	ΔO_2 , осень
M_{16} , E	1.1	0.7	1.5	1.5	0.9	0.3	-0.5	0.7	0.5	0.1	1.8	-0.1	0.5
NG: $0 \leq C < 1$	16	13	15	5	11	5	15	5	10	2	5	9	11
NS: $1 \leq C < 2$	0	3	1	1	3	9	1	8	4	6	3	3	4
M_{16} , H	0.5	-0.6	2.1	3.7	-0.3	0.3	-0.5	0.4	-0.1	2.0	3.2	-0.1	0.5
NG: $0 \leq C < 1$	16	14	13	4	10	5	15	4	8	2	7	9	10
NS: $1 \leq C < 2$	0	2	3	0	5	8	1	10	7	4	3	3	6

Примечание. Буквами E и H обозначены АМВ, рассчитанные на основе моделей ECHAM5 и HadCM3 соответственно.

Сценарии изменения биогенной нагрузки. Поступление с суши и из атмосферы азота и фосфора в современный период задается по данным компиляции, описанной в [12]. В качестве будущих изменений нагрузки биогенами рассматриваются 2 сценария: 1) опорный (REF), в котором используются современные атмосферные выпадения и концентрации в реках (см., например, [5]), и 2) ПДБМ (BSAP), в котором используются уменьшенные концентрации биогенных веществ в реках [14] и задается 50%-ное 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.

Таким образом, расчеты с SPBEM проводились для четырех различных сценариев: двух сценариев (АМВ-Е и АМВ-Н) изменения климата, а также двух сценариев (REF и BSAP) изменений биогенных нагрузок. Повсюду ниже эти сценарии кратко называют E-REF, E-BSAP, H-REF, H-BSAP.

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, используя “Балтийскую базу данных об окружающей среде” BED (Baltic Environmental Database) [2]. Поля остальных искомым переменных (скорость течений, уровень моря, характеристики льда, концентрации органических компонент экосистемы) были заданы нулевыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Современный период. По данным наблюдений [2], систематизированным в [11] для 16 океанографических станций, были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения в поверхностном (0–10 м) и придонном слоях для температуры, солености, нитратов + нитритов (в дальнейшем эта сумма называется нитратами), фосфатов, растворенного кислорода и хлорофилла “а” (хл “а”). С целью получения климатических значений характеристик осреднение проводилось по 30-летнему периоду 1971–2000 гг. для различных периодов годового цикла: зимнего (январь–февраль), летнего, или точнее, вегетационного (март–октябрь) и позднего летнего или раннего осеннего (август–сентябрь). Эти оценки сравнивались с результатами расчетов по модели SPBEM при двух различных сценариях (E-REF и H-REF). Степень соответствия данных наблюдений и результатов расчетов оценивалась по безразмерной функции качества (cost function) C , которая для любого периода рассчитывается по формуле [7]:

$$C = \left| \frac{M - D}{S_d} \right|, \quad (1)$$

где M – среднее значение характеристики, рассчитанное по модели, D и S_d – среднее значение и стандартное отклонение данных наблюдений. Значения функции C , представляющей собой нормализованное отклонение (в единицах S_d) между модельными результатами и данными наблюдений, интерпретируются следующим образом [7]: при $0 \leq C < 1$ согласие считается хорошим, при $1 \leq C < 2$ – удовлетворительным и при $2 \leq C$ – плохим.

Результаты сравнения представлены частично в табл. 2 и на рис. 1. Более полно они приводятся в отчете [7]. Судя по результатам сравнения, сред-

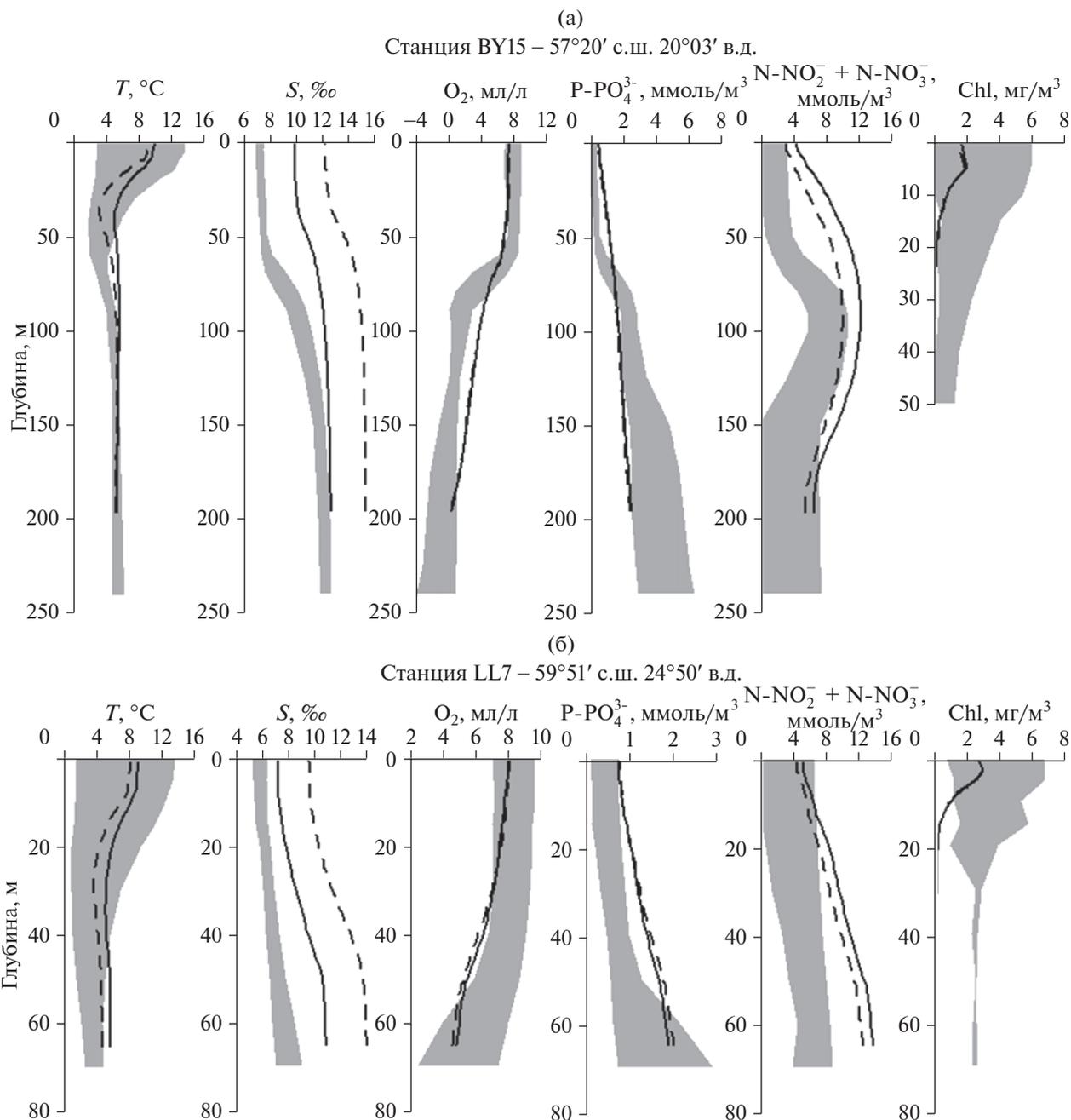


Рис. 1. Средние за 1971–2000 гг. вертикальные профили температуры T , солёности S , растворенного кислорода O_2 , фосфатов PO_4 , нитратов + нитритов ($NO_3 + NO_2$) и хл “а” (Chl) на станциях мониторинга BY15 (57°20′ с.ш.; 20°03′ в.д.) в Готландской впадине (а) и LL7 (59°51′ с.ш.; 24°50′ в.д.) у входа в Финский залив (б). Сплошные и пунктирные кривые – характеристики для сценариев E-REF и H-REF соответственно. Заштрихованная область – среднеквадратичное отклонение данных наблюдений от средних за 1971–2000 гг. значений.

няя годовая и средняя зимняя температура верхнего слоя моря воспроизводится в расчете E-REF несколько хуже, чем в расчете H-REF, хотя в летний период имеет место обратная картина: в расчете E-REF температура воспроизводится лучше. Соленость верхнего слоя моря в модели воспроизводится намного хуже, чем температура: в 69%

случаев (для 10 станций в расчете E-REF и 12 станций в расчете H-REF) согласие между модельными результатами и данными наблюдений оказалось плохим (табл. 2). В придонном слое средняя годовая температура воспроизводится хорошо ($C < 1$ в 18 случаях и $1 \leq C < 2$ в 11 случаях из 32), хотя и хуже, чем в верхнем слое моря ($C < 1$

Таблица 3. Средние по Балтийскому морю отклонения Δ будущих значений (средних по периоду 2071–2100 гг.) от современных значений (средних по периоду 1971–2000 гг.) температуры T ($^{\circ}\text{C}$), солености S (‰), нитратов (+нитритов) NO_3 (ммоль $\text{N}/\text{м}^3$), фосфатов PO_4 (ммоль $\text{P}/\text{м}^3$), растворенного кислорода O_2 (мл/л) и хл “а” (Chl) ($\text{мг}/\text{м}^3$) в верхнем и придонном слоях для четырех различных сценариев: E-REF, E-BSAP, H-REF, H-BSAP

Сценарий изменения климата и биогеохи- мической нагрузки	Верхний слой, 0–10 м								Придонный слой				
	ΔT , год	ΔT , зима	ΔT , лето	ΔS , год	ΔNO_3 , зима	ΔPO_4 , зима	ΔO_2 , лето	ΔChl , лето	ΔT , год	ΔS , год	ΔNO_3 , зима	ΔPO_4 , зима	ΔO_2 , осень
E-REF	2.2	2.7	2.1	-0.8	3.0	0.4	-0.5	0.9	1.0	-0.3	1.4	0.6	-1.2
E-BSAP	2.2	2.7	2.1	-0.8	0.8	0.1	-0.5	0.4	1.0	-0.3	0.5	0.2	-0.8
H-REF	2.8	2.9	2.7	-0.1	2.0	0.6	-0.8	1.2	1.2	0.1	0.5	0.9	-1.8
H-BSAP	2.8	2.9	2.7	-0.1	0.5	0.4	-0.7	0.7	1.2	0.1	-0.2	0.6	-1.3

во всех 32 случаях). Воспроизведение солености в придонном слое моря несколько улучшается по сравнению с поверхностным слоем ($C < 2$ в 16 случаях).

Отметим систематическое расхождение между двумя модельными расчетами: при сценарии H-REF соленость завышена (по сравнению с решением E-REF) на одну и ту же величину (2–3‰) на всех глубинах для каждой станции (см. в качестве примера рис. 1 для станций BY15 и LL7). Это завышение, а также и завышение рассчитанной солености верхнего слоя при сценарии E-REF по сравнению с данными наблюдений (табл. 2), объясняется несогласованностью внешних воздействий (потоков пресной и соленой воды), определяющих содержание соли в Балтийском море. Эти потоки – атмосферные осадки, речной сток и приток соленой воды через проливы из Северного моря, задаются по разным источникам (осадки – по результатам модельных расчетов, речной сток – по данным наблюдений, приток соленой воды через проливы – по изменению уровня, полученному из статистической модели, и климатическим данным о распределении солености в проливах) и обладают определенной погрешностью, не позволяющей точно воспроизвести солевой баланс моря в целом.

Переходя к обсуждению биогеохимических характеристик верхнего слоя, отметим, прежде всего, хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых летних концентраций растворенного кислорода, неплохое согласие рассчитанных и наблюдаемых зимних концентраций нитратов ($C < 1$ в 21 случае и $1 \leq C < 2$ в 8 случаях из 32) и фосфатов ($C < 1$ в 10 случаях и $1 \leq C < 2$ в 17 случаях), удовлетворительное согласие летних концентраций аммония ($1 \leq C < 2$ в 27 случаях) и хлорофилла ($C < 1$ в 9 случаях и $1 \leq C < 2$ в 18 случаях) (табл. 2). Значительных расхождений в качестве воспроизведения биогеохимических характеристик в верхнем слое между расчетами E-REF и H-REF не отмечается. В придонном слое следует отметить хорошее согласие рассчитанных и

наблюдаемых осенних концентраций растворенного кислорода ($C < 1$ в 21 случаях и $1 \leq C < 2$ в 10 случаях из 32), удовлетворительное согласие рассчитанных и наблюдаемых зимних концентраций фосфатов ($C < 1$ в 18 случаях и $1 \leq C < 2$ в 6 случаях) и худшее согласие зимних концентраций нитратов ($C < 1$ в 12 случаях, $1 \leq C < 2$ в 6 случаях и $2 \leq C$ в 14 случаях). Зимние концентрации нитратов в придонном слое воспроизводятся в расчете H-REF несколько лучше, чем в расчете E-REF. Разница между рассчитанными и наблюдаемыми значениями зимних концентраций фосфатов и осенних концентраций растворенного кислорода оказалась одинаковой в обоих расчетах.

Отметим также, что рассчитанные многолетние средние (1970–2005 гг.) и среднеквадратичное отклонение площади $S_{\text{гипокс}} \text{ гипоксических зон}$ в расчетах по обоим сценариям хорошо согласуются с оценками по данным BED [2] (табл. 1).

Конец 21 столетия. В ответ на заданный рост приземной температуры воздуха в 21 столетии температура воды в Балтийском море будет расти. Соответствующие изменения характеристик моря представлены в табл. 3 и на рис. 1. В конце столетия в поверхностном слое моря она (в среднем за год) повысится на 2.2° и 2.8°C в расчетах E-REF и H-REF соответственно, причем это повышение будет сильнее в зимний период, особенно для сценария E-REF, при котором рост температуры зимой будет на 0.6°C больше, чем летом (табл. 3). Средняя годовая температура в придонном слое повысится меньше (на 1.0°C и 1.2°C для E-REF и H-REF соответственно), так что температурная стратификация моря станет устойчивей (см. рис. 1). Этот эффект оказывается сильнее в сценарии H-REF.

Прогнозируемый рост речного стока будет способствовать повсеместному уменьшению солености. Средняя годовая соленость в поверхностном (0–10 м) слое моря понизится на 0.8 и 0.1‰ , а в придонном слое – понизится на 0.3‰ и повысится на 0.1‰ в расчетах E-REF и H-REF соответственно (табл. 3). Таким образом, страти-

фикация моря по солености станет немного сильнее в обоих случаях, причем этот эффект будет больше в сценарии E-REF (рис. 1).

В сценарии E-REF средняя летняя концентрация хл “а” в верхнем слое моря увеличилась на 0.9 мг/м^3 , тогда как концентрация растворенного кислорода уменьшилась на 0.5 мл/л в верхнем слое в летний период и на 1.2 мл/л в глубинном слое в осенний период для моря в целом (табл. 3). Рост фосфатов оказался в придонном слое моря больше (на 0.2 ммоль/м^3), чем в поверхностном. В расчете H-REF указанные изменения хлорофилла, кислорода и фосфатов оказались больше. В отличие от хлорофилла, растворенного кислорода и фосфатов, рост средней по Балтийскому морю концентрации нитратов NO_3 в поверхностном слое в случае E-REF оказался больше, чем в расчете H-REF. В глубинном слое, в котором, в отличие от поверхностного слоя, отмечался как рост, так и уменьшение концентрации нитратов на отдельных станциях, концентрация в среднем для Балтийского моря также растет больше в сценарии E-REF.

Изменения климата влияют на концентрацию кислорода больше, чем на другие параметры эвтрофикации, такие как концентрации хлорофилла и биогенных элементов. При потеплении климата в конце 21 столетия площади бескислородных (нулевые или отрицательные концентрации O_2 в модели) и гипоксических ($0 < \text{O}_2 < 2 \text{ мл/л}$) зон, сосредоточенных в основном в центральной части Балтийского моря, увеличиваются по сравнению с современным периодом (ср. фрагменты (а) и (б) на рис. 2). При этом в сценарии H-REF это увеличение оказалось заметно больше, чем в сценарии E-REF (рис. 3). Полученный результат согласуется с выводами работы [19], согласно которой под влиянием потепления климата происходит увеличение площади бескислородных и гипоксических зон в случае различных сценариев изменения климата и биогенной нагрузки.

Детальное объяснение этого эффекта (см. [31]) сводится к следующему. Прежде всего, повышение температуры моря вызывает: (1) снижение концентрации кислорода в водной толще из-за снижения растворимости кислорода в более теплой воде; (2) увеличение скорости потребления кислорода при минерализации органического вещества, что может приводить к большим сезонным вариациям в концентрации кислорода и увеличению площади бескислородных зон (см. [3, 13, 21]). Далее, увеличение площади бескислородных зон будет (3) способствовать увеличению скорости высвобождения фосфора из донных отложений, усилению кругооборота фосфора и уменьшению его постоянного удаления из экосистемы. Вместе с ускорением обращения фосфора в пелагиали это приведет (4) к увеличению пер-

вичной продукции, биомассы фитопланктона и концентрации хл “а”, что, в свою очередь, еще более интенсифицирует биохимическое потребление кислорода.

Что касается изменений концентрации нитратов в поверхностном слое моря, отметим, прежде всего, тот факт, что основной вклад в азотный баланс Балтийского моря вносят потоки, обусловленные фиксацией азота сине-зелеными водорослями и денитрификацией в условиях дефицита кислорода — как в донных отложениях, так и в водной толще (см., например, [1, 30, 31]). В соответствии с расчетами, оба этих потока сильно возрастают в будущем климате, причем это увеличение в расчете H-REF оказалось больше, чем в расчете E-REF. Это связано с большим ростом температуры моря в первом случае, вызвавшим увеличение продолжительности периода фиксации азота и увеличение дефицита кислорода в глубинном слое моря. В будущем климате концентрация нитратов в верхнем слое в зимний период увеличивается в обоих экспериментах из-за увеличения фиксации азота, причем в расчете E-REF это увеличение оказалось на 1.0 ммоль N/м^3 больше (см. табл. 3). Как известно [34, 28], увеличение площади гипоксии с низкими концентрациями кислорода приводит к уменьшению запаса нитратов вследствие усиления денитрификации, которая оказалась более эффективной в расчете H-REF и привела к меньшему возрастанию концентрации нитратов в глубинном слое (в среднем по морю на 0.5 ммоль N/м^3) по сравнению с возрастанием на 1.0 ммоль N/м^3 в сценарии E-REF.

Эффект изменения биогенных нагрузок. О влиянии изменения биогенных нагрузок на характеристики Балтийского моря в будущем климате позволяет судить табл. 3 и рис. 2 (ср. фрагменты (б) и (в)) и 3. В целом уменьшение нагрузок в экспериментах E-BSAP и H-BSAP в соответствии с ПДБМ приводит к улучшению ситуации в будущем климате: средние по морю концентрации хл “а”, фосфатов и нитратов возрастают заметно меньше (концентрация нитратов в глубинном слое в расчете H-BSAP даже уменьшается), а средняя по морю концентрация кислорода в глубинном слое увеличивается (табл. 3). В соответствии с этим уменьшаются площади бескислородных и гипоксических зон (рис. 2 и 3). Отметим практически одинаковую реакцию экосистемы Балтийского моря на изменение биогенных нагрузок в сценариях изменения климата E и H.

Разность оценок тех или иных характеристик, полученных в разных сценариях, может характеризовать неопределенность прогноза. Так, учитывая, что среднее по Балтийскому морю отклонение будущего от современных значений температуры верхнего слоя, ΔT_s , равно 2.2 и 2.8°C в расчетах E-REF и H-REF соответственно

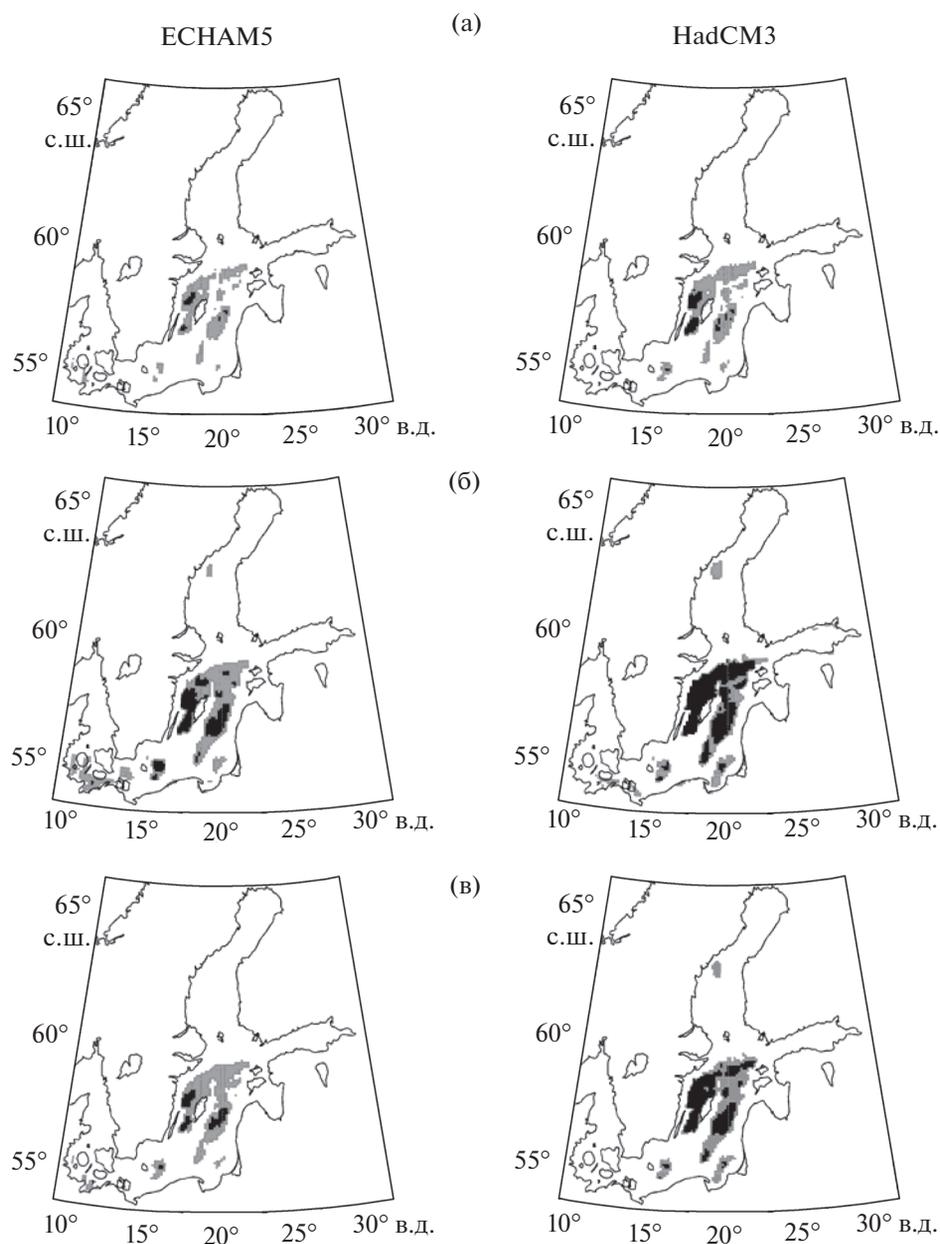


Рис. 2. Средние за август–сентябрь бескислородные ($O_2 \leq 0$ мл л⁻¹, заштрихованы черным) и гипоксические ($0 < O_2 < 2$ мл л⁻¹, заштрихованы серым) зоны в Балтийском море в современный период (средние за 1971–2000 гг.) (а) и в будущем (средние за 2071–2100 гг.) в опорных сценариях изменения климата E-REF и H-REF (б) и сценариях изменения биогенной нагрузки по ПДБМ E-BSAP и H-BSAP (в) для AMB-E (слева) и AMB-H (справа).

(см. табл. 3), неопределенность прогноза ΔT_s составит $\pm 0.6^\circ\text{C}$. Аналогичные оценки могут быть даны и для других характеристик, приведенных в табл. 3. Что касается площади гипоксических зон $S_{\text{гипо}}$ в будущем (среднее за 2070–2100 гг.), то ее значения составят 94×10^3 и 109×10^3 км² в случае сохранения биогенных нагрузок на современном уровне (расчеты E-REF и H-REF) и 64×10^3 и 78×10^3 км² в случае уменьшения биогенных нагрузок в соответствии с ПДБМ (расчеты E-BSAP и H-BSAP). Эти оценки $S_{\text{гипо}}$ попадают в диапазон

неопределенностей ансамблевых оценок, приведенный выше (см. Введение).

ВЫВОДЫ

Таким образом, согласно полученным оценкам, в будущем климате качество воды, характеризующееся рассмотренными экологическими индикаторами, будет ухудшаться по сравнению с современными условиями. Это ухудшение оказалось сильнее в случае сценария изменения

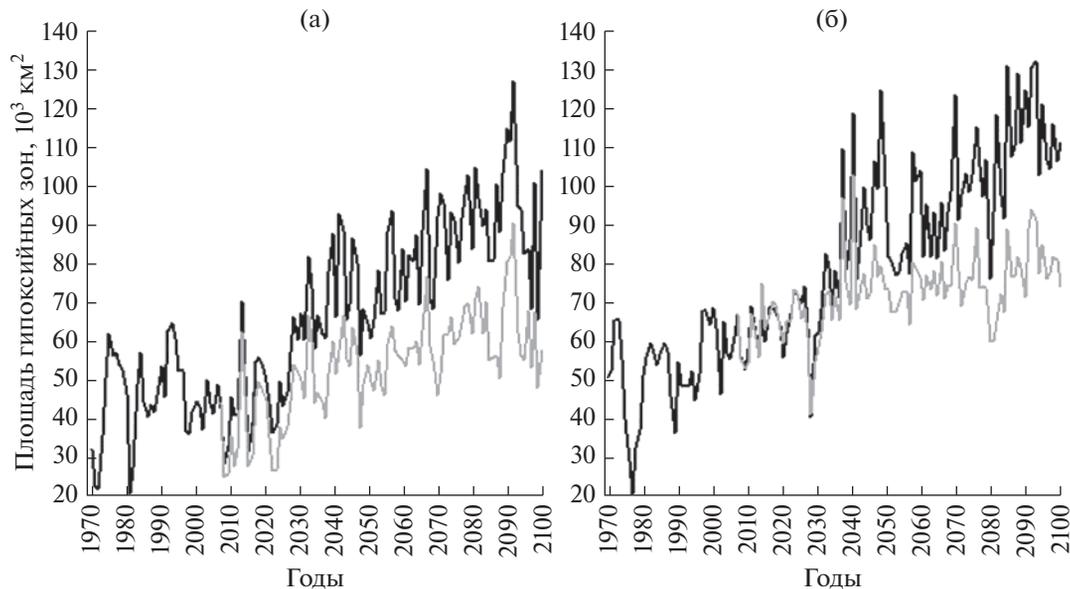


Рис. 3. Временная эволюция максимальных в течение годового цикла площадей (10^3 км^2) гипоксических зон в Балтийском море в 1970–2100 гг. в расчетах с АМВ-Е (а) и АМВ-Н (б). Черные и серые кривые – опорные сценарии изменения климата E-REF и H-REF и сценарии изменения биогенной нагрузки по ПДБМ E-BSAP и H-BSAP соответственно.

климата с более сильным ростом приземной температуры воздуха. При всех рассмотренных сценариях изменения климата, его потепление приводит к увеличению площади бескислородных и гипоксических зон. Уменьшение биогенной нагрузки, предполагаемое в ПДБМ, сможет лишь частично компенсировать указанные негативные последствия потепления климата. Несмотря на количественные неопределенности, качественные тенденции согласуются с ранними оценками [19–21] и сомнению не подлежат.

Авторы благодарят рецензента за конструктивные замечания.

А.В. Исаев и Т.Р. Еремина были поддержаны Министерством образования и науки РФ как исполнители государственной работы в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания № 2014/166. В.А. Рябченко был поддержан РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савчук О.П., Вулф Ф.В. Круговорот азота и фосфора в открытой Балтике // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. Вып. 5. Ч. 1. Математические модели. С. 65–103.
2. BED – Baltic Environmental Database at Baltic Nest Institute. <http://nest.su.se/bed>.
3. Bendtsen J., Hansen J.L.S. Effects of global warming on hypoxia in the North Sea–Baltic Sea transition zone // Ecol. Modell. 2013. № 264. P. 17–26.
4. Döscher R., Willén U., Jones C. et al. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCO // Boreal Environ Res. 2002. V. 7. P. 183–192.
5. 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. Syst. 2009. V. 75. P. 163–184.
6. Eilola K., Gustafsson B.G., Kuznetsov I. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea // J. Mar. Syst. 2011. V. 88. P. 267–284.
7. Eilola K., Hansen J., Meier H.E.M. et al. 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, № 110, 2011, 66 p.
8. Gordon C., Cooper C., Senior C.A. et al. The simulation of SST, sea ice extent and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // Climate Dynamics 2000. V. 16. P. 147–166.
9. Gustafsson B.G. A time-dependent coupled-basin model for the Baltic Sea // Earth Sciences Centre, Göteborg University, Göteborg. 2003. Report C47, 61 p.
10. 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. V. 106. № 19. P. 731–744.
11. Gustafsson B.G., Rodriguez Medina M. Validation data set compiled from Baltic Environmental Database (Version 2, January 2011) // Baltic Nest Institute Technical Report 2011. № 2, ISBN: 978-86655-3.
12. Gustafsson B.G., Savchuk O.P., Meier H.E.M. Load scenarios for ECOSUPPORT // Baltic Nest Institute Technical Report 2011. № 4.18 p. ISBN: 978-91-86655-03-7.

13. *Hansen J.L.S., Bendtsen J.* Parameterisation of oxygen dynamics in the bottom water of the Baltic Sea—North Sea transition zone // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2013. V. 481. P. 25–39.
14. HELCOM, 2007. Toward a Baltic Sea unaffected by eutrophication. Background document to Helcom Ministerial Meeting, Krakow, Poland, Tech. Rep., Helsinki Commission, Helsinki, Finland.
15. HELCOM, 2014. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011 – A concise thematic assessment. Baltic Sea Environment Proceedings, № 143. 40 p.
16. *Jungclaus, J.H., Botzet M., Haak H. et al.* Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5/ MPI-OM // *J. of Climate* 2006. V. 19. P. 3952–3972.
17. *Meier H.E.M., Döscher R., Faxén T.* A multiprocessor coupled ice-ocean model for the Baltic Sea: Application to salt inflow // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C8, 3273, doi: 10.1029/2000JC000521
18. *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. V. 48. P. 31–55.
19. *Meier H.E.M., Andersson H.C., Eilola K. et al.* Hypoxia in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea // *J. Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38, L24608, doi: 10.1029/2011GL049929
20. *Meier H.E.M., Hordoir R., Andersson H.C. et al.* 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. V. 39. P. 2421–2441, DOI 10.1007/s00382-012-1339-7
21. *Meier H.E.M., Müller-Karulis B., Andersson H.C. et al.* Impact of climate change on ecological quality indicators and biogeochemical fluxes in the Baltic Sea: a multi-model ensemble study // *Ambio*. 2012. V. 41. P. 558–573. DOI 10.1007/s13280-012-0320-3
22. *Neelov I.A., Eremina T.R., Isaev A.V. et al.* A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model // *Proceedings Estonian Academy of Science. Biology. Ecology*. 2003. V. 52. P. 347–359.
23. *Neumann T.* Climate-change effects on the Baltic Sea ecosystem: a model study // *J. Mar. Syst.* 2010. V. 81. P. 213–224.
24. *Neumann T., Fennel W., Kremp C.* Experimental simulations with an ecosystem model of the Baltic Sea: a nutrient load reduction experiment // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. P. 1033.
25. *Neumann T., Schernewski G.* Eutrophication in the Baltic Sea and shifts in nitrogen fixation analyzed with a 3D ecosystem model // *J. Mar. Syst.* 2008. V. 74. P. 592–602.
26. *Roeckner E., Brokopf R., Esch M. et al.* Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model // *J. of Climate*. 2006. V. 19. P. 3771–3791.
27. *Savchuk O.P.* Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 32. P. 235–280.
28. *Savchuk O.P.* Large-scale dynamics of hypoxia in the Baltic Sea // In: *Yakushev E.V. (Ed.), Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modelling*. Springer, Berlin. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/698-2010-53> (24 p.).
29. *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. V. 629. P. 225–237.
30. *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.
31. *Skogen M.D., Eilola K., Hansen J.L.S. et al.* Eutrophication Status of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea in present and future climates: A model study // *J. Mar. Syst.* 2014. V. 132. P. 174–184.
32. *Solomon S., Qin D., Manning M. et al.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment // *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
33. *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. V. 58. P. 173–200.
34. *Vahtera E., Conley D., Gustafsson B.G. et al.* Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea // *Ambio*. 2007. V. 36. P. 186–194.

Model Estimates of the Eutrophication of the Baltic Sea in Modern and Future Climate

V. A. Ryabchenko, L. N. Karlin, A. V. Isaev, R. E. Vankevich, T. R. Eremina,
M. S. Molchanov, O. P. Savchuk

St. Petersburg Baltic eutrophication model (SPBEM) is used to assess the ecological condition of the sea at possible changes in climate and nutrient loads in the 21st century. According to the model estimates, the future climate will worsen the water quality compared to modern conditions. This deterioration was stronger in the case of climate warming scenario with a stronger change in the near-surface air temperature. When the scenarios of climate change, climate warming will lead to an increase in the area of anoxic and hypoxic zones. Reducing nutrient loading, estimated in accordance with the Baltic Sea Action Plan, will only be able to partially compensate for the negative effects of global warming.