

УДК 551.464.7.072

© Т. Р. Еремина*, О. В. Хаймина, О. М. Владимирова, 2024

Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Санкт-Петербург,
Воронежская ул., д. 79

*tanya.er@gmail.com

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Статья поступила в редакцию 01.02.2024, после доработки 05.06.2024, принята в печать 10.06.2024

Аннотация

Выполнены расчеты по воспроизведению основных компонентов экосистем Балтийского моря на основе стационарной, боксовой модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и социально-экономических условий. При различных сценариях потепления снижение биогенной нагрузки приведет к сокращению площади гипоксических зон в Балтийском море, при этом самое значительное уменьшение площади обусловлено сценарием сокращения сельскохозяйственного сектора и численности населения. Снизится содержание запасов фосфора в бентосном слое, увеличится концентрация неорганического азота, уменьшится азот-фиксация. Наиболее заметное снижение первичной продукции и повышение прозрачности воды связано с умеренным сценарием изменения климата и при значительном снижении биогенной нагрузки. Полученные результаты показали, что при определенных комбинациях сценариев можно ожидать улучшения экологического состояния моря даже при самом неблагоприятном климатическом сценарии.

Ключевые слова: сценарии, изменение климата, биогенная нагрузка, экосистема, моделирование, эвтрофирование, Балтийское море

UDC 551.464.7.072

© T. R. Eremina*, O. V. Khaimina, O. M. Vladimirova, 2024

Russian State Hydrometeorological University, 192007, St. Petersburg, Voronezhskaya Str., 79

*tanya.er@gmail.com

THE EFFECT OF CLIMATE AND SOCIO-ECONOMIC CHANGES ON THE STATE OF THE BALTIC SEA ECOSYSTEMS

Received 01.02.2024, Revised 05.06.2024, Accepted 10.06.2024

Abstract

In this study, calculations are performed to reproduce the main components of the Baltic Sea ecosystems based on the stationary, boxed SANBALTS model under various scenarios of climate change in combination with two scenarios of the development of socio-economic conditions. Under various warming scenarios, a decrease in the nutrient load will lead to a reduction in the area of hypoxic zones in the Baltic Sea, while the most significant decrease in the area is due to the scenario of a reduction in the agricultural sector and population. The phosphorus in the benthic layer will decrease, the concentration of inorganic nitrogen will increase, and nitrogen fixation will decrease. The most noticeable decrease in primary production and an increase in water transparency is associated with a moderate climate change scenario and with a significant decrease in the nutrient load. The results showed that under certain combinations of scenarios, an improvement in the ecological state of the sea can be expected even under the most unfavorable climatic scenario.

Keywords: scenarios, climate change, nutrients load, ecosystem, modeling, eutrophication, Baltic Sea

Ссылка для цитирования: Еремина Т.Р., Хаймина О.В., Владимирова О.М. Влияние климатических и социально-экономических изменений на состояние экосистем Балтийского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 25–34. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-3

For citation: Eremina T.R., Khaimina O.V., Vladimirova O.M. The Effect of Climate and Socio-Economic Changes on the State of the Baltic Sea Ecosystems. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 2, 25–34. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-3

1. Введение

Многочисленные исследования по изменению климата в Балтийском бассейне, обобщенные в [1], подтверждают, что современное состояние экосистем Балтийского моря формируется в условиях заметных климатических изменений — тенденция потепления сохраняется в современном периоде и, вполне вероятно, будет продолжаться в течение всего двадцать первого века. Увеличение температуры поверхности для Балтийского моря выражено сильнее, чем для районов Северного моря, Иберийской части Атлантики и Норвежского моря. Изменение климата усиливает давление на экосистему моря, испытывающую широкий спектр антропогенных воздействий, таких как загрязнение, эвтрофикация, перелов рыбы и утрата среды обитания [2].

Разработанные сценарии изменения климата для региона Балтийского моря, на основе которых строятся модельные расчеты, также прогнозируют увеличение температуры и количества осадков с последующим повышением температуры поверхностного слоя моря, сокращение длительности ледостава, увеличение речного стока и уменьшение солёности воды [3]. Согласно модельным оценкам влияние изменений климата на морские экосистемы и эвтрофикацию Балтийского моря [4] в будущем климате (до 2100 г.) обусловит ухудшение кислородных условий в глубинных слоях моря по сравнению с современными условиями, а предлагаемое уменьшение биогенных нагрузок в соответствии с Планом Действий по Балтийскому морю (ПДБМ) [5] приведет только к незначительному улучшению качества воды. Более детальные модельные оценки будущих изменений морских экосистем Балтийского моря в 21 столетии были получены на основе ансамблевого подхода [6]. Результаты сценарных расчетов показали, что влияние изменения климата на биогеохимический круговорот будет значительным, но все же меньшим, чем влияние вероятных изменений в поступлении биогенных нагрузок. Реализация Плана действий по Балтийскому морю по сокращению поступления биогенных веществ для всего водосборного бассейна, приведет к значительному улучшению экологического состояния Балтийского моря, включая сокращение размеров зоны гипоксии также в будущем климате, что, в свою очередь, повысит устойчивость Балтийского моря к ожидаемым воздействиям изменения климата [6].

Наряду с климатом, значительное влияние на состояние экосистем Балтийского моря могут оказывать изменяющиеся социально-экономические условия в регионе [7–9]. Изменения в поступлении биогенных веществ со стоком рек в Балтийское море определяются не только климатом, численностью населения, особенностями почвы и землепользования, но и технологиями, применяемыми в различных секторах экономики, особенно в сельском хозяйстве и очистке сточных вод. Как природные, так и антропогенные условия влияют на такие процессы, как эрозия, осаждение, выщелачивание, удержание и трансформация биогенных веществ на поверхности земли, в недрах почвы или в водах. Так, например, в [7] на основе сценарных расчетов была получена оценка изменения в поступлении биогенных веществ со стоком рек в Балтийское море, которые можно ожидать в 2050-х гг. в связи с изменением климата и вероятными изменениями социально-экономических условий. Согласно полученным прогнозам, воздействие изменения климата к середине столетия оказалось меньшим, чем непосредственное влияние меняющихся социально-экономических факторов, таких как землепользование, сельскохозяйственная практика, атмосферные выпадения и сбросы сточных вод.

Целью работы является оценка изменчивости компонентов морских экосистем Балтийского моря при задании воздействий на систему в соответствии с разработанными сценариями изменения климата и социально-экономическими путями развития (SSP) на основе численного моделирования.

2. Материалы и методы

Для оценки изменчивости компонентов морской экосистемы в условиях изменения климата и под воздействием социально-экономических факторов использовалась модель экосистемы Балтийского моря SANBALTS (Simpleas Necessary Baltic Sea), входящая в состав системы принятия решений NEST [10]. SANBALTS физико-биогеохимическая модель, которая описывает влияние изменения биогенной нагрузки на состояние окружающей среды. Балтийское море в модели представлено семью крупными морскими бассейнами, включающими в себя: Ботнический залив, Ботническое море, Финский залив, Рижский залив, Центральную Балтику, Датские проливы и Каттегат.

Модель реализуется в стационарном режиме и позволяет оценить трофическое состояние экосистем моря, которое будет достигнуто при изменении биогенной нагрузки. Процессы поступления, транспорта и трансформации вещества рассчитываются для восьми боксов на основе обычных дифференциальных уравнений. В зависимости от целей и задач исследований граничные условия могут быть заданы либо

в виде временных рядов, либо в виде констант. В первом случае решение системы уравнений показывает, как концентрации и процессы изменяются во времени. В последнем случае система уравнений численно интегрируется до тех пор, пока решение не достигнет устойчивого состояния, соответствующего заданной комбинации неизменных внешних воздействий. Рассчитанные для каждого бокса концентрации биогенных веществ и кислорода, а также транспортные потоки и основные биогеохимические потоки могут быть проанализированы различными способами, включая построение подробных балансов биогенных веществ. Модель включает в себя девять переменных состояния, которые представляют собой среднегодовые значения их естественных прототипов: растворенного неорганического азота и фосфора; содержания азота и фосфора во всех лабильных органических фракциях — мертвых и живых, растворенных и твердых частицах; азота и фосфора в стойких фракциях растворенного органического вещества. Азот и фосфор в донных отложениях содержат только биодоступные фракции. В центральной Балтике моделируется средняя концентрация кислорода как регулирующий элемент циклов биогенных веществ в условиях изменения окислительно-восстановительных свойств морской среды [10].

Для проведения расчетов использовались сценарии изменения биогенных нагрузок при различном развитии климатических изменений, полученные в [9] для оценки вероятных воздействий изменения климата на неточечные источники биогенных веществ, а именно, 2 климатических сценария RCP4.5 и RCP8.5, для задания антропогенных воздействий — набор региональных социально-экономических сценариев SSP, разработанных на основе глобальных сценариев [11].

В климатическом сценарии RCP 4.5 повышение температуры составляет не более 3 °C при потоке радиации 4,5 Вт/м² к концу столетия. Сценарий RCP 8.5 является «жестким», в котором при сохранении современных климатических тенденций концентрация CO₂ достигнет 1,370 ppm и поток радиации составит 8,5 Вт/м² к концу 100-летнего периода, что приведет к потеплению на 5 °C [12]. Эти сценарии были применены для водосборного бассейна Балтийского моря с использованием региональных климатических моделей RCA4, WRF и REMO для европейского региона и некоторых частей Северо-Восточной Атлантики [13], а также результаты расчета воздействия изменения климата на биогенную нагрузку на водосборе Балтийского моря в следствии изменений пространственно-временного распределения осадков, полученные на гидрологической модели E-HYPE [15].

Для оценки влияния изменений социально-экономических факторов в [9] использовались сценарии, которые так или иначе связаны с изменением климата [14]. Наиболее важными факторами загрязнения от неточечных источников являются изменения в количестве осадков, землепользовании и технологические изменения в сельском хозяйстве. Развитие технологий очистки сточных вод и пространственное распределение населения относятся к основным факторам загрязнения от точечных источников. На атмосферное выпадение азота влияет количество применяемых в регионе технологий в животноводстве и обработке навоза, а также глобальные технологические изменения в процессах сжигания ископаемого топлива и биотоплива в секторах транспорта, производства электроэнергии и отопления [9].

Другие исходные данные для модели и управляющие данные, такие как землепользование и распределение сельскохозяйственных культур, нормы внесения удобрений, выбросы из точечных источников и атмосферные осадки, оставались неизменными, что соответствует их текущим значениям. Нагрузки биогенных веществ из неточечных источников в Балтийское море были агрегированы по водосборным бассейнам в годовом масштабе за период 2010–2098 гг. Предполагалось, что изменчивость климата в 2080–2098 гг. оставалась неизменной в течение двух последних лет моделирования. (2099–2100 гг.). Сравнение выполнялось с базовым расчетом для 2010 г.

Используя комбинации климатических и социально-экономических сценариев, в [9] были рассчитаны пропорции внешних нагрузок по азоту и фосфору к 2100 году от текущих нагрузок для Балтийского моря в целом и каждого суббассейна в отдельности (рис. 1). Совокупная нагрузка биогенными веществами из всех источников и для сценариев, прогнозируемых на 2100 год, включая как климатические воздействия, так и прямое воздействие социально-экономических факторов, колеблется от 52 % до 115 % от первоначальной нагрузки. Исходная современная биогенная нагрузка, включающая в себя поступления азота и фосфора с речным стоком, атмосферными выпадениями и из точечных источников, была взята в соответствии с данными источников 2010 г. (табл. 1) [16].

На рис. 1 приведены относительные изменения прогнозируемой нагрузки биогенных веществ в течение 21 века для семи суббассейнов Балтийского моря. Для сценариев с уменьшенной общей биогенной нагрузкой (SSP1, SSP2 и SSP3) относительные сокращения являются самыми высокими для тех суббассейнов, которые в настоящее время больше всего страдают от эвтрофикации. К ним относятся Центральная Балтика, Финский залив, Рижский залив и Датский пролив, в которые поступает сток из густонаселенных водосборных территорий.

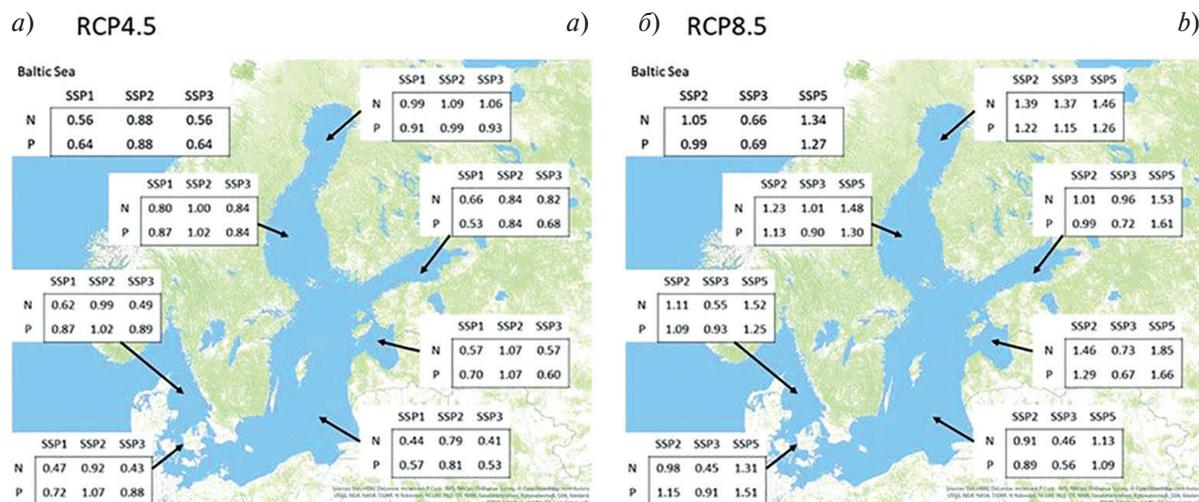


Рис. 1. Отношение внешних нагрузок по азоту и фосфору к 2100 году в Балтийском море к современным нагрузкам для сценариев RCP 4.5 (а) and RCP 8.5 (б) [9]

Fig. 1. External loading of N and P to the Baltic Sea by 2100 as proportion of current loading for RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b) [9]

Таблица 1

Table 1

Опорный сценарий биогенной нагрузки по азоту и фосфору (т/год) за период 2003–2007 гг.

Reference scenario of nutrient load for nitrogen and phosphorus (t/year) for period 2003–2007

Суббассейн	Лабильный органический азот	Устойчивый органический азот	Неорганический азот	Лабильный органический фосфор	Устойчивый органический азот	Неорганический фосфор
Ботнический залив	8544,5	28137,7	24905,5	1193,2	168,6	1471,6
Ботническое море	10950,5	20205,7	45607,9	1050,7	116,1	1976,6
Центральная Балтика	53990,5	71521,1	272611,5	7181,0	797,8	8513,7
Финский залив	13559,0	33224,1	62427,9	2642,2	293,6	3368,1
Рижский залив	11080,0	17216,3	55225,0	1302	144,7	1471,1
Датские проливы	7783,7	4765,9	53769,9	572,4	62,7	937,9
Каттегат	10214,7	10240,6	56139,2	632,4	70,1	942,3

Это обусловлено тем, что потенциал усовершенствования технологий по снижению нагрузки биогенными веществами от точечных источников наиболее высок на водосборах стран Балтии, России и Польши, где сток биогенов происходит непосредственно в Балтийское море, Финский и Рижский заливы [9].

Для оценки изменчивости компонент морской экосистемы в условиях изменения климата и при антропогенном воздействии с использованием модели SANBALTS были выбраны сценарии RCP 4.5 и RCP 8.5 и социально-экономические сценарии SSP2 и SSP3 [9]. Оба сценария предусматривают некоторое снижение биогенной нагрузки, однако в сценарии SSP2 социальные, экономические и технологические тенденции сохраняют сложившиеся в мире закономерности. Страны стремятся к достижению устойчивого развития, однако происходит это крайне медленно. Экологические системы подвергаются деградации, хотя имеются некоторые улучшения, в целом, интенсивность использования ресурсов и энергии снижается. Глобальный рост населения является умеренным и стабилизируется во второй половине века. Неравенство доходов сохраняется или улучшается очень медленно, и сохраняются проблемы, связанные с уменьшением уязвимости к социальным и экологическим изменениям. В сценарий SSP3 экономическое развитие идет медленно, потребление является материалоемким, а неравенство доходов сохраняется или усугубляется с течением времени. Снижается прирост населения в промышленно развитых странах, сокращается сельскохозяйственный сектор в Балтийском регионе.

3. Результаты моделирования

В результате расчетов на модели было получено 5 стационарных режимов, характеризующих трофическое состояние, которое будет достигаться при изменении в поступлении биогенных веществ при заданных сценариях развития климата и социально-экономических факторах. Исходным расчетом является расчет, основанный на биогенной нагрузке в 2003–2007 гг.

Изменение климата влияет на кислородные условия в глубинных слоях моря. В [4] показано, что при потеплении климата гипоксические зоны, сосредоточенные в основном в центральной части Балтийского моря, увеличиваются. При совместном учете изменения климата и социально-экономических факторов SSP2 и SSP3 площадь гипоксии уменьшается по сравнению с состоянием на 2003–2007 гг. (табл. 2).

Наиболее значительно — на 40–50 % площадь гипоксии уменьшается при применении SSP3 сценария, при котором снижается рост численности населения непосредственно в странах Балтийского региона, что приводит к снижению биогенной нагрузки на Балтийское море в целом. Также увеличивается глубина, на которой наблюдаются гипоксические условия.

Изменения концентрации неорганического азота наиболее значительны для Ботнического и Рижского заливов, где при существенном потеплении климата, в обоих случаях SSP концентрация увеличивается на 3,5–4 мкмоль/л (рис. 2). Это, вероятно, связано с тем, что согласно SSP2 характер продуктовых предпочтений в питании, а также размер сельскохозяйственного сектора остаются примерно прежними за весь период расчета, а нагрузка от точечных источников несколько увеличивается из-за роста количества осадков. Кроме того, известно [17], что Ботнический и Рижский заливы лимитируются фосфором, в отличие от остальных районов Балтийского моря, в которых рост фитопланктона регулируется азотом, в связи с чем,

Таблица 2

Table 2

Площадь гипоксии для исходной биогенной нагрузки (2003–2007 гг.) и для 4 сценариев изменения климата и биогенной нагрузки

Hypoxia area for the initial nutrient load (2003–2007) and for 4 scenarios of climate change and nutrient load

Площадь гипоксии	Площадь, км ²	Разница площади по сравнению с 2003–2007 гг., %	Глубина, м
2003–2007 гг.	34475	–	98
RCP4.5SSP2	28971	–16	104
RCP 4.5 SSP3	18104	–47	118
RCP 8.5SSP2	33811	–2	99
RCP 8.5SSP3	20457	–41	115

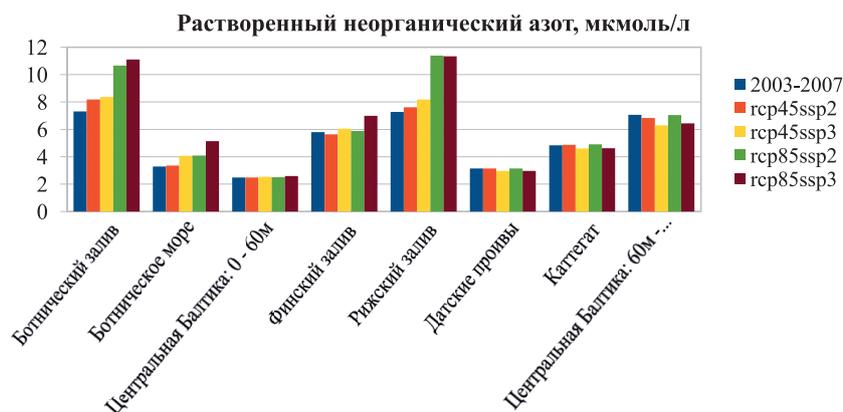


Рис. 2. Концентрация растворенного неорганического азота, рассчитанная на модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Fig. 2. Concentration of dissolved inorganic nitrogen calculated using SANBALTS model under various scenarios of climate change and nutrient load

увеличение нагрузки по азоту приводит к росту его концентрации в заливах. В соответствии со сценарием SSP3, в южных водосборных бассейнах Балтийского моря, где преобладает сельскохозяйственное землепользование, из-за сокращения международной торговли сельскохозяйственной продукцией и численности населения в регионе сельскохозяйственный сектор сокращается, что приводит к незначительному снижению содержания неорганического азота в Датских проливах и Каттегате.

Снижение нагрузок по фосфору приводит к снижению содержания растворенного неорганического фосфора в Финском и Рижском заливах, а также в центральной Балтике, которое хорошо выражено для социально-экономического сценария SSP3 и для обоих сценариев изменения климата во всех районах Балтийского моря (рис. 3). Причиной снижения является скорее всего уменьшение численности населения, сокращение площади гипоксических зон и как следствие, снижение количества фосфатов, поступающих в придонные слои из донных отложений в анаэробных условиях и сокращение бюджета фосфора в водной толще. Для сценария SSP2 концентрация неорганического фосфора в Ботническом заливе не изменяется, в остальных суббассейнах снижается незначительно. Содержание общего фосфора (рис. 4) также уменьшается в большинстве исследуемых районов при всех рассматриваемых сочетаниях сценариев, за исключением сценария RCP85- SSP2 в Рижском заливе, где согласно SSP2 сельскохозяйственный сектор не изменяется за весь период расчета и возрастает нагрузка из точечных источников. В Ботническом заливе и Ботническом море изменений по содержанию фосфора практически не происходит.

Для всех вариантов сценариев заметное снижение азот-фиксации прогнозируется в Ботническом море и Рижском заливе, а также во всех районах Балтийского моря (табл. 3), что согласуется с прогнозируемым увеличением концентрации минерального азота. В Финском заливе также наблюдается уменьшение азот-фиксации, для сценария SSP2 уменьшение составляет 2000 т/год, тогда как при сценарии SSP3 азот-фиксация исчезает.

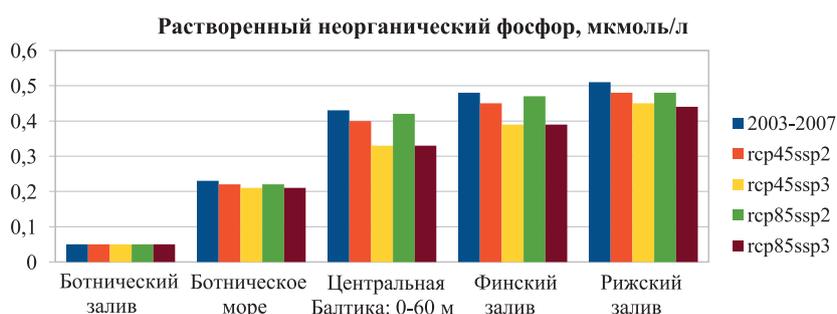


Рис. 3. Концентрация растворенного неорганического фосфора, рассчитанная на модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Fig. 3. Concentration of dissolved inorganic phosphorus calculated using SANBALTS model under various scenarios of climate change and nutrient load

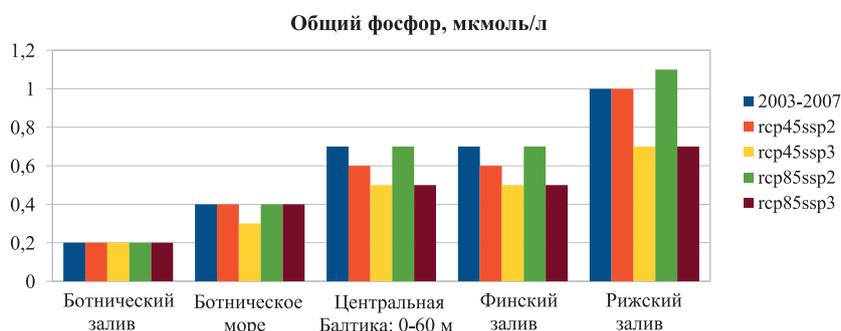


Рис. 4. Концентрация общего фосфора, рассчитанная на модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Fig. 4. Concentration of dissolved total phosphorus calculated using SANBALTS model under various scenarios of climate change and nutrient load

Изменение потоков азот-фиксации, рассчитанных на модели SANBALTS
 при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Changes in nitrogen fixation fluxes calculated using SANBALTS model under various scenarios
 of climate change and nutrient load

Азот-фиксация, 10 ³ т/год	2003–2007	rcp45ssp2	rcp45ssp3	rcp85ssp2	rcp85ssp3
Ботнический залив	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ботническое море	8,23	0,69	0,00	0,00	0,00
Центральная Балтика: 0–60 m	297,00	257,60	182,43	276,79	175,47
Рижский залив	11,86	9,34	0,04	9,71	0,00
Финский залив	1,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Датские проливы	5,08	4,42	4,48	4,76	4,34
Каттегат	3,40	2,87	4,14	2,84	3,93

Для всех районов Балтийского моря наблюдается снижение первичной продукции для климатического сценария RCP4.5 в сочетании со сценариями SSP2 и SSP3 (рис. 5). Значительное потепление климата при нагрузках SSP2 обуславливает увеличение первичной продукции во всех семи суббасейнах, однако наиболее существенно увеличивается первичная продукция только в Рижском заливе. Поскольку первичная продукция в Рижском заливе лимитируется фосфором, высокое содержание фосфора которого сохраняется для сценария SSP2 при климатических изменениях RCP4.5 и RCP85, то этим объясняется увеличение первичной продукции в Рижском заливе. В Ботническом заливе, несмотря на увеличение содержания неорганического азота, роста первичной продукции не происходит, поскольку содержание фосфора практически не меняется. При сценарии SSP3 первичная продукция снижается по Балтийскому морю в целом, поскольку для данного сценария содержание азота практически не меняется при существенном сокращении азот-фиксации, что приводит к снижению биомассы сине-зеленых водорослей, которые в период цветения являются доминирующими видами в структуре фитопланктона.

Полученный результат хорошо согласуется с изменением прозрачности воды. С уменьшением первичной продукции в условиях умеренного изменения климата (RCP4.5+SSP3) происходит заметное увеличение прозрачности во всех районах Балтийского моря (рис. 6).

Низкие значения прозрачности сохраняются лишь в Рижском заливе при «жестком» климатическом сценарии в сочетании со сценарием SSP2, а заметное увеличение прозрачности становится возможным лишь при сценарии RCP4.5+SSP3.

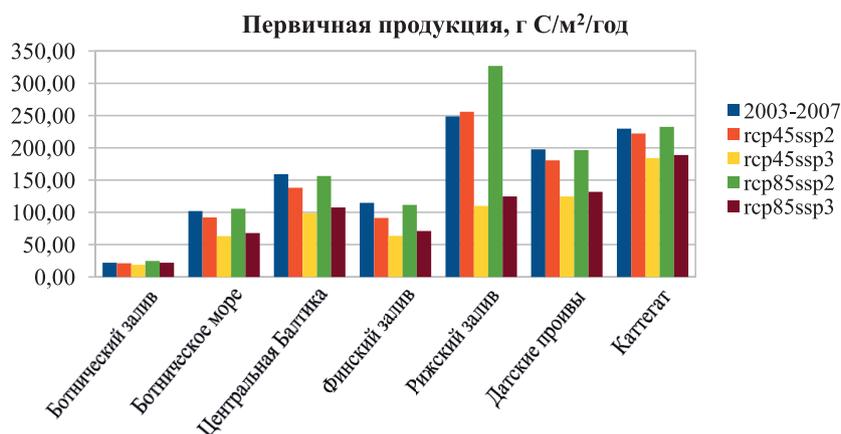


Рис. 5. Первичная продукция, рассчитанная на модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Fig. 5. Primary production calculated on SANBALTS model under various scenarios of climate change and nutrient load

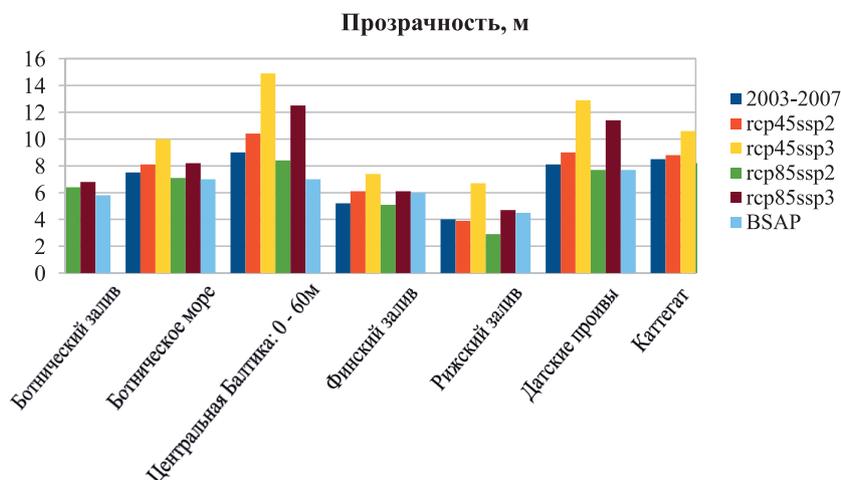


Рис. 6. Прозрачность воды, рассчитанная на модели SANBALTS при различных сценариях изменения климата и биогенной нагрузки

Fig. 6. Water transparency calculated using SANBALTS model under various scenarios of climate change and nutrient load

4. Заключение

Проведенные модельные эксперименты с использованием прогнозов изменения в поступлении биогенных нагрузок при различных климатических сценариях в сочетании со сценариями социально-экономических изменений подтверждают вывод о том, что последние могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на нагрузку, а общая тенденция может быть как возрастающей, так и уменьшающейся [9]. Сокращение сельскохозяйственного сектора и численности населения в сценарии SSP3 способствует сокращению площади, занятой гипоксическими зонами, что снижает внутреннюю нагрузку по неорганическому фосфору. Наряду с этим, изменение климата скорее всего играет большую роль в поступлении минеральных форм азота в северной и центральной частях Балтики. Согласно прогнозам [9], при рассмотрении исключительно влияния изменения климата на поступление биогенных веществ с водосборной площади нагрузка увеличивается на 28–36 % для сценария со значительным потеплением (RCP8.5) и на 7–20 % для умеренного изменения климата (RCP4.5) к концу текущего столетия. Умеренное потепление климата приведет к снижению первичной продукции при любых социально-экономических условиях, поскольку оба сценария предполагают снижение биогенной нагрузки на Балтийское море (по разным причинам и с различной эффективностью). Однако при значительном потеплении климата снижение первичной продукции будет обусловлено социально-экономическим сценарием, предусматривающим сокращение сельскохозяйственного сектора и численности населения в Балтийском регионе, за исключением Рижского залива. Таким образом, при сохранении тенденции потепления при различных социально-экономических условиях можно ожидать снижения уровня эвтрофикации на большей части Балтийского моря.

Благодарности

Идея проведения сценарных расчетов для исследования совместного влияния климатических изменений и социально-экономических условий на состояние экосистем Балтийского моря принадлежит Олегу Павловичу Савчуку. Авторы выражают глубокую благодарность Олегу Павловичу за те ценные советы и рекомендации, которые им были даны при обсуждении результатов моделирования. Подготовленная статья написана в память о выдающемся ученом, посвятившем всю свою жизнь развитию моделей экосистем Балтийского моря и внесшим весомый вклад в развитие этого направления исследований в научном сообществе Санкт-Петербурга.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания FSZU-2023-0002.

Funding

The work was performed under the State assignment FSZU-2023-0002.

Литература

1. Костяной А.Г., Ерёмкина Т.Р., Иванов В.В. и др. Морские природные системы / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Научно-технологические, 2022. С. 202–207.
2. HELCOM, Annual report, 2019, 18 p. URL: <https://helcom.fi/media/publications/HELCOM-Activities-Report-2019.pdf>
3. Meier H.E.M., Edman M.K., Eilola K.J., Placke M., Neumann T., Andersson H., Brunnabend S., Dieterich C., Frauen C., Friedland R., Gröger M., Gustafsson B., Gustafsson E., Isaev A., Kniesbusch M., Kuznetsov I., Müller-Karulis B., Omstedt A., Ryabchenko V., Saraiva S., Savchuk O. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5. P. 1–24. doi:10.3389/fmars.2018.00440
4. Рябченко В.А., Карлин Л.Н., Исаев А.В., Ванкевич П.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.
5. HELCOM, 2007. HELCOM Baltic Sea Action Plan (Adopted by the HELCOM Ministerial Meeting, Krakow, Poland 15th November 2007).
6. Meier M., Dieterich C., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100 // *Earth System Dynamics*. 2022. Vol. 13. P. 159–199. doi:10.5194/esd-13-159-2022
7. Bartosova A., Capell R., Olesen J.E. et al. Future socioeconomic conditions may have a larger impact than climate change on nutrient loads to the Baltic Sea // *Ambio*. 2019. Vol. 48. P. 1325–1336. doi:10.1007/s13280-019-01243-5
8. Zandersen M., Hyttiäinen K., Meier M. et al. Shared socio-economic pathways extended for the Baltic Sea: exploring long-term environmental problems // *Regional Environmental Change*. 2019. Vol. 19. P. 1073–1086. doi:10.1007/s10113-018-1453-0
9. Pihlainen S., Zandersen M., Hyttiäinen K. et al. Impacts of changing society and climate on nutrient loading to the Baltic Sea // *Science of the total environment*. 2020. Vol. 731. P. 138935 doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138935
10. Savchuk O.P., Wulff F. Modeling the Baltic Sea Eutrophication in a Decision Support System // *Ambio*. 2007. Vol. 36, No. 2–3. P. 141–148. doi:10.1579/0044-7447(2007)36[141:mtbsei]2.0.co;2
11. O'Neill B.C., Kriegler E., Riahi K., Ebi K.L., Hallegatte S., Carter T.R., Mathur R., Vuuren D.P.v.. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways // *Climate Change*. 2014. Vol. 122. P. 387–400.
12. Moss R., Edmonds J., Hibbard K., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. 2010. Vol. 463. P. 747–756. doi:10.1038/nature08823
13. Donnelly C., Greuell W., Andersson J., Gerten D. et al. Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level // *Climatic Change*. 2017. Vol. 143. P. 13–26.
14. Van Ruijven B.J., Levy M.A., Agrawal A. et al. Enhancing the relevance of shared socioeconomic pathways for climate change impacts, adaptation and vulnerability research // *Climatic Change*. 2014. Vol. 122. P. 481–494. doi:10.1007/s10584-013-0931-0
15. Donnelly C., Andersson J.C.M., Arheimer B. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe // *Hydrological Sciences Journal*. 2016. Vol. 61(2). P. 255–273. doi:10.1080/02626667.2015.1027710
16. HELCOM. 2015. Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5). Baltic Sea Environment Proceedings No. 145.
17. Murray C.J., Müller-Karulis B., Conley D.J. et al. Past, Present and Future Eutrophication Status of the Baltic Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6:2. doi:10.3389/fmars.2019.00002

References

1. Kostyanoy A.G., Eremina T.R., Ivanov V.V. et al. Marine natural systems: The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / Ed. by V.M. Katcov. *Sankt-Peterburg, Naukoemkie Tekhnologii*, 2022. P. 202–207 (in Russian).
2. HELCOM Annual report. 2019. URL: <https://helcom.fi/media/publications/HELCOM-Activities-Report-2019.pdf> (Accessed 04.12.2023).
3. Meier H.E.M., Edman M.K., Eilola K.J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations. *Frontiers in Marine Science*. 2018, 5, 1–24. doi:10.3389/fmars.2018.00440

4. Ryabchenko V.A., Karlin L.N., Isaev A.V. et al. Model estimates of eutrophication of the Baltic Sea in the current and future climate. *Okeanologiya*. 2016, 56(1), 41–50 (in Russian). doi:10.7868/S0030157416010160
5. HELCOM. 2007: HELCOM Baltic Sea Action Plan (Adopted by the HELCOM Ministerial Meeting, Krakow, Poland 15th November 2007). URL: https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSAP_Final.pdf (Accessed 12.12.2023).
6. Meier M., Dieterich C., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100. *Earth System Dynamics*. 2022, 13, 159–199. doi: 10.5194/esd-13-159-2022
7. Bartosova A., Capell R., Olesen J.E. et al. Future socioeconomic conditions may have a larger impact than climate change on nutrient loads to the Baltic Sea. *Ambio*. 2019, 48, 1325–1336. doi:10.1007/s13280-019-01243-5
8. Zandersen M., Hyytiäinen K., Meier M. et al. Shared socio-economic pathways extended for the Baltic Sea: exploring long-term environmental problems. *Regional Environmental Change*. 2019, 19, 1073–1086. doi:10.1007/s10113-018-1453-0
9. Pihlainen S., Zandersen M., Hyytiäinen K. et al. Impacts of changing society and climate on nutrient loading to the Baltic Sea. *Science of The Total Environment*. 2020, 731, 138935. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138935
10. Savchuk O., Wulff F. Modeling the Baltic Sea Eutrophication in a Decision Support System. *Ambio*. 2007, 36(2–3), 141–148. doi:10.1579/0044-7447(2007)36[141:MTBSEI]2.0.CO;2
11. O'Neill B.C., Kriegler E., Riahi K. et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climate Change*. 2014, 122, 387–400. doi:10.1007/s10584-013-0905-2
12. Moss R., Edmonds J., Hibbard K. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010, 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823
13. Donnelly C., Greuell W., Andersson J. et al. Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climate Change*. 2017, 143, 13–26. doi:10.1007/s10584-017-1971-7
14. Van Ruijven B.J., Levy M.A., Agrawal A. et al. Enhancing the relevance of shared socioeconomic pathways for climate change impacts, adaptation and vulnerability research. *Climate Change*. 2013, 122, 481–494. doi:10.1007/s10584-013-0931-0
15. Donnelly C., Andersson J.C.M., Arheimer B. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrological Sciences Journal*. 2016, 61(2), 255–273. doi:10.1080/02626667.2015.1027710
16. HELCOM. 2015: Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5). *Baltic Sea Environment Proceedings No. 145*. URL: https://www.academia.edu/76011477/Baltic_Sea_Environment_Proceedings_No_145_Baltic_Marine_Environment_Protection_Commission_Updated_Fifth_Baltic_Sea_Pollution_Load_Compilation_PLC_5_5_Published_by_Helsinki_Commission (Accessed 04.12.2023)
17. Murray C.J., Müller-Karulis B., Conley D.J. et al. Past, present and future eutrophication status of the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 6:2. doi:10.3389/fmars.2019.00002

Об авторах

- ЕРЁМИНА Татьяна Рэмовна, директор института гидрологии и океанологии, кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-5243-1804, WoS ResearcherID E-6467-2017, Scopus Author ID 25640577600, SPIN-код: 1006-4222, e-mail: tanya.er@gmail.com
- ХАЙМИНА Ольга Владимировна, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, кандидат географических наук, ORCID: 0009-0000-8545-0761, Scopus Author ID 26032078000, SPIN-код: 6418-2467, e-mail: khaimina@rshu.ru
- ВЛАДИМИРОВА Оксана Михайловна, доцент кафедры океанологии, кандидат географических наук, Scopus Author ID 57205388852, SPIN-код: 3709-3360, e-mail: 3256767@gmail.com