

ДИСКУССИИ

**БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ
С РОССИЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРОВ
КАЛИНИНГРАДСКОГО/ВИСЛИНСКОГО И КУРШСКОГО ЗАЛИВОВ**

© **Б. В. ЧУБАРЕНКО**,*¹ **С. А. КОНДРАТЬЕВ**,**² **А. Ю. БРЮХАНОВ*****³

* Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Калининград

** Институт озерадения РАН, Санкт-Петербург

*** Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург

E-mail: ¹ chuboris@mail.ru

² 3718470@gmail.com

³ sznii@yandex.ru

Прибрежные полужамкнутые заливы-лагуны, как и водоемы озерного типа, играют роль био-геохимических фильтров, которые уменьшают биогенную нагрузку на воды собственно Балтийского моря. Для систем «залив—водосбор» Калининградского/Вислинского и Куршского заливов проведены оценки удержания валовых азота и фосфора. Оценки, выполненные с помощью моделей Института озерадения РАН (ИНОЗ) и Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП), показали, что для года средней водности (220 мм/год) та часть общего выноса биогенов в акваторию заливов, которая сформирована за счет нагрузки на находящихся в Калининградской области частях их водосборов, составляет 1780 тN/год и 90 тP/год для Куршского залива и 5970 тN/год и 560 тP/год для Калининградского/Вислинского залива, причем фоновая компонента нагрузки оценивается как 1030 тN/год, 30 тP/год и 2170 тN/год, 70 тP/год соответственно. Полученные оценки в первом приближении дали одинаковые коэффициенты удержания азота и фосфора для водосборов этих заливов (45 и 49 % соответственно). Калининградский/Вислинский и Куршский заливы немного отличаются по величинам собственных коэффициентов удержания. Куршский залив более «эффективен» и обеспечивает 41 и 49 % удержания по азоту и фосфору, в то время как в Калининградском/Вислинском заливе эти величины составляют 28 и 31 % соответственно. В целом удержание биогенов за счет последовательного действия частей системы «водосбор—залив» для Калининградского/Вислинского и Куршского заливов может быть оценено как 55 и 51 % и 68 и 74 % для валовых азота и фосфора соответственно.

Ключевые слова: водосбор, моделирование, биогенная нагрузка, удержание и вынос биогенных веществ, Балтийское море, Калининградский/Вислинский и Куршский заливы.

Введение. 15 октября 1998 г. Российская Федерация одобрила Конвенцию по защите морской среды района Балтийского моря 1992 г., в соответствии с которой обязанности России включают принятие мер по предотвращению и ликвидации загрязнения Балтийского моря от источников на территории водосборного бассейна. 15 ноября 2007 г. договаривающимися сторонами Конвенции был принят План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ), декларирующий необходимость сокращения биогенной нагрузки на морскую экосистему [23, с. 10]. Установлены квоты на снижение биогенной нагрузки для каждой страны-участницы ХЕЛКОМ, которые уточнены 3 ок-

тября 2013 г. Копенгагенской министерской декларацией [24, с. 6]. В соответствии с последней версией ПДБМ Россия должна снизить биогенную нагрузку со своей территории на 10 380 т общего азота и 3790 т общего фосфора в год относительно уровня 1997—2003 гг. Указанное снижение относится в основном к российской части водосбора Финского залива и к Калининградской области. Вопросы, связанные с оценкой современной биогенной нагрузки на Финский залив, достаточно подробно рассмотрены в работах [7, с. 55], [11, с. 160]. При оценке поступления азота и фосфора в Балтику с территории Калининградской области возникает ряд сложностей. Современная система наземного мониторинга не позволяет выделить вклад российской территории в нагрузку, сформированную такими реками, как Неман и Преголя, протекающими также и по территориям Литвы, Белоруссии и Польши. Кроме того, при расчетах нагрузки, выполняемых экспертами ХЕЛКОМ [25, с. 7; 26, с. 51], поступление азота и фосфора в Калининградский/Вислинский и Куршский заливы считается нагрузкой на Балтику, что неверно, так как упомянутые прибрежные заливы-лагуны играют роль биогеохимических фильтров, существенно уменьшающих биогенную нагрузку на воды собственно Балтийского моря.

Цели настоящей работы — оценка современного уровня биогенной нагрузки на Балтийское море от точечных и рассредоточенных источников на территории водосборов Калининградского/Вислинского и Куршского заливов в пределах Калининградской области¹ с использованием методов математического моделирования, выделение диффузной и фоновой составляющих нагрузки, а также оценка удержания как на водосборе, так и в самих заливах.

Объект исследования. Калининградская область — самый западный регион России, расположенный на юго-восточном побережье Балтийского моря, полностью отделенный от России сухопутными границами иностранных государств и международными морскими водами. На севере и востоке она граничит с Литвой, на юге — с Польшей (рис. 1). На западе область ограничивает 140-километровое побережье Балтики, примерно 100 км из которых — песчаные пляжи. Площадь суши в пределах Калининградской области составляет ~13 450 км² с максимальной протяженностью с запада на восток 195 км, с севера на юг — 110 км [3, с. 21].

Калининградская область расположена в зоне избыточного увлажнения, характеризуется большими площадями заболоченных земель и развитой гидрографической сетью. Общее количество рек 4610, густота речной сети достигает 0.96 км /км². Средние модули стока подавляющего числа рек изменяются в пределах: 5—7 л/с · км². В области насчитывается около 4.5 тыс. озер, коэффициент озерности 0.62. Залесенность речных бассейнов изменяется в пределах от 2—3 до 20—21 % и 32 % в бассейне Куршского залива [3, с. 40].

В целом для климата области характерно существенное превышение количества осадков над величиной испаряемости, что определяет «промывной» водный режим почв, который в сочетании с выщелоченностью пород и воздействием кислых продуктов разложения органического вещества в почве ведет к формированию почв подзолистого типа, абсолютно преобладающих

¹ В работе не рассматривается та часть биогенной нагрузки, которая поступает из зон прямого смыва на Самбийском полуострове. Эти зоны занимают менее 10 % площади Калининградской области [4, с. 71] и не входят в водосборы рек, впадающих в заливы.



Рис. 1. Части водосборов Куршского (1) и Калининградского/Вислинского (2) заливов и водосбор малых рек Самбийского полуострова (3), расположенные на территории Калининградской области.

в области (около 80 %). По механическому составу почвы преимущественно легкие, что ведет к высокой вымываемости биогенных элементов. Земли сельскохозяйственного назначения составляют более 60 % территории суши Калининградской области и обладают высокой степенью мелиорированности. Южные и восточные районы области имеют преимущественно равнинный рельеф, северные и западные — холмистый [8, с. 128].

Более 70 % сельскохозяйственных угодий приходятся на южную половину Калининградской области, где сосредоточена большая часть растениеводческих и животноводческих предприятий. Наиболее развитые подотрасли сельского хозяйства — разведение крупного рогатого скота и выращивание кормовых культур; производство организовано преимущественно в крупных сельхозорганизациях (более 90 %). Стоит отметить, что за период 2014—2016 гг. развитие сельского хозяйства Калининградской области признано самым динамичным в России. На период до 2020 г. планируется двукратное увеличение производства сельхозпродукции, что отразится на биогенной нагрузке с сельскохозяйственных угодий [2, с. 4—5].

Одним из важнейших факторов, влияющих на урожайность сельхозкультур, является плодородие почвы. Динамика изменения плодородия почв сельхозземель свидетельствует об ее ухудшении. Такая ситуация складывается в результате использования интенсивных технологий и недостаточного восполнения плодородия почвы, которое должно осуществляется за счет агротехнических мероприятий и использования достаточных объемов органических и минеральных удобрений. Анализ технологий и объемов использования органических удобрений в области показывает низкий уровень эффективности. Согласно статистической отчетности в качестве органических удобрений используются только 30 % от общего количества образования навоза и помета, что приводит к повышенной эмиссии питательных элементов в водную и воздушную среду [2, с. 5—15].

По данным «Государственного доклада об экологической обстановке Калининградской области за 2014 год» [3, с. 55], поверхностные водные объекты области подвержены загрязнению в большей степени, чем прибрежные воды. Основные причины загрязнения поверхностных вод — сбросы неочищенных и недоочищенных сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Характерной особенностью формирования биогенной нагрузки на Балтику на территории Калининградской области так же, как и для водосбора Финского залива, является наличие геохимических барьеров, препятствующих выносу химических веществ с водосбора напрямую в морскую экосистему. Этими барьерами служат два залива: Куршский (акватория — 1585 км², водосбор — 100 458 км²) и Калининградский/ Вислинский¹ (акватория — 838 км², водосбор — 23 871 км²), которые отделены от моря узкими полосами суши — Куршской косой (98 км, 48 км принадлежит Калининградской области) и Балтийской (Вислинской) косой (65 км, 25 км принадлежит Калининградской области) (рис. 1). Основная часть пресноводного стока Юго-Восточной Балтики (за исключением р. Вислы) направляется не в Балтийское море, а в эти трансграничные прибрежные заливы-лагуны [18, с. 291]. Водосбор р. Неман, впадающей в Куршский залив, находится в Литве, Белоруссии и Калининградской области. Водосборный бассейн Калининградского/Вислинского залива [12, с. 6] находится на территории Калининградской области и северных муниципалитетов Польши. Таким образом, биогенная нагрузка со стороны территории России (Калининградской области) на эту часть Балтийского моря претерпевает существенные изменения за счет процессов, происходящих в акваториях заливов. По данным работы [9, с. 208], вклад стока с Самбийского полуострова (рис. 1) в биогенную нагрузку на Балтику незначителен и не превышает 5—6 % от общей нагрузки.

Следует отметить, что почти все реки, впадающие в Куршский залив со стороны Калининградской области, включая и рукава дельты р. Немана, соединены каналами и образуют единую мелиоративную систему, что делает крайне затруднительным точное выделение водоразделов. Поэтому представление границ водосборов Калининградского/Вислинского и Куршского заливов, приведенное на рис. 1, весьма условно.

Описание расчетного метода. Общая схема расчета биогенной нагрузки на Балтийское море с территории Калининградской области представлена на рис. 2, согласно которой нагрузка на водосбор L (т/год) и вынос в море L_{sea} (т/год) связаны следующим соотношением:

$$L_{sea} = (1 - r)[L(1 - R) + L_{point}], \quad (1)$$

где L_{point} — биогенная нагрузка непосредственно на залив, т/год; R и r — безразмерные коэффициенты удержания водосбором и водоемом соответствен-

¹ Залив по-разному именуется в различных источниках. Немецкое название всего залива (838 км²) — Frisches Haff, в польской литературе залив называется Wislany Zalew. В англоязычных изданиях чаще всего употребляется топоним «the Vistula Lagoon». В российских изданиях северная часть залива, принадлежащая России (56.2 % площади акватории), называется Калининградским заливом, южная (польская) часть — Вислинским заливом. Здесь и далее, следуя [10, с. 11], используется название «Калининградский/Вислинский залив».

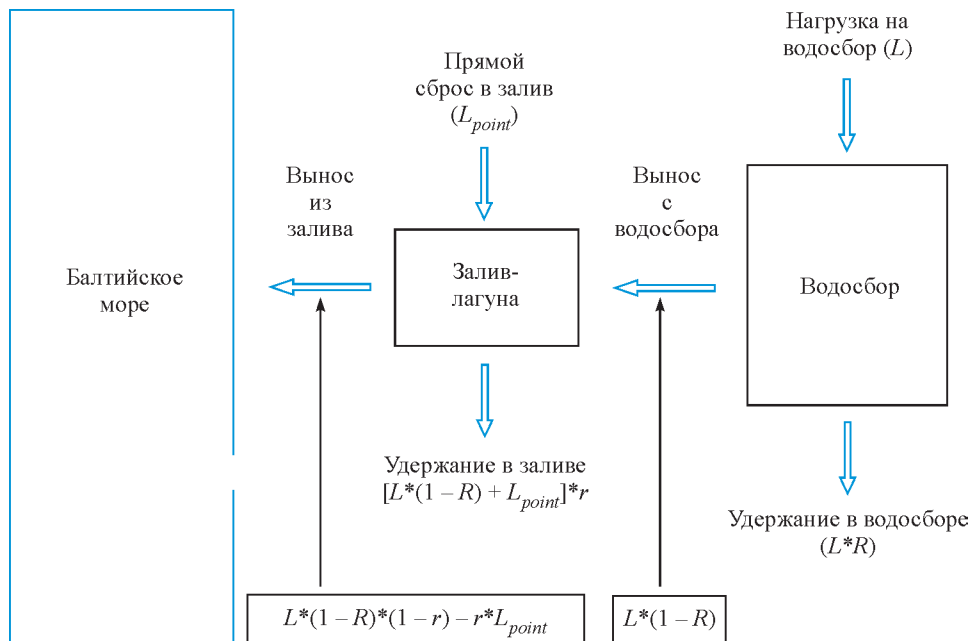


Рис. 2. Схема расчета биогенной нагрузки на Балтийское море с территории Калининградской области с учетом буферной роли Калининградского/Вислинского и Куршского заливов.

R и r — коэффициенты удержания на водосборе и в заливе, L — суммарная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора, L_{point} — прямой сброс в залив.

но. Шаг расчетов по времени составляет 1 год, поскольку именно с таким шагом в настоящее время проводятся все расчеты экспертами ХЕЛКОМ.

Нагрузка на водосбор в свою очередь складывается из нагрузки на гидрографическую сеть водосбора, сформированную сельхозпредприятиями (L_{agr}), нагрузки от естественных и антропогенных (измененных) ландшафтов, не подверженных в настоящее время сельскохозяйственному воздействию (L_c), а также нагрузки, сформированной за счет атмосферных выпадений на поверхность водосбора (L_a). Кроме того, в формировании нагрузки принимают участие точечные источники загрязнения, сбрасывающие свои сточные воды в гидрографическую сеть водосбора (L_p):

$$L = L_{agr} + L_c + L_a + L_p. \quad (2)$$

Все члены уравнения (2) имеют размерность т/год.

Нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий L_{agr} , рассчитывалась по методу ИАЭП, предложенному в [1, с. 180]. Среднегодовое значение нагрузки, поступившей в гидрографическую сеть водосбора, определялось исходя из содержания общего азота ($N_{общ}$) и общего фосфора ($P_{общ}$) в пахотном слое почвы, дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля сельхозпредприятия и их усвоения сельхозкультурами, а также с использованием коэффициентов, характеризующих вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв, удаленность контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети, происхождение и механический состав почв, а

Таблица 1

Площадь сельскохозяйственных угодий и количество домашних животных и птицы (с точностью до 10 голов) на водосборе Калининградского/Вислинского залива в пределах Калининградской области

Район	СХ*	КРС	СВ	ПТ	Л	ОиК
Багратионовский	16004	4330	2660	24630	110	9140
Гвардейский	5487	1200	350	13240	20	2910
Гурьевский	11422	4120	2440	780000	170	14780
Гусевский	19747	3270	40990	22030	10	540
Зеленоградский	2516	1000	920	17630	70	1650
Краснознаменский	8990	720	230	10930	160	3270
Неманский	5976	960	710	8010	20	1190
Нестеровский	27941	8910	4200	14020	55	1210
Озерский	25498	3480	490	21050	320	5920
Правдинский	21367	2720	80810	39550	150	9520
Черняховский	13617	3110	40	14290	130	5350
Калининград	622	130	50	822000	5	150
ВСЕГО	159187	33950	133890	1787380	1220	55630

Примечание. * Здесь и в табл. 2. СХ — площадь сельскохозяйственных угодий в пределах водосбора (га), КРС — крупный рогатый скот (гол.), СВ — свиньи (гол.), ПТ — птица (гол.), Л — лошади (гол.), ОиК — овцы и козы (гол.).

также внедрение в сельскохозяйственное производство наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических и минеральных удобрений. При проведении расчетов годового выхода навоза/помета от сельскохозяйственных животных учитывались современные практикуемые в Калининградской области технологии содержания животных и системы удаления навоза. Исходная информация, используемая при расчете биогенной нагрузки сельскохозяйственными предприятиями на водосборы Куршского и Калининградского/Вислинского заливов, приведена в табл. 1 и 2.

Результаты расчета биогенной нагрузки,¹ сформированной сельскохозяйственными предприятиями на водосборах Куршского и Калининградского/Вислинского заливов в пределах Калининградской области, представлены в табл. 3, из которой следует, что сельскохозяйственная активность существенно выше на водосборе Калининградского/Вислинского залива: рассчитанная нагрузка на его водосбор превышает нагрузку на водосбор Куршского залива в 2.9 раза по общему азоту и в 3.0 раза по общему фосфору.

Полученные значения сельскохозяйственной нагрузки использовались в качестве входной информации для выполнения последующих расчетов суммарной нагрузки на изучаемые водосборы, которые выполнялись на основе модели формирования биогенной нагрузки от точечных и рассредоточенных источников на водные объекты *ILLM — Institute of Limnology Load Model* [6, с. 52], которая была разработана в ИНОЗ РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса общих азота и фосфора ($N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$)

¹ Учитывая погрешность исходных данных, здесь и далее все величины по биогенной нагрузке даны с точностью до 10 т/год.

Таблица 2

Площадь сельскохозяйственных угодий и количество домашних животных и птицы (с точностью до 10 голов) на водосборе Куршского залива в пределах Калининградской области

Район	СХ*	КРС	СВ	ПТ	Л	ОиК
Гвардейский	610	60	300	13200	20	2200
Гурьевский	1269	450	270	5000	20	220
Зеленоградский	2450	750	19000	16200	70	1620
Краснознаменский	8590	1730	220	11800	160	2190
Неманский	11200	2120	700	8000	20	1160
Нестеровский	11850	6220	30	14210	60	1210
Полесский	8550	6190	370	23330	50	1820
Славский	14612	15360	2120	25080	340	6660
Черняховский	3290	740	430	14220	140	5280
ВСЕГО	62421	33620	23440	131040	880	22360

Примечание. * См. табл. 1.

с водосборных территорий [5, с. 40], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [20, с. 22]. Модель *ILLM* предназначена для количественной оценки биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогноза ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических воздействий. Модель ориентирована на существующие возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ. Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России на водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка [6, с. 55]. По результатам выполнения проекта [15, с. 23] сделан вывод о том, что «модель *ILLM* может использоваться для расчета биогенной нагрузки на Балтийское море для неконтролируемых и частично контролируемых водосборов в российской части водосборного бассейна» [12, с. 23]. В выводах российско-шведского проекта [32, с. 118] говорится о том, что «модель *ILLM* наиболее удобна для использования в относительно крупных водосборах».

Атмосферная нагрузка $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ на водосборы заливов оценивалась на основе анализа литературных данных [13, с. 76; 30, с. 43] и материалов, име-

Таблица 3

Нагрузка по общему азоту и фосфору, сформированная сельскохозяйственными предприятиями на водосборах Калининградского/Вислинского и Куршского заливов (в пределах Калининградской области), рассчитанная по методу ИАЭП (т/год)

Водоем	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$
Калининградский/Вислинский залив	4200	240
Куршский залив	1440	80

ющихся в распоряжении ХЕЛКОМ [14, с. 20]. В расчетах использованы следующие значения L_a : 300 кгN/(км² · год) и 5 кгP/(км² · год).

Вклад точечных источников биогенной нагрузки оценивался на основе официальной отчетной статистической информации, содержащейся в формах 2ТП-водхоз Министерства природных ресурсов и экологии. Данные, содержащиеся в этих формах, приводятся с годовым осреднением, что накладывает соответствующие ограничения на расчетные схемы и математические модели, в которых эти данные используются. Нагрузка, сформированная точечными источниками загрязнения на водосборах Калининградского/Вислинского и Куршского заливов в пределах Калининградской области, составляет по общему азоту 320 и 50 тN/год, а по общему фосфору 40 и 3 тP/год соответственно. Сброс от точечных источников непосредственно в залив (1600 и 250 тN/год для общих азота и фосфора) существен только для Калининградского/Вислинского залива, в Приморскую бухту которого сбрасываются сточные воды Калининграда (примерно 460 тыс. жителей и производственные мощности).

Как правило, большая часть биогенных веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов рек, так как при миграции поглощается почвенно-растительным покровом водосбора и различными звеньями экосистемы гидрографической сети. Для расчета коэффициента удержания R в зависимости от стока с водосбора используется следующая эмпирическая формула [6, с. 54; 16, с. 250; 17, с. 129]:

$$R = 1 - \frac{1}{1 + aq^b}, \quad (3)$$

где q — модуль стока, л/км² · с; a и b — безразмерные эмпирические параметры, значения которых составляют $a = 6.9$ и $b = -1.1$ для азота и $a = 26.6$ и $b = -1.71$ для фосфора. Значение модуля стока q связано со слоем стока y (мм/год) эмпирическим соотношением $q = 0.03171 \cdot y$.

Согласно выполненным модельным расчетам, суммарная биогенная нагрузка на водосборную площадь обоих заливов (табл. 4) составляет 11 140 тN/год и 630 тP/год. С учетом удержания водосбором и прямых сбросов на акваторию суммарная биогенная нагрузка на заливы составляет 7740 тN/год и 570 тP/год. При этом фоновая (природная) составляющая нагрузки — 3200 тN/год и 100 тP/год.

Следует отметить различие в соотношении вклада точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на изучаемые заливы с российской территории (Калининградская область). Если для Калининградского/Вислинского залива весьма существен вклад точечных источников (42 % для общего азота и 62 % для общего фосфора от соответствующих значений нагрузки на залив), то нагрузку на Куршский залив на 98 % формируют рассредоточенные источники, расположенные водосборе.

В результате внутриводоемных процессов в заливах, включающих в себя биологическую трансформацию в водной массе и донных отложениях, а также материальный обмен через границу вода—дно, внешний приток вещества в течение года может многократно включаться во внутриводоемный биохимический круговорот, в результате которого часть внешней биогенной нагрузки выводится из дальнейшего обращения, т. е. происходит ее удержание.

Таблица 4

Результаты расчета формирования биогенной нагрузки по общим азоту и фосфору на российской части водосбора Калининградского/Вислинского залива (КВЗ) и Куршского (КЗ) залива для года средней водности ($y = 220$ мм/год)

Показатель	КВЗ		КЗ		КВЗ + КЗ	
	N _{общ}	P _{общ}	N _{общ}	P _{общ}	N _{общ}	P _{общ}
1. Суммарная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора, т/год	7920	460	3220	170	11140	630
2. Удержание водосбором и его гидрографической сетью, т/год*	3560	230	1450	80	5010	310
3. Вынос с водосбора в залив, т/год*	4370	230	1770	90	6140	320
4. Прямой сброс в залив, т/год	1600	250	0	0	1600	250
5. Итоговая нагрузка на залив (№ 3 + № 4), т/год**	5970	480	1770	90	7740	570
6. Нагрузка суммарная на залив и его водосбор в пределах Калининградской области без учета удержания (№ 1 + № 4), т/год	9520	710	3220	170	12740	880
Диффузная составляющая нагрузки на залив, т/год*	3450	210	1750	80	520	290
Фоновая (природная) составляющая нагрузки на залив, т/год***	2170	70	1030	30	3200	100

Примечание. * — результат расчета по модели *ILLM*; ** — именно эта нагрузка на прибрежный водоем используются экспертами ХЕЛКОМ при подсчете общего поступления азота и фосфора в Балтику с территории его водосбора; *** — в соответствии с рекомендациями [20, с. 45] фоновая нагрузка биогенными веществами состоит из выноса с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, который происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности. На основе модели *ILLM* оценивается вклад различных (природных и антропогенных) источников в формирование нагрузки, а затем антропогенные составляющие исключаются из расчетов.

Для расчета коэффициента удержания r общего азота и общего фосфора заливами использовалась следующая формула [16, с. 250; 17, с. 129]:

$$r = 1 - \frac{1}{1 + cHL^d}, \quad (4)$$

где HL — гидравлическая нагрузка на водоем, м/год; c и d — безразмерные эмпирические параметры, значения которых составляют $c = 5.9$ и $d = -0.75$ для азота и $c = 13.3$ и $d = -0.93$ для фосфора. Значение гидравлической нагрузки HL пропорционально модулю стока q , л/км²·с и обратно пропорционально относительной площади водной поверхности W , % от общей площади:

$$HL = \frac{3.15qk^*}{W}, \quad (5)$$

где $W = 100 \cdot A_1/(A_1 + A_2)$, A_1 — площадь водоема, км²; A_2 — площадь водосбора, км²; k^* — безразмерный коэффициент, учитывающий соотношение

притока с водосбора V_1 и притока из моря V_2 : $k^* = (V_1 + V_2)/V_1$, значение которого составляет 5.86 для Калининградского/Вислинского залива и 1.22 для Куршского залива. При этом значение модуля стока q , также как и в формуле (3), связано со слоем стока y , мм/год, соотношением $q = 0.03171 \cdot y$, а данные о площадях и водном балансе взяты из [19, с. 57].

Результаты количественной оценки коэффициентов удержания общего азота и общего фосфора таковы, что Калининградский/Вислинский и Куршский заливы немного отличаются по величинам собственных коэффициентов удержания. Куршский залив более «эффективен» и обеспечивает 41 и 49 % удержания по азоту и фосфору, в то время как в Калининградском/Вислинском заливе эти величины составляют 28 и 31 % соответственно. Можно отметить, что удержание фосфора обоими заливами существенно выше, чем удержание азота, что объясняется в первую очередь тем, что фосфор — преимущественно водный мигрант. В отличие от фосфора баланс азота в водных объектах в значительной степени зависит от интенсивности и направленности массообмена с атмосферой, который может компенсировать недостаток или избыток азота в водной массе.

Задача об удержании части биогенной нагрузки в пределах Калининградского/Вислинского залива решалась в 1994—1997 гг. в рамках проведения совместного датско-польско-российского проекта «Vistula Lagoon». Для Калининградского/Вислинского залива была внедрена численная модель расчета циклов азота и фосфора [28, с. 207; 29, с. 5]. По выполненной оценке для условий 1994 г. непосредственно в Балтийское море попадает всего лишь 22 % азотной нагрузки со стороны водосбора и 35 % — фосфорной. Остальная часть биогенных веществ аккумулируется в донных осадках залива и уходит на обеспечение роста фитопланктона. Достаточно хорошее совпадение оценок для коэффициентов удержания азота и фосфора в Калининградском/Вислинском заливе, полученных разными методами (соответственно 0.28 и 0.31 и 0.22 и 0.35 в проекте «Vistula Lagoon»), свидетельствует об их правдоподобности.

Принимая за интегральный коэффициент удержания всей системой «водосбор—залив» отношение годовой величины удержанного биогенного стока к полному поступлению биогенов (суммарная нагрузка на водосбор плюс прямой сброс в акваторию заливов), получаем для Калининградского/Вислинского залива 0.55 и 0.51, а для Куршского залива — 0.68 и 0.74 для валового азота и фосфора соответственно. Большие величины удержания для всей системы обусловлены последовательным действием водосбора и собственно залива.

Заключение. В настоящее время активно обсуждается вопрос о том, что меры и нормативы по снижению нагрузки в водосборе Балтийского моря должны быть территориально дифференцированными, т. е. они должны принимать во внимание различия территорий по условиям удержания биогенных веществ [21, с. 236; 22, с. 7—8, 31, 1287; 27, с. 264]. На основе приведенных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что значительная часть биогенных веществ, вынесенных с водосборов Калининградского/Вислинского и Куршского заливов, удерживается этими водоемами, снижая, таким образом, нагрузку на Балтику. Коэффициенты удержания фосфора и азота Калининградским/Вислинским и Куршским заливами составляют 0.28 и 0.41 для валового азота и 0.31 и 0.49 для валового фосфора соответственно. В год средней водности до морской акватории с российской части водосбо-

ров обоих заливов доходит не более 5330 тN/год и 430 тP/год. Именно эти цифры должны использоваться при оценке вклада России в биогенную нагрузку на Балтийское море, хотя традиционно заливы и прибрежные воды относятся в материалах ХЕЛКОМ к морской акватории. Кроме того, настоящее исследование является иллюстрацией того, что лагуны-заливы, как биохимические фильтры являются значительным резервом для уменьшения внешней нагрузки на водные объекты.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны темы «Научно-обоснованные предложения по распределению величины трансграничной нагрузки с территории Калининградской области в юго-восточную часть Балтийского моря между Российской Федерацией и сопредельными государствами — Литва, Польша и Белоруссия» (ГПД 61-НИР/ФИЦП-2016 от 04.04.2016 в рамках реализации Министерством природных ресурсов и экологии РФ федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах»), а также темы № 0149-2014-0017 государственного задания ИО РАН. Авторы выражают благодарность Д. А. Домнину за высказанные замечания и за помощь в подготовке рис. 1.

Список литературы

- [1] Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Обломкова Н. С., Огуздин А. С., Субботин И. А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175—183.
- [2] Брюханов А. Ю., Максимов Д. А., Васильев Э. В., Шалавина Е. В., Субботин И. А., Оглуздин А. С., Хухта Х., Уваров Р. А. Рекомендации по обоснованию экологически безопасного размещения и функционирования животноводческих и птицеводческих предприятий. СПб.: ИАЭП, 2015. 52 с.
- [3] Доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2014 году». Калининград: Правительство Калининградской области, 2015. 189 с.
- [4] Домнин Д. А., Чубаренко Б. В. Трансграничные водосборы юго-восточной Балтики // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 69—76.
- [5] Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
- [6] Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3—4. С. 50—59.
- [7] Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Тарбаева В. М., Шмакова М. В., Брюханов А. Ю., Воробьева Е. А., Обломкова Н. С. Научное обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // Вестник СПбГУ. 2016. Сер. 7. Геология. География. С. 53—65.
- [8] Попов В. Д., Максимов Д. А., Морозов Ю. Л., Перекопский А. Н., Логинов Г. А., Романовский Н. В., Сухопаров А. И. Технологическая модернизация отраслей растениеводства АПК Северо-Западного федерального округа. СПб.: ИАЭП, 2014. 288 с.
- [9] Разработка научных рекомендаций по снижению негативного природного и антропогенного воздействия на акваторию Балтийского моря (прибрежная полоса

- Калининградской области и восточная часть Финского залива). Отчет о НИР по договору № 01/09-900. СПб.: ААНИИ, 2010. 350 с.
- [10] Регион Калининградского/Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития / Под ред. В. Кушевки, Г. М. Федорова, Б. В. Чубаренко, В. А. Гриценко. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2014. 216 с.
- [11] Румянцев В. А., Кондратьев С. А. О соответствии биогенной нагрузки с российской территории на Финский залив требованиям Плана действий по Балтийскому морю // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3. С. 159—162.
- [12] Соловьев И. И. Географическое положение и границы залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н. Н. Лазаренко, А. Маевского. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 6—10.
- [13] Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 36 с.
- [14] Atmospheric Supply of Nitrogen, Lead, Cadmium, Mercury and Dioxins/Furans to the Baltic Sea in 2010: EMEP Centres Joint Report for HELCOM. EMEP/MSW-TECHNICAL REPORT 2/2012. 158 p.
- [15] BaltHazAR II. Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e. g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a. Testing the nutrient load model for the River Luga catchment. HELCOM, 2012. 29 p.
- [16] Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and Heavy Metals in the Odra River system: Emissions from Point and Diffuse Sources, their Loads, and Scenario Calculations on Possible Change. WeissenseeVerlag Publ., Germany, 2007. 337 p.
- [17] Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // Hydrobiologia. 1999. Vol. 410. P. 111—122.
- [18] Chubarenko B. The role of coastal lagoons in land-sea transport of water and substances in the South-east Baltic // Transboundary waters and basins in the South-East Baltic / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 291—300. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/stories/publication/Transboundar.pdf> (дата обращения: 15.03.2017).
- [19] Chubarenko B. V., Chubarenko I. P., Baudler H. Comparison of Darss-Zingst Bodden Chain and Vistula Lagoon (Baltic Sea) in a view of hydrodynamic numerical modelling // Baltica. 2005. Vol. 18 (2). P. 56—67.
- [20] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki: HELCOM, 2005. 80 p.
- [21] Hansen A. L., Gunderman D., He X., Refsgaard J. C. Uncertainty assessment of spatially distributed nitrate reduction potential in groundwater using multiple geological realizations // Journal of Hydrology. 2014. Vol. 519. P. 225—237.
- [22] Hashemi F., Olesen J. E. Review report on existing scenario studies of nutrient reductions // BONUS Soils2Sea Deliverable 2.1, 2015. Aarhus University, Denmark. URL: http://soils2sea.eu/xpdf/d2-1_review-of-existiing-scenarios.pdf (дата обращения: 15.03.2017).
- [23] HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 2007. 103 p.
- [24] HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan «Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea». Copenhagen: Denmark, 2013a. 19 p.
- [25] HELCOM Summary report on the development of revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan — Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 2013b. 22 p.
- [26] HELCOM Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5) — Baltic Sea Environment Proceedings. 2015. N 145. 142 p.

- [27] *Jacobsen B. H., Hansen A. L.* Economic gains from targeted measures related to non-point pollution in agriculture based on detailed nitrate reduction maps // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 556. P. 264—275.
- [28] *Kwiatkowski J., Chubarenko B., Rasmussen E. K.* Vistula Lagoon as a trap of nutrient pollution // *Transboundary waters and basins in the South-East Baltic* / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 207—214. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/stories/publication/Transboundar.pdf> (дата обращения: 15.03.2017).
- [29] *Kwiatkowski J., Rasmussen E. K., Ezhova E., Chubarenko B.* The eutrophication model of the Vistula Lagoon // *Oceanological Studies*. 1997. N 1. P. 5—33.
- [30] Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999. Report N4/01. Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, 1999. 66 p.
- [31] *Refsgaard J. C., Auken E., Bamberg C. A., Christensen B. S. B., Clausen T., Dalggaard E., Efferso F., Ernsten V., Gertz F., Hansen A. L., He X., Jacobsen B. H., Jensen K. H., Jørgensen F., Jørgensen L. F., Koch J., Nilsson B., Petersen C., De Schepper G., Schamper C., Sørensen K. I., Therrien R., Thirup C., Viezzoli A.* Nitrate reduction in geologically heterogeneous catchments — a framework for assessing the scale of predictive capability of hydrological models // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 468—469. P. 1278—1288.
- [32] *RusNIP II* — An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Report 6645. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency, 2015. 38 p.

Поступило в редакцию
10 апреля 2017 г.

Nutrient load from the Russian portions of the Vistula and Curonian lagoons catchments

© *B. V. Chubarenko*,*¹ *S. A. Kondratyev*,**² *A. Yu. Brukhanov****³

* Atlantic Branch of P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy
of Sciences, Russia, Kaliningrad

** Institute of Limnology of Russian Academy of Sciences,
Russia, Saint Petersburg

*** Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production, Russia, Saint Petersburg

E-mail: ¹ chuboris@mail.ru

² 3718470@gmail.com

³ sznii@yandex.ru

Coastal lagoons (as well as lakes) play the role of biogeochemical filters reducing the nutrient load to the Baltic Sea. The estimates of retention of nutrients were made for the «lagoon-catchment» systems of the Curonian and Vistula lagoons of the Baltic Sea. Models of IL RAN and IEEP for the year of average precipitation (220 mm/year) gave following values of the emission with river discharge to the lagoons from Russian parts of their catchments: 1780 tN/year и 90 tP/year for the Curonian lagoon and 5970 tN/year and 560 tP/year for the Vistula lagoon, and the natural background emissions are 1030 tN/year and 30 tP/year, 2170 tN/year and 70 tP/year respectively. The first order estimates gave the equal retention for the catchments of the Curonian and Vistula lagoons: 45 % for total nitrogen and 49 % of total phosphorus. The retention capacities of the lagoons themselves are different, the Curonian lagoon

is generally more «effective»: the Vistula lagoon is characterized by 28 and 31 % of retention while the Curonian lagoon by 41 and 49 % for the total nitrogen and phosphorus respectively. In total, the retention after «consecutive filtering» of nutrients by a catchment and a lagoon for the Vistula and Curonian lagoons are 55 % and 51, 68 and 74 % for total nitrogen and phosphorus respectively.

Key words: catchment, modeling, nutrient load, retention and emission of nutrients, Baltic Sea, Vistula and Curonian lagoons.

References

- [1] *Bryuxanov A. Yu., Kondrat'ev S. A., Oblomkova N. S., Oguzdin A. S., Subbotin I. A.* Metodika opredeleniya biogennoj nagruzki sel'skoxozyajstvennogo proizvodstva na vodnye ob'ekty // *Texnologii i tekhnicheskie sredstva mexanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. N 89. S. 175—183.
- [2] *Bryuxanov A. Yu., Maksimov D. A., Vasil'ev E. V., Shalavina E. V., Subbotin I. A., Ogluzdin A. S., Xuxta X., Uvarov R. A.* Rekomendacii po obosnovaniyu e'kologicheskii bezopasnogo razmeshheniya i funkcionirovaniya zhivotnovodcheskix i pticevodcheskix predpriyatij. SPb.: IAE'P, 2015. 52 s.
- [3] Doklad «Ob e'kologicheskoy obstanovke v Kaliningradskoj oblasti v 2014 godu». Kaliningrad: Pravitel'stvo Kaliningradskoj oblasti, 2015. 189 s.
- [4] *Domnin D. A., Chubarenko B. V.* Transgranichnye vodosbory Yugo-vostochnoj Baltiki // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2012. N 3. S. 69—76.
- [5] *Kondrat'ev S. A.* Formirovanie vneshnej nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya. SPb.: Nauka, 2007. 253 s.
- [6] *Kondrat'ev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G.* Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty // *Regional'naya e'kologiya*. 2011. N 3—4. S. 50—59.
- [7] *Pozdnyakov Sh. R., Kondrat'ev S. A., Tarbaeva V. M., Shmakova M. V., Bryuxanov A. Yu., Vorob'yova E. A., Oblomkova N. S.* Nauchnoe obosnovanie vypolneniya rekomendacij XELKOM po snizheniyu biogennoj nagruzki na Finskij zaliv so storony Rossii // *Vestnik SPbGU. Ser. 7. Geologiya. Geografiya*. 2016. S. 53—65.
- [8] *Popov V. D., Maksimov D. A., Morozov Yu. L., Perekopskij A. N., Loginov G. A., Romanovskij N. V., Suxoparov A. I.* Teknologicheskaya modernizaciya otraslej rastenievodstva APK severo-zapadnogo federal'nogo okruga. SPb.: IAE'P, 2014. 288 s.
- [9] Razrabotka nauchnyx rekomendacij po snizheniyu negativnogo prirodnogo i antropogennogo vozdejstviya na akvatoriyu Baltijskogo morya (pribrezhnaya poloska Kaliningradskoj oblasti i vostochnaya chast' Finskogo zaliva: Otchet o NIR po dogovoru N 01/09-900. SPb.: AANII, 2010. 350 s.
- [10] Region Kaliningradskogo/Vislinskogo zaliva: sovremennoe sostoyanie i scenarij razvitiya / Pod red. V. Kushevski, G. M. Fedorova, B. V. Chubarenko, V. A. Gricenko. Kaliningrad: BFU im. I. Kanta, 2014. 216 s.
- [11] *Rumyancev V. A., Kondrat'ev S. A.* O sootvetstvii biogennoj nagruzki s rossijskoj territorii na finskij zaliv trebovaniyam Plana dejstvij po baltijskomu moryu // *Obshhestvo. Sreda. Razvitie*. 2014. N 3. S. 159—162.
- [12] *Solov'ev I. I.* Geograficheskoe polozhenie i granicy zaliva // *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva* / Pod red. N. N. Lazarenko, A. Maevskogo. L.: Gidrometeoizdat, 1971. S. 6—10.
- [13] *Xrisanov N. I., Osipov G. K.* Upravlenie e'vtrofirovaniem vodoemov. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. S. 36.
- [14] Atmospheric Supply of Nitrogen, Lead, Cadmium, Mercury and Dioxins/Furans to the Baltic Sea in 2010: EMEP Centres Joint Report for HELCOM. EMEP/MS-CW TECHNICAL REPORT 2/2012. 158 p.

- [15] BaltHazAR II. Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e. g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a. Testing the nutrient load model for the River Luga catchment. HELCOM, 2012. 29 p.
- [16] *Behrendt H., Dannowski R.* Nutrients and heavy metals in the Odra River system: Emissions from Point and Diffuse Sources, their Loads, and Scenario Calculations on Possible Change. WeissenseeVerlag Publ., Germany, 2007. 337 p.
- [17] *Behrendt H., Opitz D.* Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 410. P. 111—122.
- [18] *Chubarenko B.* The role of coastal lagoons in land-sea transport of water and substances in the South-east Baltic // *Transboundary waters and basins in the South-East Baltic* / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 291—300. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/stories/publication/Transboundar.pdf> (data obracheniya: 15.03.2017).
- [19] *Chubarenko B. V., Chubarenko I. P., Baudler H.* Comparison of Darss-Zingst Bodden Chain and Vistula Lagoon (Baltic Sea) in a view of hydrodynamic numerical modelling // *Baltica*. 2005. Vol. 18 (2). P. 56—67.
- [20] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki: HELCOM, 2005. 80 p.
- [21] *Hansen A. L., Gunderman D., He X., Refsgaard J. C.* Uncertainty assessment of spatially distributed nitrate reduction potential in groundwater using multiple geological realizations // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 519. P. 225—237.
- [22] *Hashemi F., Olesen J. E.* Review report on existing scenario studies of nutrient reductions // BONUS Soils2Sea Deliverable 2.1, 2015. Aarhus University, Denmark. URL: http://soils2sea.eu/xpdf/d2-1_review-of-existiing-scenarios.pdf (data obracheniya: 15.03.2017).
- [23] HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 2007. 103 p.
- [24] HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan «Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea». Copenhagen: Denmark, 2013a. 19 p.
- [25] HELCOM Summary report on the development of revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan — Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 2013b. 22 p.
- [26] HELCOM Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5) — Baltic Sea Environment Proceedings. 2015. N 145. 142 p.
- [27] *Jacobsen B. H., Hansen A. L.* Economic gains from targeted measures related to non-point pollution in agriculture based on detailed nitrate reduction maps // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 556. P. 264—275.
- [28] *Kwiatkowski J., Chubarenko B., Rasmussen E. K.* Vistula Lagoon as a trap of nutrient pollution // *Transboundary waters and basins in the South-East Baltic* / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 207—214. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/stories/publication/Transboundar.pdf> (data obracheniya: 15.03.2017).
- [29] *Kwiatkowski J., Rasmussen E. K., Ezhova E., Chubarenko B.* The eutrophication model of the Vistula Lagoon // *Oceanological Studies*. 1997. N 1. P. 5—33.
- [30] Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999. Report N4/01. Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research, 1999. 66 p.
- [31] *Refsgaard J. C., Auken E., Bamberg C. A., Christensen B. S. B., Clausen T., Dalggaard E., Efferso F., Ernstsens V., Gertz F., Hansen A. L., He X., Jacobsen B. H., Jensen K. H., Jørgensen F., Jørgensen L. F., Koch J., Nilsson B., Petersen C., De Schep-*

per G., Schamper C., Sørensen K. I., Therrien R., Thirup C., Viezzoli A. Nitrate reduction in geologically heterogeneous catchments — a framework for assessing the scale of predictive capability of hydrological models // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 468—469. P. 1278—1288.

- [32] RusNIP II — An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Report 6645. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency, 2015. 38 p.
-